

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОХИБОК ЕФЕМЕРИД GNSS СУПУТНИКІВ ПРИ RTK ВИМІРЮВАННЯХ У МЕРЕЖІ РЕФЕРЕНЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

Розглянуто питання оцінки точності ефемерид навігаційних супутників при RTK вимірюваннях у сучасних умовах.

**Ключові слова:** режим RTK, GNSS – спостереження, мережа активних референційних станцій, роверний приймач, бортові ефемериди, надшвидкі ефемериди.

**Постановка проблеми.** Від моменту появи технології GNSS (Global Navigation Satellite Systems) спостережень, яка дозволяла у режимі реального часу отримувати сантиметрову точність визначення координат точок земної поверхні і яка отримала назву «режим RTK» або RTK – Real Time Kinematic (початок 90-х років XX ст.), фахівці з різних організацій займаються дослідженнями, спрямованими на вивчення та врахування похибок цих спостережень. Відомо, що значення похибок спостережень при такому режимі залежать від багатьох факторів: точності визначення орбіт супутників, атмосферних умов розповсюдження сигналу від супутників, особливостей умов розташування пункту спостереження, GNSS обладнання тощо [1,2]. У даній статті розглядаються питання сучасної точності орбіт супутників та їхнього впливу на результати RTK вимірювань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Похибки положення GNSS супутника на орбіті, які в подальшому будемо вважати похибками орбіт, виникають внаслідок неточностей прогнозного розрахунку ефемерид супутників на момент вимірювань [1]. На сучасному етапі розвитку супутникових технологій позиціонування ефемериди супутників поділяють на чотири типи [7]: **Broadcast** – бортові або трансльовані, що передаються безпосередньо від GNSS 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 отримуються у центрі опрацювання IGS – International GNSS Service [7] (файли з розширенням \*.sp3). Різниця між ними полягає у часі очікування та точності. Найбільш точними є **Final** ефемериди (до 2.5 см). Цей тип ефемерид стає доступним для використання через 12-18 днів від моменту проведення спостережень. За ними йдуть **Rapid** ефемериди (від 2.5 см), і які стають доступними через 17-41 годин. Надшвидкі **Ultra-rapid** ефемериди ділять на два підтипи: отримані із спостережень (**Observed**) протягом поточного дня (на 03.00, 09.00, 15.00 і 21.00 UT) (~3 см) та прогнозовані (**Predicted**) у режимі реального часу (~5 см). Точність бортових ефемерид становить ~100 см. З наведених даних зрозуміло, що найкращим варіантом є застосування надшвидких **Ultra-rapid** ефемерид, особливо прогнозованого (**Predicted**) їх підтипу. Зазначимо, що довший час при застосуванні RTK режиму вимірювань на практиці застосовувались бортові (**Broadcast**) ефемериди, як єдиний можливий тип ефемерид у режимі реального часу, оскільки передача **Ultra-rapid** ефемерид була налагоджена порівняно недавно. Тому більшість рекомендацій з умов використання RTK режиму відносяться ще до попередніх років.

**Постановка завдання.** Дослідження з вияву впливу точності визначення ефемерид супутників при GNSS спостереженнях у режимі RTK проводились з врахуванням реального розміщення референційних станцій на території Західної України, що об'єднані у єдину мережу ZAKPOS

[5,6]. Одним із головних завдань, що вирішуються в даній роботі, є визначення впливу похибок орбіт супутників при RTK вимірюваннях у мережі станцій ZAKPOS.

**Виклад основного матеріалу.** Основна ідея RTK полягає в тому, що на базовій станції з відомими координатами – референційній станції безперервно отримують GNSS-сигнали від супутників та використовують їх для корегування даних вимірювань пересувного GNSS приймача користувача – роверного приймача або ровера. «Ідеальний» сигнал спотворюється іоносферою, тропосферою, окрім цього на нього впливають також зміни координат супутника, пов'язані з похибками параметрів визначення їх орбіт, зміщення ходу годинників супутника і приймача, багатошляховість сигналу тощо [3]. Таким чином розрахункові координати відрізняються від відомих координат референційної станції. Обчислюючи корекції, які математично «зміщують» положення такої станції на її відоме місце, застосовують ці ж корекції для роверного приймача. Якщо в ідеальному випадку референційна станція і роверний приймач знаходяться в однакових умовах, то ці корекції будуть цілком підходити до них. Найбільш важливим фактором «однаковості умов» є, звичайно, відстань між зазначеними станцією і ровером. Оскільки референційна станція і роверний приймач у загальному випадку розташовані у різних умовах, то і сигнали від супутників будуть спотворені по різному. Звідси виходить, що результати корегування можуть бути не зовсім достовірними щодо визначення положення роверного приймача. Фактори, які мають відношення до цього процесу, можуть класифікуватися по

