

УДК 621.396.98

С.М. Флерко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ІНВЕРСНИЙ DGPS/RTK РЕЖИМ СУПУТНИКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОЗИЦІОНУВАННЯ: РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень точності і надійності визначення положення в інверсному DGPS/RTK режимі супутникових технологій позиціонування. Обкреслені області практичного застосування даного режиму для підтримки рішення задач військовими споживачами

Ключові слова: інверсний DGPS/RTK режим, інформація, що коректує, дозвіл неоднозначностей, контрольна станція, що коректує, Система космічного навігаційно-тимчасового забезпечення

Вступ

Постановка проблеми. На сьогоднішній день позиціонування (визначення координат і, при необхідності, складових вектора швидкості) з використанням супутникових технологій займає ключові місця в безлічі практичних завдань діяльності людини: у військовій сфері, при сільськогосподарських роботах, веденні ГІС, кадастрових і геодезичних зйомках тощо. Це стало можливим завдяки забезпеченню унікальних характеристик точності і надійності сучасних технічних засобів і розвитку технологій виконання вимірювань. На практиці однією з найбільш поширених технологій є, так званий, відносний метод позиціонування, який за характеристиками точності підрозділяється на диференціальний режим (у англійській транскрипції *Differential GPS* або *DGPS*) і режим *real time kinematik* (RTK). У обох режимах рухомий (роверний) приймач використовує базовий ГНСС приймач, розташований в крапці з апіорі відомими координатами, як опору для коректування власних вимірювань. При цьому в DGPS режимі для отримання координатного рішення застосовуються тільки кодові вимірювання по сигналах супутників ГНСС, а в RTK режимі в обробку залучаються і високоточні фазові вимірювання.

Як показав **аналіз літератури** [1-3], підсумкова погрішність координатних рішень досягає значень менше 1 м в DGPS режимі і одиниць дециметрів і навіть сантиметрів в режимі RTK. При цьому в режимі RTK роверний приймач функціонально повинен бути здатний вирішувати задачу сумісної обробки двох достатньо великих за об'ємом потоків вимірювальних даних (власних вимірювань і вимірювань базового приймача) в темпі їх надходження (*On-the-Fly*). Підвищення функціональної здатності роверного приймача невідворотно веде до істотного збільшення його ринкової вартості, що на практиці робить технологію RTK режиму менш доступною для широкого круга користувачів. Крім того, існує цілий ряд завдань, особливо у військовій сфері, коли знання високоточних координат рухомого об'єкта в реальному часі необхідніше в центрі обробки і аналізу, чим на самому об'єкті. В зв'язку з цим метою

даної статті є теоретичне і практичне дослідження інверсного (зворотного) RTK режиму, що реалізується з використанням відносних недорогих ГНСС приймачів з виходом фазових і кодових вимірювань.

1. Методика реалізації інверсного RTK режиму

Реалізація інверсного RTK режиму потребу наявності як мінімум двох основних комплектів устаткування: базового та роверного приймачів з додатковим обладнанням. При цьому ГНСС антена базового комплекту заздалегідь встановлюється в точку з апіорі відомими координатами, а ГНСС приймач підключається по інтерфейсу RS-232 до персонального комп'ютера із спеціалізованим програмним забезпеченням. Крім того, до складу базового комплекту входить засіб прийому вимірювальних даних від рухомого ГНСС приймача – радіо- або GSM/GPRS модем. Роверний комплект складається з ГНСС приймача, ручного контролера (КПК) і модему для передачі вимірювальних даних. Схема функціонування апаратного комплексу реалізації інверсного режиму представлена на рис. 1.

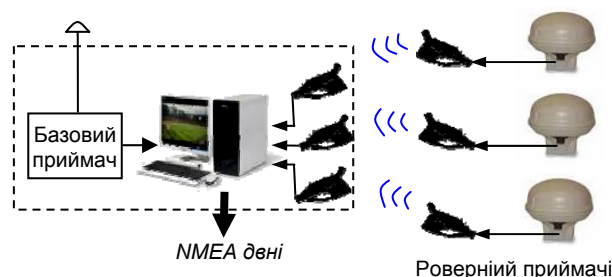


Рис. 1. Схема функціонування інверсного режиму

У основу функціонування інверсного RTK режиму покладений наступний принцип. Роверний приймач виконує вимірювання в заданих точках простору і за допомогою контролера (КПК) з модемом здійснює безперервну передачу вимірювальних даних на модем базового комплекту. До персонального комп'ютера базового комплекту підключається вихід базового ГНСС приймача, який синхронно з роверним приймачем здійснює реєстрацію і передачу

