

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОХИБОК НА СУПУТНИКОВІ ВИМІРЮВАННЯ В RTK-РЕЖИМІ

© Задемленюк А.В., 2010

Проведены исследования основных погрешностей, влияющих на спутниковые измерения в режиме RTK.

The article provides research and analysis of major errors made that affect the satellite measurements in the RTK mode.

Постановка проблеми. Похибки визначення координат при кінематичному позиціонуванні у режимі реального часу – RTK зростають з віддаленістю користувача з пересувним приймачем від референцної (базової) станції, на якій встановлено стаціонарний приймач. Це пов’язано передовсім із зменшенням кореляції похибок вимірювань двох приймачів. Ефективним способом підвищення точності визначення координат пересувного приймача є формування необроблених даних про фазу носія в ході сумісного опрацювання вимірів у мережі референцних станцій. Існують різні підходи до мережевого опрацювання інформації. Один із них передбачає розділення сумарної похибки вимірювань на складові та побудову моделей, які описують стан кожного окремого виду просторово корельованих похибок у межах території, охопленої мережею референцних станцій. У разі збільшення території, яку обслуговує мережа станцій, ускладнюються моделі, які необхідні для адекватного опису кожної із компонент похибок вимірювань. Кількість параметрів цих моделей зростає і для їх знаходження вимагається більша кількість референцних станцій у мережі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, у яких вирішується ця проблема. Від моменту появи режиму RTK (з 90-х років XX ст.) вчені з різних організацій у всьому світі займаються дослідженнями, спрямованими на визначення та прогноз похибок, від яких надалі залежатимуть результати GNSS-спостережень. Відомо, що значення похибок залежать від багатьох факторів: точності визначення орбіт супутників, атмосферних умов поширення сигналу, географічного місця розташування пункту спостереження, GNSS-обладнання тощо [1].

Основна ідея RTK полягає в тому, що на базовій станції з відомими координатами безперервно отримують GNSS-сигнали від супутників та використовують їх для корегування даних пересувного приймача. “Ідеальний” сигнал спотворюється іоносферою, тропосферою. На нього впливають також зміни координат супутника, пов’язані з похибками параметрів визначення їх орбіт, зміщення ходу годинників супутника і приймача, багатошляховість сигналу тощо. Тому розрахункові координати відрізняються від відомих координат станції. Обчислюючи корекції, які математично “зміщують” положення референцної станції на її відоме місце, застосовують їх на пересувному приймачі. Оскільки референцна станція і пересувний приймач розташовані у різних місцях, то і сигнали будуть спотворені по-різному. Звідси випливає, що результати корегування можуть бути недостовірними щодо визначення положення пересувного приймача. Фактори, які стосуються цього процесу, можуть класифікуватися по-різному, наприклад, систематичною залежністю від відстані.

Відмінність між RTK і мережею RTK полягає в тому, що результати корегувань об’єднуються від кількох референцних станцій з метою надання пересувному приймачу достовірних поправок [2]. З мережею RTK похибки положення пересувного приймача інтерполують між станціями залежно від відстаней до них і тим самим підвищують достовірність координат.

Постановка завдання. Метою нашої роботи було з'ясувати вплив різних факторів на точність визначення координат у режимі RTK на прикладі референцних станцій мережі ZAKPOS/UA-EUPOS.

Виклад основного матеріалу. За походженням похибки GNSS-спостережень можна поділити на три основні групи:

- пов'язані з супутниками: похибки орбіт супутників;
- пов'язані з впливом зовнішнього середовища: тропосферна та іоносферна затримки сигналу, а також багатошляховість;
- пов'язані з GNSS-обладнанням.

Похибки орбіт супутників. Похибки положення супутника на орбіті, які надалі вважатимемо похибками орбіт, виникають внаслідок неточностей прогнозу і розрахунку ефемерид супутників на момент вимірювань. На сучасному етапі розвитку супутникових технологій позиціонування ефемериди супутників поділяють на чотири типи: **Broadcast** – бортові або трансльовані, що передаються безпосередньо від GPS-супутників під час виконання спостережень, а результатом при цьому є навігаційний файл (файл *.n у форматі RINEX), **Ultra-rapid** – надшвидкі, **Rapid** – швидкі та **Final** – остаточні. Останні три типи ефемерид отримують у центрі опрацювання IGS [3], де вони подані з розширенням *.sp3. Різниця між ними полягає у часі очікування та точності. Найточнішими є остаточні ефемериди (~2.5 см), які стають доступними через 12 днів від моменту проведення спостережень. За ними йдуть швидкі (від 2.5 см), які доступними стають через 17 год. та надшвидкі (~3–5 см), які можна отримати протягом поточного дня (на 03.00, 09.00, 15.00 і 21.00 UT).