$$\begin{aligned} \lambda\Phi_{AB}^{ps}(t) &= \lambda\Phi_{AB}^p(t) - \lambda\Phi_{AB}^s(t) = \\ &= \rho_{AB}^{ps}(t) + \left\langle \Delta\rho_{орб.АВ}^{ps}(t) - \Delta\rho_{іоно.АВ}^{ps}(t) + \Delta\rho_{трон.АВ}^{ps}(t) \right\rangle + \lambda N_{AB}^{ps}(t) + \varepsilon_{AB}^{ps}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

де члени у дужках  $\left\langle \Delta\rho_{орб.АВ}^{ps}(t) - \Delta\rho_{іоно.АВ}^{ps}(t) + \Delta\rho_{трон.АВ}^{ps}(t) \right\rangle$  є корельованими похибками подвійних фазових різниць через похибки ефемерид супутників, залишкового впливу іоносфери та тропосфери відповідно, а  $\varepsilon_{AB}^{ps}(t)$  - сумар-

різному, наприклад, як вже було зазначено, систематичною залежністю від відстані.

Розглянутий варіант стосується окремої референційної станції. Якщо таких станцій є декілька, то їх об'єднують у мережу, яка покриває територію розміщення поодиноких станцій. Такі мережі називають мережами активних референційних станцій або мережами RTK. Прикладом такої мережі і є локальна мережа референційних станцій Закарпатської обл. – ZAKPOS, яка з часом перетворилася на регіональну мережу Західної України [8].

Відмінність між звичайним RTK і мережею RTK полягає в тому, що результати корегувань об'єднуються від кількох референційних станцій з метою надання роверному приймачу більш достовірних поправок [7]. В мережі RTK поправки до положення роверного приймача інтерполюються між станціями в залежності від відстаней до них і тим самим підвищують достовірність остаточних координат.

Оцінити вплив окремих факторів на загальний результат у роверному приймачі при застосуванні мережі RTK надзвичайно складно, оскільки механізм об'єднання корегувань і інтерполяційні процедури є закритими алгоритмами від фірм, що виробляють спеціалізоване програмне забезпечення, і не доступними для вивчення. Тому ми в подальшому будемо розглядати варіант звичайної RTK на прикладі розміщення окремих референційних станцій ZAKPOS.

Нехай два приймачі  $A$  (референційна станція) і  $B$  (ровер) отримують сигнали з довжиною хвилі  $\lambda$  від супутників  $p$  і  $s$  в одну і ту ж епоху  $t$ . Тоді подвійні різниці рівнянь фазових спостережень  $\Phi$  будуть наступними

ним впливом некорельованих похибок (багатошляховості, обладнання тощо). При незначних відстанях між приймачами (10-20 км) членом у дужках  $\left\langle \right\rangle$  нехтують і рівняння подвійних фазових різниць значно спрощується.

$$\lambda\Phi_{AB}^{ps}(t) = \rho_{AB}^{ps}(t) + \lambda N_{AB}^{ps}(t) + \varepsilon_{AB}^{ps}(t) \quad (2)$$

Визначення складових рівняння (2) хоч і вимагає певних процедур та технічних прийомів, проте не є надзвичайно складною задачею. Більш принциповим є варіант нехтування членом у дужках  $\langle \rangle$  для рівняння (1).

Малі відстані між станціями (варіант нехтування є найбільш вірогідним) приводять до значного збільшення кількості референцних станцій і, як наслідок, до практичного несприйняття технології RTK у широкомасштабних задачах через високу її вартість.

Отже, при використанні референцних станцій, які забезпечують фазові виміри в режимі RTK, виникає проблема залежності частини похибок від відстані. При необхідній «теоретичній» точності у декілька см референцні станції потрібно максимально ущільнювати.

Однією із важливих похибок вважається похибка ефемерид супутників  $\Delta\rho_{orb}$ , яка безпосередньо пов'язана із типом ефемерид, що використовується при RTK вимірюваннях.