на персональний комп'ютер своїх власних вимірювань. Спеціалізоване програмне забезпечення здійснює прийом і архівацію вимірювань, а також виконує їх сумісну обробку і видає на необхідний вихід результати RTK рішення по координатах роверного приймача в стандартизованому форматі NMEA-0183. Таким чином, вирішення RTK задачі покладається не на роверний приймач, а на комп'ютер базового комплексу, що суттєво знижує вимоги до першого та знижує його вартість.

Для отримання необхідних рішень обробці піддаються другі різниці кодових і фазових вимірювань, сформовані на один і той же момент часу між вимірюваннями базового і роверного приймачів по супутниках робочого сузір'я. При цьому спочатку формуються різниці вимірювань приймачів по одних і тих же супутниках, потім один з супутників вибирається як опорний (як правило, супутник з найбільшим значенням кута місця) і з різниць вимірювань по даному супутнику віднімаються різниці вимірювань по решті всіх супутників сузір'я. Математично модель вимірювань на фіксований момент часу можна представити як:

$$\begin{cases} (\Delta\nabla P) = \Delta\nabla R + \Delta\nabla T + \frac{\Delta\nabla I}{f_1^2} + \zeta_P; \\ \lambda_1(\Delta\nabla\Phi) = \Delta\nabla R + \Delta\nabla T - \frac{\Delta\nabla I}{f_1^2} + \lambda_1\Delta\nabla N + \zeta_\Phi, \end{cases} \quad (1)$$

де $\Delta\nabla P$ і $\Delta\nabla\Phi$ – другі різниці кодових і фазових вимірювань; $\Delta\nabla R$ – геометрична інтерпретація різниць відстаней, що включає відомі координати базового приймача і невідомі координати роверного; $\Delta\nabla T$ і $\Delta\nabla I$ – залишкові значення тропосферних і іоносферних погрешностей вимірювань; ζ_P і ζ_Φ – шумові (флуктуаційні) складові погрешностей других різниць вимірювань; λ_1 – довжина хвилі сигналу в діапазоні L1 системи GPS; $\Delta\nabla N$ – невідоме значення цілочисельної невизначеності других різниць фазових вимірювань.

Результатом рішення системи (1) повинні бути значення цілочисельної невизначеності фазових вимірювань і власне поточні значення координат роверного ГНСС приймача. За наявності в робочому сузір'ї як мінімум чотирьох супутників система (1) складатиметься з трьох пар незалежних рівнянь за наявності шести невідомих – трьох координат роверного приймача і трьох значень фазової невизначеності. Вирішується система рівнянь з використанням методів Калмановської фільтрації, а в простих варіантах реалізації – методу найменших квадратів. Спрощується рішення даної системи методом накопичення вимірювань, оскільки за наявності безперервного стеження за фазою сигналів всіх супутників значення фазової невизначеності залишаються невідомими, але постійними, хоча невідомі координати роверного приймача можуть змінюватися. У супутниковому позиціонуванні це отримало назву період ініціалізації (або при зривах стеження за супутниками – реініціалізації), коли на деякому інтервалі ви-

конується накопичення вимірювань для вирішення завдання оцінки фазової невизначеності. Як правило, цей інтервал може складати значення від декількох секунд до декількох хвилин залежно від того, наскільки у вимірюваннях переважають значення залишкових погрешностей вимірювань (атмосферних і флуктуаційних). Після того, як фазова невизначеність вирішена, друге рівняння отримують в системі (1) максимальну вагу і на виході вирішального алгоритму будуть необхідні координати роверного приймача з максимально можливою точністю.

2. Апаратно-програмний склад та етапність експериментальних досліджень

Відповідно до методики реалізації інверсного RTK режиму для проведення експериментальних робіт був вибраний наступний склад апаратних і програмних засобів:

1. Базовий комплект: ГНСС приймач NovAtel DL-V3-L1L2G з антеною GPS-702GG, персональний комп'ютер типа NoteBook зі встановленим програмним забезпеченням NovAtel RTKNav і GSM/GPRS модем SimCom SIM300.