Оцінити значення похибки ефемерид супутника на точність координат пункту m_p можна за такою формулою:

$$m_p = l \cdot \frac{\delta_{orb.}}{\rho}, \quad (1)$$

де l – довжина базової лінії; ρ – відстань від пункту на земній поверхні до супутника (близько 20 000 км); $\delta_{orb.}$ – похибка ефемерид супутника.

Якщо позначити координати супутника, обчислені за остаточними ефемеридами, через x^T, y^T, z^T , а ті самі координати, обчислені на основі бортових (B) ефемерид, через x^B, y^B, z^B , то можна за їхніми різницями оцінити вплив похибок бортових ефемерид на точність визначення положення пересувного приймача залежно від довжини базової лінії референсна станція – пересувний приймач [9]. Аналогічно можна оцінити вплив похибок надшвидких ($ни$) та швидких ($ш$) ефемерид, приймаючи, що координати супутників отримані відповідно $x^{ни}, y^{ни}, z^{ни}$ та $x^{ш}, y^{ш}, z^{ш}$. Для цього нами була створена спеціальна програма, вхідними даними до якої слугували навігаційні файли, одержані під час GNSS-спостережень, файли надшвидких і швидких ефемерид та файли остаточних ефемерид, які ми отримували із бази даних IGS і які вважалися контрольними. За цими даними і обчислювалися координати супутників для i -го моменту часу. На основі отриманих координат супутників розраховувалися їхні різниці на вибрані моменти часу:

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= x_i^B - x_i^T \\ \Delta y_i &= y_i^B - y_i^T, \\ \Delta z_i &= z_i^B - z_i^T \end{aligned} \quad (2)$$

після чого знаходили 3D похибку:

$$3D = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2}.$$

Середня квадратична 3D похибка за добу для k -го супутника визначається таким виразом:

$$CKП_{3D_k} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2)}, \quad (3)$$

а загальну похибку для всіх супутників можна знайти так:

$$CKП_{заг} = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{k=1}^S (CKП_{3D_k})^2}, \quad (4)$$

де S – кількість супутників, що спостерігаються протягом доби.

На основі наведених формул (2)–(4) нами розраховано загальні похибки бортових (broadcast), надшвидких (ultrarapid) та швидких (rapid) ефемерид протягом одного тижня (з 11.07. до 17.07.2010 р.). За отриманими даними ми побудували графіки значень похибок координат супутників (див. рис. 1).