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

$$m_B = l_{AB} \times \frac{\Delta\rho_{orb}}{\rho}, \quad (3)$$

де  $l_{AB}$  – довжина базової лінії між станціями  $A$  і  $B$ ,  $\rho$  – відстань від станції на земній поверхні до супутника (біля 20000 км),  $\Delta\rho_{orb}$  – похибка ефемерид супутника.

Якщо позначити координати супутника, обчислені за остаточними (**Final**) ефемеридами, через  $x^F, y^F, z^F$ , а ті ж координати, обчислені на основі бортових (**Broadcast**) ефемерид, через  $x^B, y^B, z^B$ , то можна за їхніми різницями оцінити вплив похибок бортових ефемерид на точність визначення положення роверного приймача в залежності від довжини базової лінії  $l_{AB}$  референцна станція ( $A$ ) – ровер ( $B$ ). Аналогічним чином можна оцінити вплив похибок надшвидких (**Observed**) та (**Predicted**) ефемерид, приймаючи при цьому, що координати супутників отримані відповідно  $x^O, y^O, z^O$  та  $x^P, y^P, z^P$ . Для цього нами була створена спеціальна програма, вхідними даними до якої служили навігаційні файли, що отримуються під час GNSS спостережень, файли надшвидких ефемерид двох підтипів [7] та файли остаточних ефемерид. Останні отримували із бази даних IGS [7], їх вважали контрольними. За цими даними і обчислювалися координати супутників для  $i$ -го моменту часу. На основі отриманих координат супутників розраховувалися їх різниці на вибрані моменти часу, наприклад, для **Broadcast** ефемерид

$$\begin{aligned} \Delta x_i^B &= x_i^B - x_i^F, \\ \Delta y_i^B &= y_i^B - y_i^F, \\ \Delta z_i^B &= z_i^B - z_i^F. \end{aligned} \quad (4)$$

За отриманими різницями знаходили сумарну 3D похибку:

$$3D^B = \sqrt{(\Delta x_i^B)^2 + (\Delta y_i^B)^2 + (\Delta z_i^B)^2}, \quad (5)$$

та її середньоквадратичну похибку за добу для  $k$ -го супутника:

$$СКП_{3D^B_k} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i^B)^2 + (\Delta y_i^B)^2 + (\Delta z_i^B)^2}, \quad (6)$$

Загальна похибка для всіх супутників може бути визначена так:

$$СКП_{заг}^B = \Delta\rho_{orb}^B = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{k=1}^S \left( СКП_{3D^B_k} \right)^2} \quad (7)$$

де  $S$ - число супутників, що спостерігаються протягом доби.

Аналогічним чином поступали і для інших типів ефемерид.

На основі приведених формул (4-7) нами було розраховані загальні похибки бортових (**Broadcast**), надшвидких (**Observed**) та (**Predicted**) ефемерид протягом одного місяця (червень 2013 р.).

Зважаючи на те, що сучасне програмне забезпечення RTK може використовувати у своїй роботі як бортові ефемериди, що отримуються безпосередньо від GNSS-

потоків даних із приймачів (**Broadcast**), так і надшвидкі ефемериди, що приймаються безперервно через Інтернет (**Predicted**), ми провели статистичну вибірку отриманих 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

Статистичні характеристики	Похибки орбіт, м	
	Бортові	Надшвидкі
<i>сер.</i>	2.67	0.05
<i>макс.</i>	6.92	0.23

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. У той же час як бортові ефемериди мають набагато гірші характеристики, хоча саме вони використовувалися ще донедавно при RTK вимірюваннях.

Скориставшись даними табл. 1 ми можемо оцінити точність положення роверного приймача за формулою (3). Зважаючи на стандартні відстані між референцними станціями мережі ZAKPOS (біля 100 км), приведемо значення похибок координат роверного приймача у залежності від похибок відповідних орбіт при довжині базової лінії  $l=100$  км (табл. 2).

Таблиця 2

### Похибки координат роверного приймача (2013 р.)

Ефемериди	Статистичні характеристики	$\Delta\rho_{orb}$ , м	$m_p$ , см
Бортові	<i>сер.</i>	2.67	1.3
	<i>макс.</i>	6.92	3.5
Надшвидкі	<i>сер.</i>	0.05	0.1
	<i>макс.</i>	0.23	0.2

Із результатів 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 роверного приймача при його роботі в RTK режимі.

Для порівняння сучасного стану ефемеридного забезпечення із даними 13-ти річної давності (це той час коли розвивалася епоха RTK-вимірювань) нами були

приведені подібні розрахунки точності координат супутників на один тиждень 2000 р.