2. Роверний комплект: одночастотний ГНСС приймач NovAtel Smart-V1G (приймач і антена в одному міцному корпусі), промисловий контролер Juniper Archer з операційною системою Windows Mobile 5.0, програмним забезпеченням для передачі даних і PCMCIA GSM/GPRS модемом Enfora.

Загальний вигляд базового і роверного комплектів приведений на рис. 2.



Рис. 2. Загальний вигляд базового і роверного комплектів

Місцем проведення експериментальних робіт був вибраний Харків і його околиці. Базова станція встановлювалася на території Харківського університету радіоелектроніки з винесенням ГНСС антени

на дах будівлі. Метод вимірювання роверним приймачем – статичний (мінімум 10 точок) і кінематичний (безперервний, мінімум 5 км траєкторії). Канал зв'язку між роверними приймачами і комп'ютером з програмним комплексом RTKNav – GSM/GPRS. Протокол передачі даних – мережевою TCP/IP.

Експериментальні роботи були виконані згідно наступних етапів:

1. Попередня прив'язка місця розташування базової станції і опорних статичних точок з обробкою в післясеансному режимі.

2. Виконання серії статичних вимірювань в прив'язаних опорних точках з реалізацією інверсного RTK/DGPS режиму в проєкті програмного пакету RTKNav.

3. Реєстрація у форматі NMEA-0183 отриманих в реальному часі RTK/DGPS рішень.

4. Порівняння результатів, отриманих в реальному масштабі часу, з результатами післясеансної обробки. Розрахунок значень середнього зсуву і середньоквадратичного відхилення.

3. Результати досліджень

Прив'язка місця розташування базової станції і еталонних точок здійснювалася з використанням двохчастотних приймачів вищого класу точності з залученням станції з апіорі відомими координатами – станції KHRS Системи навігаційно-часового забезпечення України, – методом статичної супутникової зйомки. Сирі вимірювальні дані реєструвалися з інтервалом накопичення 1 раз в секунду. Обробка отриманих вимірювань виконувалася в післясеансному режимі в програмних комплексах GrafNav/GrafNet і Topcon Tools. В результаті обробки вимірювань координати всіх еталонних точок були отримані в системі координат WGS-84 з погрішностями не гірше 7 мм (СКО). Результати обробки приведені в табл. 1.

Таблиця 1
Результати обробки еталонних точок

№	Вектор, м	Рішення	Похибка, мм
1	4255.622	Good, L1 L2Fixed	0.7
2	4441.327	Good, L1 L2Fixed	1.1
3	10948.778	Good, L1 L2Fixed	6.4
4	10897.554	Good, L1 L2Fixed	5.9
5	5886.788	Good, L1 L2Fixed	5.0
6	320.806	Good, L1 L2Fixed	1.0
7	257.322	Good, L1 L2Fixed	0.8
8	5787.181	Good, L1 L2Fixed	0.7
9	3519.836	Good, L1 L2Fixed	1.0
10	1456.133	Good, L1 L2Fixed	0.8

На рис. 3 приведено територіальне розташування деяких еталонних крапок і слід еталонної траєкторії, відображені в Google Earth.

Далі в еталонних точках були виконання серії вимірювань з реалізацією інверсного RTK/DGPS режиму в проєкті програмного пакету RTKNav.

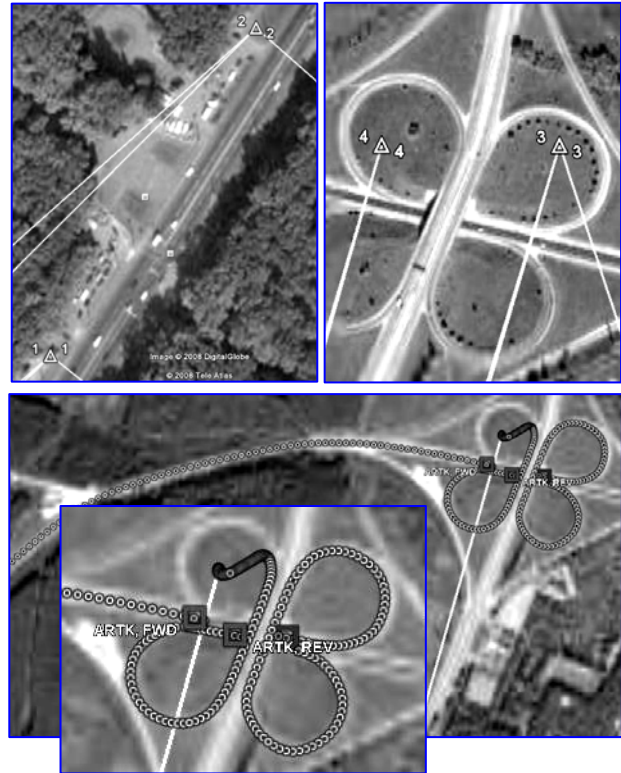


Рис. 3. Відображення в Google Earth деяких еталонних точок і елементів еталонної траєкторії