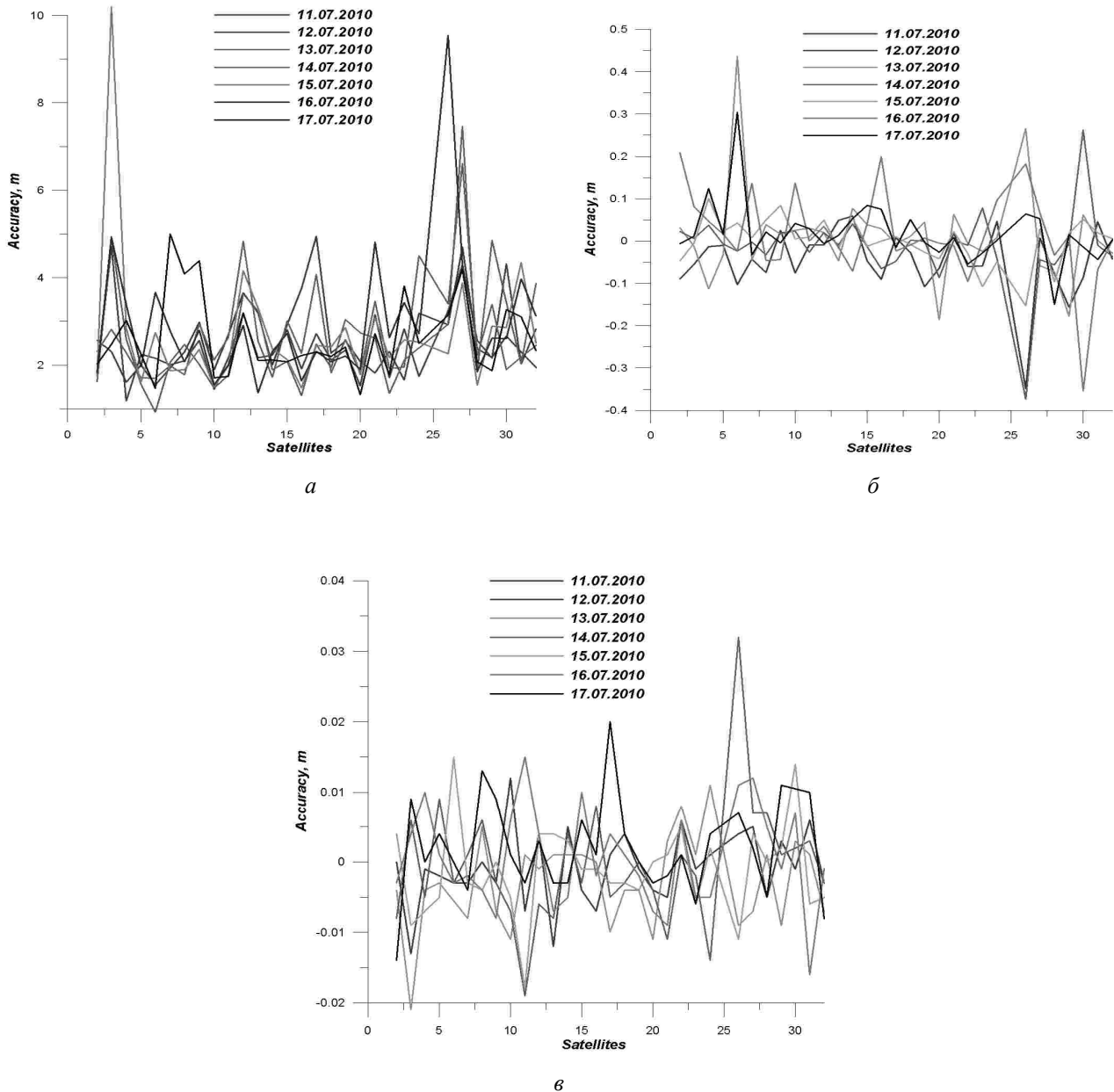


Рис. 1. Похибки на 2010 р.: а – бортових ефемерид;
б – надшвидких ефемерид; в – швидких ефемерид

Зважаючи на те, що сучасне мережеве програмне забезпечення, наприклад, GPSNet/VRS3Net [4], може використовувати у своїй роботі як бортові ефемериди, що отримуються безпосередньо від GNSS-потоків даних із приймачів, так і надшвидкі ефемериди, що приймаються безперервно через

Інтернет із баз даних IGS, ми виконали статистичну вибірку одержаних похибок. У табл.1 наведено порівняльні значення похибок координат супутників, визначених на основі бортових та надшвидких параметрів орбіт супутників.

Таблиця 1

Порівняння похибок орбіт супутників станом на 2010 р.

Статистичні характеристики	Похибки орбіт, м	
	Бортові	Надшвидкі
<i>сер.</i>	2.670	0.050
<i>макс.</i>	6.924	0.226
<i>мін.</i>	1.361	-0.316

Як видно із табл. 1, сучасні значення похибок надшвидких ефемерид супутників, що отримуються протягом поточного дня спостережень, становлять в середньому 5 см, а розмах не перевищує 1 м. Бортові ефемериди мають набагато гірші характеристики, хоча саме їх використовували ще донедавна при RTK-вимірюваннях.

Скориставшись даними табл. 1, ми можемо оцінити точність положення пересувного приймача за формулою (1). Зважаючи на стандартні відстані між референцними станціями мережі ZAKPOS (близько 100 км), наведемо значення похибок координат точки стояння пересувного приймача (координат користувача) залежно від похибок відповідних орбіт при довжині базової лінії $l = 100$ км (див. табл. 2).

Таблиця 2

Похибки координат користувача через орбіти (2010 р.) супутників

Ефемериди	$\delta_{orb}, \text{м}$	$m_p, \text{см}$
Бортові	2.670	1.3
	6.924	3.5
	1.361	0.7
Надшвидкі	0.050	0
	0.226	0.1
	-0.316	0.2

Із табл. 2 чітко видно різницю між використанням бортових та надшвидких ефемерид. Тому на сьогоднішньому етапі розвитку супутникових технологій можна стверджувати, що похибки надшвидких ефемерид супутників практично не впливають на точність визначення координат пересувного приймача під час його роботи в RTK-режимі.