У табл. 3 представлені результати оцінки точності положення роверного приймача, враховуючи значення похибок ефемерид супутників за 2000 рік.

Як бачимо значення похибок ефемерид супутників, а, відповідно, і похибок координат роверного приймача у 2000 р. (табл. 3) перевищують аналогічні показники 2013 р. (табл. 2) практично на порядок.

## Похибки координат роверного приймача (2000 р.)

Ефемериди	Статистичні характеристики	$\Delta\rho_{orb.}$ , м	$m_p$ , 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

Для зменшення впливу цього виду похибок рекомендувалося суттєво зменшувати відстані між референсною станцією і роверним приймачем, що у багатьох випадках ставало суттєвою економічною перешкодою на шляху впровадження технології RTK у топографо-геодезичну практику.

**Висновки.** Нами апріорно розрахована точність методу RTK в залежності від точності сучасного ефемеридного забезпечення на прикладі референцих станцій ZAKPOS. Із проведених досліджень встановлено, що в середньому сучасні макси-

мальні похибки положення супутника на орбіті становлять 6.9 м (**Broadcast** ефемериди) та 0.2 м (**Predicted** надшвидкі ефемериди). Це приводить до похибки визначення координат при RTK вимірюваннях 3.5 см та 0.2 см відповідно. Дослідження показали, що найбільший вплив на точність визначення координат при RTK вимірюваннях будуть мати бортові ефемериди. При зазначених відстанях у 100 км ефемеридне забезпечення 2000 р. зовсім не забезпечувало необхідної точності RTK вимірювань.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Монография / К.М. Антонович. – Т. 1. – ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр». – 2005. – 334 с.
2. Воробьев К. А. Спутниковые ГНСС-измерения в режиме реального времени – GSMRTK / А.К. Воробьев // Геопрофи. - Вип 2. - 2008. М.: 2008. – С. 47-49.
3. Горб А. Экспериментальная оценка точности RTK-измерений / А. Горб, Р. Нежальский, Р. Федоренко, А. Нестерович // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Вип. I (15). 2008. – Львів - 2008. - С. 118-124.
4. Евстафьев О.В. Наземная инфраструктура ГНСС для точного позиционирования / О.В. Евстафьев - М.: ООО «Издательство «Проспект», 2009. - 48 с.
5. Савчук С.Г. Перша мережа активних референцих станцій в Україні ZAKPOS. Етапи встановлення та початок діяльності / С.Г. Савчук, І.І. Проданець, І.В. Калинич // Геопрофіль. Вип. I (10). 2010. К.: 2010. – С. 16-23.
6. Савчук С. Супутникова система спостережень – елемент ефективного управління земельними ресурсами / С. Савчук, І. Калинич, К. Третяк // Землевпоряд. вісн. – 2007. – № 1. –С. 37–43.
7. International GNSS Service: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.
8. Zakpos - мережа референцих GPS станцій [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://zakpos.zakgeo.com.ua>.

S.G. Savchuk<sup>1</sup>, I.V. Kalunuch<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National University "Lviv Polytechnic", 79013, Lviv, S. Bandera st., 12

<sup>2</sup> Uzhgorod National University, 88000, Uzhgorod, Universitetska st., 14

### **ASSESSMENT OF ERRORS OF EPHEMERIS GNSS SATELLITES DURING THE RTK MEASUREMENTS IN REFERENCE NETWORK**

The questions estimate the accuracy of the ephemeris navigation satellites for RTK measurements in modern conditions.

**Keywords:** Real Time Kinematic, Global National Satellite Systems, network of reference stations, rover, broadcasts ephemeris, precise ephemeris.

С.Г. Савчук<sup>1</sup>, И.В. Калинич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный университет «Львовская политехника», 79013, г. Львов, ул. С. Бендеры, 12

<sup>2</sup> Ужгородский национальный университет, 88000, г. Ужгород, ул. Университетская, 14

### **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭФЕМЕРИД GNSS СПУТНИКОВ ПРИ RTK ИЗМЕРЕНИЯХ В СЕТИ РЕФЕРЕНЦНЫХ СТАНЦИЙ**

Рассмотрены вопросы оценки точности эфемерид навигационных спутников при RTK измерениях в современных условиях.

**Ключевые слова:** режим RTK, GNSS – наблюдения, сеть активных референционных станций, роверный приемник, бортовые эфемериды, сверхскоростные эфемериды.