Результати координатних визначень роверних приймачів записувалися у файл реєстрації у форматі NMEA-0183 (\$GPGGA повідомлення) і згодом порівнювалися з еталонними значеннями координат. При цьому оцінювався середній зсув отриманих координат по наступних виразах:

$$\Delta_{X_{ср}} = \sum_{i=1}^K (X_i - X_{ET}) / K, \quad (2)$$

де $\Delta_{X_{ср}}$ – середні зсуви оцінок координат щодо еталонних значень (аналогічно можна записати для $\Delta_{Y_{ср}}$ і $\Delta_{Z_{ср}}$); X_i, Y_i, Z_i – значення оцінок координат, отримані в інверсному RTK режимі в i -й момент часу вимірювань; X_{ET}, Y_{ET}, Z_{ET} – еталонні координати точки, що отримані при післясеансній обробці вимірювань двохчастотних приймачів; $i = (1, K)$ – часовий відлік поточного вимірювання; K – загальна кількість RTK рішень, отриманих на інтервалі вимірювань.

За наслідками аналізу були отримані графіки зсувів оцінок координат по широті, довготі і висоті для кожної із зміряних точок. На рис. 4 і 5 приведені найбільш характерні графіки оцінок точності.

Висновки і рекомендації

Дослідження інверсного RTK режиму показали стійкі характеристики точності і надійності координатних визначень. Загальні висновки:

1. Рішення для всіх роверних приймачів в статичному режимі були отримані з погрішностями що

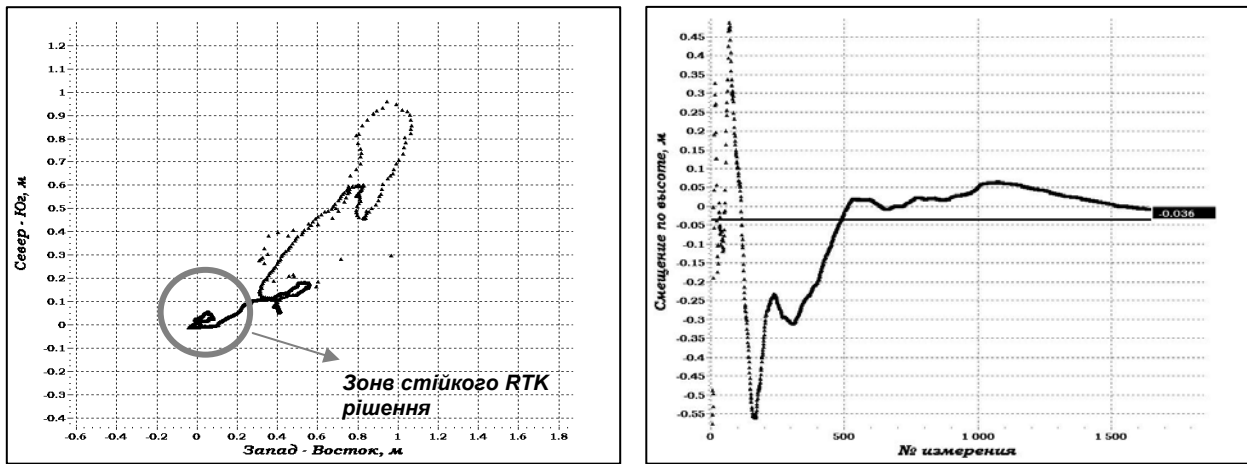


Рис. 4. Результати оцінок точності визначення координат на площині для точки 2, стійке RTK рішення отримано через 300 секунд ініціалізації