Для порівняння сучасного стану ефемеридного забезпечення із даними 10-річної давності (це той час, коли починалася епоха RTK-вимірювань) ми навели подібні розрахунки точності координат супутників на один тиждень 2000 р. На основі отриманих даних ми побудували відповідні графіки (див. рис. 2) значень похибок координат супутників, здійснили статистичну вибірку одержаних похибок та оцінили точність положення пересувного приймача за формулою (1), див. табл. 3.

Таблиця 3

Похибки координат користувача через орбіти (2000 р.) супутників

Ефемериди	Статистичні характеристики	$\delta_{orb}, \text{м}$	$m_p, \text{см}$
Бортові	<i>сер.</i>	4.05	2.0
	<i>макс.</i>	37.67	18.8
	<i>мін.</i>	0.12	0.0
Надшвидкі	<i>сер.</i>	3.43	0.2
	<i>макс.</i>	67.05	33.5
	<i>мін.</i>	0.09	0.0

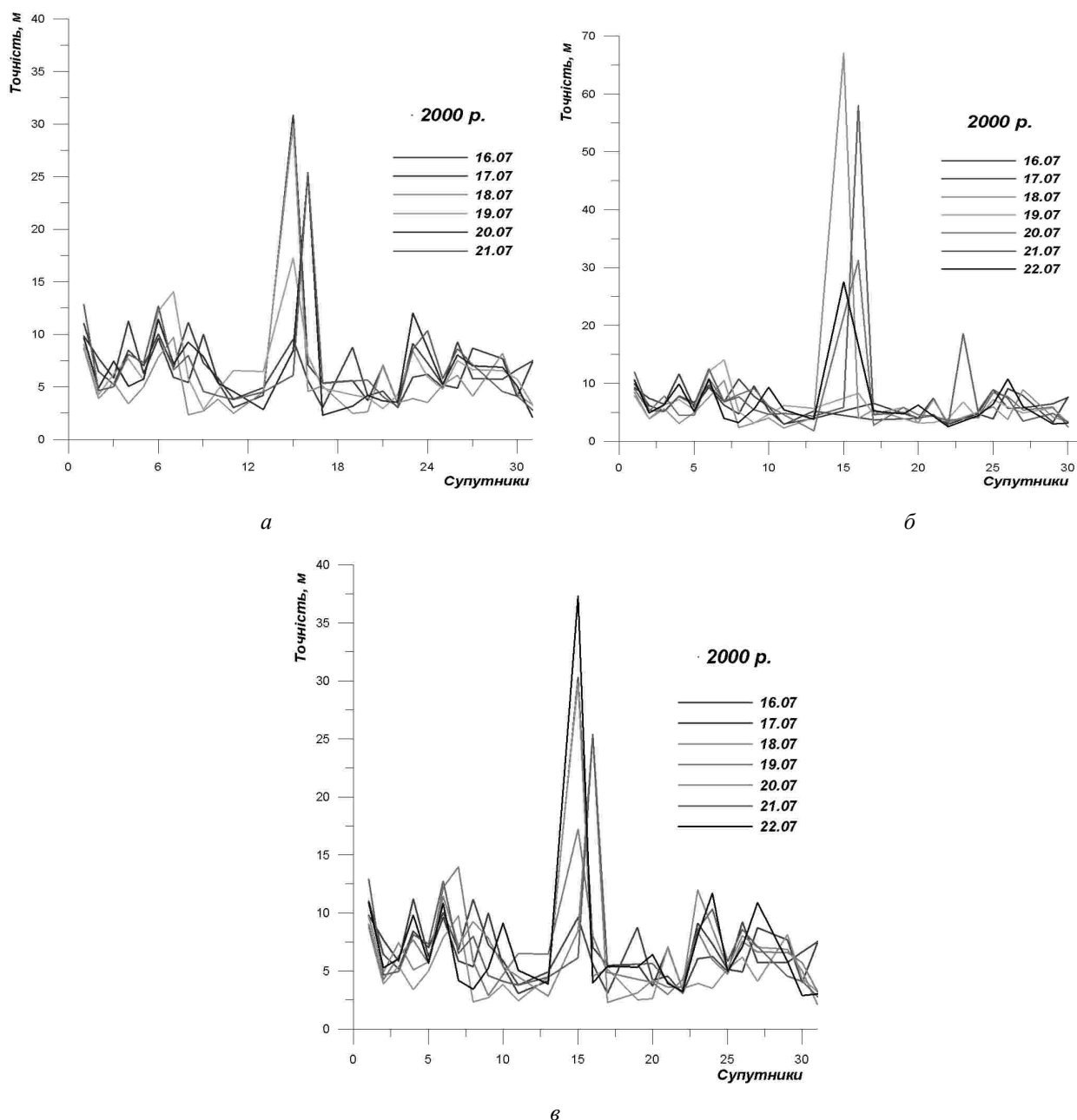


Рис. 2. Похибки на 2010 р.: а – бортових ефемерид;
б – надшвидких ефемерид; в – швидких ефемерид

Як бачимо, значення похибок ефемерид супутників, а відповідно, і похибок координат користувача у 2000 р. перевищують аналогічні показники 2010 р. (див. табл. 2) практично на порядок. Для зменшення впливу цього виду похибок рекомендувалося істотно зменшувати відстані між референсною станцією і пересувним приймачем, що у багатьох випадках ставало значною економічною перешкодою для впровадження технології RTK у геодезичну практику.

Тропосферна похибка. Наявність тропосферної складової атмосфери призводить до того, що поширення електромагнітних хвиль супроводжується зменшенням швидкості поширення порівняно з вакуумом (тропосферна затримка); викривленням траєкторії хвилі (рефракція); згасанням (послаблення інтенсивності) та флуктуаціями (випадкові зміни) параметрів хвилі, зумовленими турбулентністю атмосферного повітря.

Величина тропосферної затримки залежить в основному від метеорологічних параметрів (атмосферного тиску, температури повітря, вологості), а також від висоти супутника над об'єктом.

Тропосферна затримка не є дисперсійною, тому зменшити її вплив можна лише застосуванням модельної корекції [2].

Урахування впливу нижньої неіонізованої частини атмосфери у результатах GNSS-вимірів стосується багато робіт, автори яких розробили цілий ряд аналітичних моделей для визначення тропосферної затримки [2]. Використання цих моделей не забезпечує сповна необхідної точності визначення тропосферної поправки, оскільки при цьому не враховуються регіональні особливості будови атмосфери.

Повне значення тропосферної поправки $\Delta\rho$ прийнято розглядати як добуток значення тропосферної затримки в зеніті $\Delta\rho^z$ на функцію відображення $m(Z)$ сухої (гідростатичної) та вологої (негідростатичної) складових затримки в зеніті на кут підвищення супутника над горизонтом:

$$\Delta\rho = \Delta\rho_C^z \cdot m_c(Z) + \Delta\rho_B^z \cdot m_b(Z) \quad (5)$$

$\Delta\rho_C^z, \Delta\rho_B^z$ – відповідно “суха” і “волога” складові тропосферної затримки сигналу в зеніті.

За останні десятиліття запропонована велика кількість моделей, що дають змогу оцінити значення компонентів $\Delta\rho_C^z, \Delta\rho_B^z, m_c(Z), m_b(Z)$ тропосферної затримки. До них належать моделі Saastamoinen (1972), Hopfield (1969), Niell (1996, 2000) та інші [5–7].

Всі моделі основані на побудові емпіричної формули, що встановлює залежність коефіцієнта заломлення від висоти. Різні моделі відрізняються переважно параметрами, що входять в емпіричну формулу і методами взяття інтеграла, що приводить до деяких варіацій числових констант, які входять у модель. Більшість моделей пов’язана з використанням даних про метеопараметри.

На референцних станціях зенітну тропосферну затримку можна безпосередньо визначити, оскільки координати її є відомими. Тому в мережі референцних станцій величини тропосферних затримок можуть інтерполюватися деяким алгоритмом, вихідні дані для якого беруть зі станцій. Ці величини лежать у діапазоні від близько 2,4 м при $Z=0^\circ$ (супутник в зеніті) до більше ніж 10 м при $Z=80^\circ$ (якщо кут над горизонтом менший за 10° , спостереження, як правило, не виконують). Нехтувати залишковим впливом тропосферної затримки можна при відстані 10–15 км між референчною станцією та пересувним приймачем, оскільки вважається, що метеоумови на них практично однакові, а він дає похибку в межах декількох міліметрів.