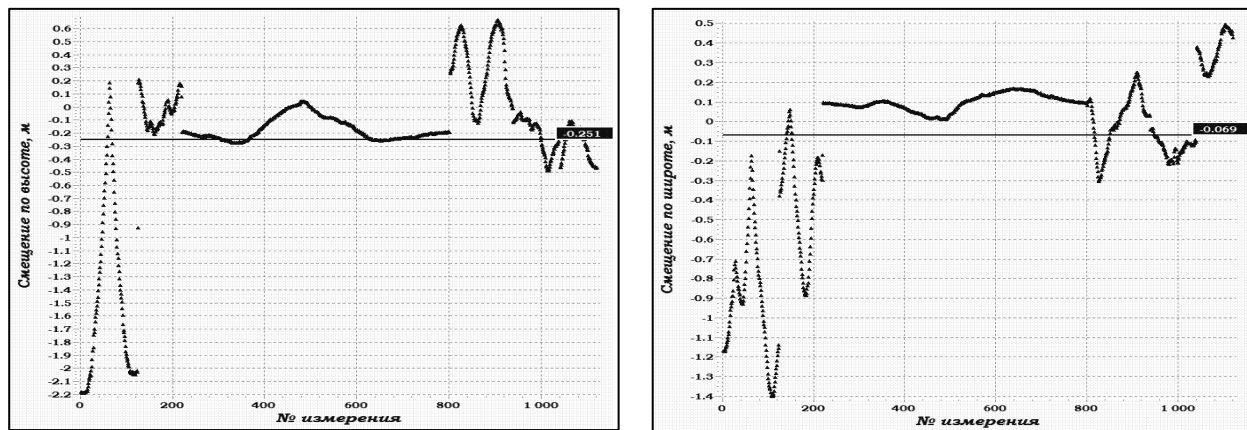


Рис. 5. Результати оцінок точності визначення координат траєкторії

не перевищують 10...20 см, при значних вимірювальних інтервалах (близько 30 хвилин) погрешності прагнули до значень 2...5 см.

2. Погрешності визначення кінематичної траєкторії не перевищили значень 20...25 см, а при зривах стеження за фазою сигналів, тобто в кодовому DGPS режимі – 50 см.

3. Час ініціалізації RTK режиму складав 100...300 секунд залежно від величини відстані до базової станції.

Такі високі характеристики точності відкривають широкі можливості практичного застосування інверсного режиму для вирішення топогеодезических завдань, рішення задач зовнішньотраєкторного контролю при випробуваннях модернізованих і нових зразків озброєння і військової техніки, виконання промірних робіт при гідрографії на морських і річкових акваторіях, при високоточному контролі рухомих об'єктів в обмежених областях простору: полігонах, морських портах, гаванях тощо, для завдань управління групою

об'єктів з боку одного провідного об'єкту (наприклад, дозаправка в повітрі або на морі) та ін.

Список літератури

1. Wubben G. *GNSS Network-RTK Today and in the Future Concepts and RTCM Standards // International Symposium on GNSS, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications*. – Berlin, Germany, 11.-14. November 2008. – 51 p.
2. Система космічного навігаційно – временно-го забезпечення України. Дополнение к эскизному проекту СКНОВ с учетом технических предложений по созданию Государственной сети мониторинга ГНСС. ОКР "Навигация". – Харьков: АО НИИРИ, 2003. – 101 с.
3. Dai L., Eslinger D., Sharpe T. *Innovative Algorithms to Improve Long Range RTK Reliability and Availability // ION NTM 2007*. – 22-24 January 2007. – San Diego, CA, USA. – 860 – 872 p.

Надійшла до редколегії 8.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Деденок, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ИНВЕРСНЫЙ DGPS/RTK РЕЖИМ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С.Н. Флерко

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований точности определения положения в инверсном DGPS/RTK режиме спутниковых технологий позиционирования. Очерчены области практического применения данного режима для поддержки решения задач военными потребителями.

Ключевые слова: инверсный DGPS/RTK режим, корректирующая информация, разрешение неоднозначностей, ко-

нтрольно корректирующая станция, Система космического навигационно-временного обеспечения.

INVERSE DGPS/RTK MODE OF SATELLITE POSITIONING: TEST RESULTS

S.N. Flerko

Theoretical and practical research results of positioning accuracy in DGPS/RTK mode are present. This mode practical applications for military task solutions are described.

Keywords: *inverse DGPS/RTK mode, differential correction, ambiguity resolution, reference station, System of space positioning & time maintenance*