Знайти величину тропосферної похибки можна інтерполяцією на довжину базової лінії від референчної станції до пересувного приймача. Як змінюється тропосферна похибка з відстанню та її можливий вплив, коли пересувний приймач розміщений на відстанях близько 100 км від референцних станцій, ми вирішили дослідити, використовуючи мережу станцій ZAKPOS [8]. Вихідними даними слугували добові тропосферні файли з кожної станції мережі за період один тиждень. Добову зміну тропосферної затримки ілюструє графік, що наведений на рис. 3.

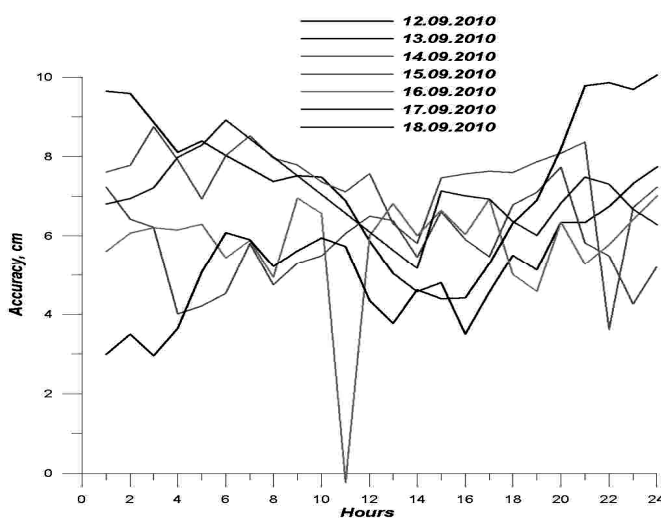


Рис. 3. Зміна тропосферної затримки референцних станцій мережі ZAKPOS

Отже, якщо відомі значення тропосферної затримки як мінімум на двох референцних станціях $P.C.1, P.C.2$, можна обчислити (проінтерполювати) її значення для місця розташування пересувного приймача ($П.П.$). Якщо в ролі пересувного приймача використати ще одну реальну референцну станцію, розміщену приблизно у створі перших двох вибраних, то можна оцінити похибку інтерполяції, а фактично, похибку залишкового впливу тропосфери на RTK вимірювання. Для цього скористаємося такою формулою:

$$\Delta\rho_{\text{троп}_{П.П.}} = \Delta\rho_{\text{троп}_{P.C.1}} + \frac{l_{P.C.1-П.П.}}{l_{P.C.1-P.C.2}} \cdot (\Delta\rho_{\text{троп}_{P.C.2}} - \Delta\rho_{\text{троп}_{P.C.1}}), \quad (6)$$

де $l_{P.C.1-П.П.}, l_{P.C.1-P.C.2}$ – відстані від референцної станції $P.C.1$ до пересувного приймача $П.П.$ та між референцними станціями $P.C.1$ і $P.C.2$ відповідно, а $\Delta\rho_{\text{троп.}}$ – значення тропосферної поправки на відповідних точках.

На підставі формули (6) ми встановили, що середній залишковий вплив тропосфери становить близько 6 см на відстанях до 100 км. Дослідження провадилися на станціях Тернопіль, Івано-Франківськ, Чернівці, Мукачеве, Великий Березний та Міжгір'я [8]. У табл. 4 наведено статистичні характеристики цього впливу.

Таблиця 4

**Значення залишкової тропосферної похибки
на референцних станціях мережі ZAKPOS**

Статистичні характеристики	Похибка тропосфери, см
<i>сер.</i>	6.4
<i>макс.</i>	11.0
<i>мін.</i>	2.3

Зазначимо, що на величину тропосферних поправок великий вплив чинять топографічні умови розміщення пунктів спостережень, температура і тиск, час доби, за яких були проведені спостереження, хмарність. Цей вид похибок має ще більше значення в гірських районах, де референцні станції, а також рухомі GNSS-приймачі розміщені на різних висотах над рівнем моря.

Іоносферна похибка. Іоносфера – це іонізований атмосферний шар у діапазоні висот 50–500 км, що містить вільні електрони. Наявність цих електронів викликає затримку поширення сигналу супутника. Для визначення числового значення іоносферної затримки потрібно знати величину TEC (Total Electron Content) – інтегральної електронної концентрації, яка становить в середньому $3 \cdot 10^{13}$ ел/см³ [2]. Величина TEC може змінюватися залежно від часу доби, сезону року тощо. Сьогодні запропоновано декілька моделей для її визначення. Однією із найпоширеніших є модель Клобушара. Розраховані за цією моделлю іоносферні затримки лежать у межах 15–150 нс, що дає в лінійній мірі поправки у псевдовідстані від 5 до 50 метрів за середньої похибки декілька метрів. Модельний спосіб обліку впливу іоносфери застосовується в основному при спостереженнях на базових лініях до 10–15 км, коли іоносферні умови проходження радіохвиль, які приймають рухомий приймач та референцна станція, практично однакові.

Різницю іоносферних впливів на референцних станціях $P.C.1, P.C.2$ можна обчислити на основі такого виразу

$$\Delta\rho_{\text{іоно}_{P.C.2-P.C.1}} \approx -\frac{1}{2} \frac{A}{f^2} \cdot \delta TEC \cdot \frac{l_{P.C.1-P.C.2}}{\cos z_{P.C.1}^I}, \quad (7)$$

де $A = 80.6 \text{ (m}^3\text{s}^{-2}\text{)}$, f – частота GPS сигналу; $z^I = \arcsin\left(\frac{r_e}{r_e + h_I} \sin z\right)$ – зенітна відстань в усередненій іоносферній поверхні; z – зенітна відстань супутника; r_e – радіус Землі; h_I – середня висота іоносфери (~ 400 км). Значення δTEC можна знайти за даними TEC на кожній референцній станції, обладнаній двочастотним приймачем, на основі залежності показника заломлення іоносфери від частоти. Тоді

$$\delta TEC = (TEC_{P.C.2} - TEC_{P.C.1}) / I_{P.C.1-P.C.2} \cdot \quad (8)$$

Щоб дослідити вплив іоносферної похибки на точність визначення координат пересувного приймача, ми із спеціальних іоносферних файлів – **Predicted Ionospheric Error IRIM**, що створюються у мережевому програмному забезпеченні GPSNet обчислювального центру мережі ZAKPOS [8], вибирали значення TEC з кожної референційної станції на період одного тижня у липні 2010 р.. Якщо в ролі пересувного приймача використати реальну референційну станцію, розміщену приблизно у створі двох вибраних за вихідні, то можна оцінити похибку інтерполяції, а, фактично похибку залишкового впливу іоносфери на RTK-вимірювання.

На основі вибраних даних та формул (7) і (8) отримано зміни іоносферної затримки, які наведені на графіку (рис. 4).

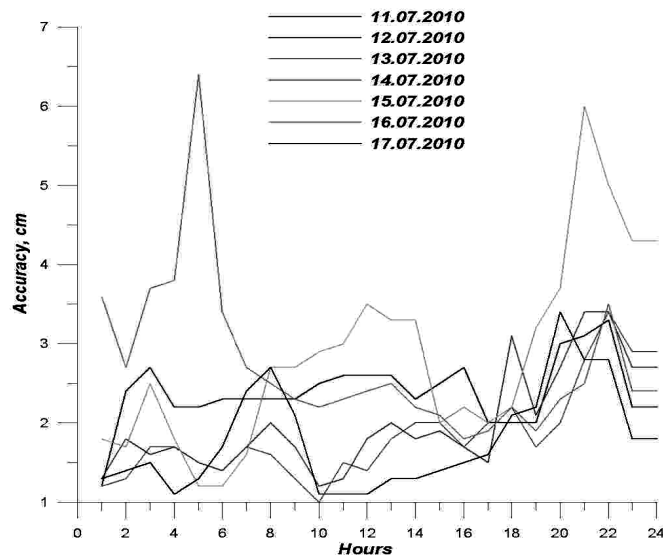


Рис. 4. Зміна іоносферної затримки референційних станцій мережі ZAKPOS

За результатами обчислень ми визначили статистичні характеристики залишкового впливу іоносфери за відстаней до 100 км. Ці характеристики наведено у табл. 5.

Таблиця 4

**Значення залишкової іоносферної похибки
на референційних станціях мережі ZAKPOS**

Статистичні характеристики	Похибка іоносфери, см
сер.	2.1
макс.	3.2
мін.	1.0

Отже, як бачимо із результатів цих досліджень, цей вид похибок має порівняно незначний вплив, хоча в окремих випадках він може бути і достатньо значущий.

Похибка багатопрохідності. Поняття “багатопрохідність” з’являється в результаті вторинного відбиття сигналу супутника від великих перешкод, розташованих у безпосередній близькості від пересувного приймача. При цьому виникає явище інтерференції, і виміряна відстань виявляється більшою за дійсну. Найпростіший спосіб уникнути цього виду похибок – це вибір максимально відкритого місця для GNSS-спостережень. Оцінити аналітично цю похибку доволі важко, а її прояв чітко виявляється під час ініціалізації та отримання фіксованого розв’язку [2].

Похибка GNSS-обладнання. Цей вид похибок зумовлений насамперед наявністю шумів у електронному тракті GNSS-приймача. Відношення сигнал/шум приймача визначає точність процедури порівняння прийнятого від супутника та опорного сигналів, тобто похибку обчислення

псевдовідстаней. Тип вибраної антени істотно впливає не тільки на можливість прийняття сигналів від супутників, але й на точність супутникових спостережень. Не менш важливим показником антен є поняття фазового центра, його положення і стабільність в часі, адже, як відомо, фазовий центр антени – це певна точка, яка не піддається геометричному вимірюванню, і від якої відраховуються усі віддалі до супутників, а положення цієї точки “прив’язується” до положення відповідної точки на пункті спостережень (до центра геодезичного пункту). Що стосується зсуву цього центра по вертикалі, то його визначають за допомогою спеціальних досліджень, переважно під час калібрування антени. Процес калібрування досить складний, а тривалість його для окремої антени становить 2–3 дні. Всю роботу виконує спеціальний робот, який перевіряє зміну фазового центра, фазові шуми, багатошляховість та інші похибки. Після завершення калібрування видається сертифікат. Великий досвід калібрувальних робіт має німецька фірма Geo++, яка спеціалізується саме на програмних продуктах для високоточного позиціонування [9]. Ефективно зменшити цей вид похибки може високоякісний двочастотний приймач.

Обчислюючи сумарну похибку на супутникові виміри, необхідно також врахувати взаємне положення користувача й супутників робочого сузір’я. Для цього вводиться спеціальний коефіцієнт геометричного погіршення точності PDOP (Position Dilution Of Precision), на який треба помножити всі перераховані вище похибки, щоб одержати результуючу похибку. Конфігурація супутників вважається доброю, якщо значення PDOP не перевищує 3, а спостереження необхідно припинити, коли PDOP більше за 6.

Висновки. Ми розглянули основні джерела похибок на супутникові RTK-вимірювання та величини їх можливого впливу на точність визначення координат пересувного приймача під час роботи у мережі референчних станцій ZAKPOS. У табл. 5 зведено основні результати наших досліджень.

Таблиця 5

Імовірнісні значення похибок супутникових RTK вимірювань

Похибка	Значення
Орбіт супутників	0.1см
Тропосфери	6.4см
Іоносфери	2.1см
Багатошляховості	мм..., м
GNSS-обладнання	мм..., 0.5 м

Зазначимо, що отримані оцінні значення похибок RTK-вимірювань стосуються відстаней від референчних станцій близько 100 км. При зменшенні відстаней між референчними станціями повинні би зменшитися і зазначені похибки.

1. Евстафьев О.В. Наземная инфраструктура ГНСС для точного позиционирования / Под. ред. В.В.Грошева. – М.: ООО “Издательство Проспект”, 2009. – 48 с. 2. Seeber G. Satellite Geodesy // Walter de Gruyter, Berlin-New-York. – 2003. – 588 с. 3. International GNSS Service: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>. 4. Trimble – Infrastructure – Trimble GPSNet Software: www.trimble.com › Infrastructure › Software/. 5. Niell, A. E., Global mapping functions for the atmospheric delay at radio wavelengths // Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No. B2, 1996. – P. 3227–3246. 6. Saastamoinen, J., Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // Geophysical Monograph, Vol. 15, 1972. – P. 247–251. 7. Hopfield, H.S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data // Journal of Geophysical Research. – 1969, Vol. 74, No. 18. – P. 4487–4499. 8. ZAKPOS – мережа референчних GPS станцій: <http://zakpos.zakgeo.com.ua/>. 9. Geo++ // GNPCV Absolute Antenna Calibration: <http://geopp.de/index.php?sprachauswahl=en&bereich=0&kategorie=34&artikel=62>.