

АЕРОКОСМІЧНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 621.396:621.372

**В.П. Харченко, д.т.н., проф.
В. М. Кондратюк, с.н.с.****ЗАСТОСУВАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ МЕТОДІВ
ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ
У ВИЗНАЧЕННЯХ ПОТОЧНИХ КООРДИНАТ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ**Національний авіаційний університет
E-mail: kon_vm@ukr.net

Досліджено методи, особливості, шляхи реалізації інверсного диференціального методу корекції навігаційних параметрів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем. Запропоновано апаратно-програмні засоби реалізації інверсного диференціального методу. Подано результати експериментальних досліджень.

Исследованы методы, особенности, пути реализации инверсного дифференциального метода коррекции навигационных параметров по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем. Предложены аппаратно-программные средства реализации инверсного дифференциального метода. Представлены результаты экспериментальных исследований.

Methods, features and particular ways of satellite navigation using the inverse differential method realization are investigated. The hardware-software facilities of inverse differential method implementation are proposed. The results of experiments are presented.

Постановка проблеми

Глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) GPS, ГЛОНАСС та перспективну систему нового покоління Galileo використовують майже у всіх галузях, де потрібне точне позиціонування, навігація й керування рухомими об'єктами.

Супутникові радіонавігаційні системи GPS і ГЛОНАСС у комплексі з наземними, космічними й бортовими функціональними доповненнями стають основними засобами навігації й керування рухом в авіації.

Одним із користувачів навігаційних супутникових систем є авіація. Це виражено в концепції CNS/ATM ICAO, впровадження якої дасть значні можливості розвитку, підвищення безпеки польотів, збільшення авіаційних перевезень пасажирів і вантажів з високою економічною ефективністю [1].

Для попередження зіткнень літаків та інших транспортних засобів на землі, в робочій зоні аеропорту, ICAO розроблено ряд рекомендацій (A-SMGCS – Surface Movements Guidance and Control System) з обов'язковим застосуванням в аеропортах спеціальних технічних вимог до підвищення безпеки руху в робочій зоні аеропорту [2; 3].

Вирішення завдань моніторингу й керування рухомими об'єктами в робочій зоні аеропорту, визначення поточних координат із необхідною точністю у разі великої кількості рухомих об'єктів та інтенсивної напруженості каналу

зв'язку вимагають додаткових досліджень особливостей та шляхів реалізації інверсного диференціального методу корекції навігаційних параметрів за сигналами ГНСС.

Аналіз досліджень і публікацій

Велика кількість публікацій пов'язана з визначенням точності навігаційних параметрів рухомих об'єктів за сигналами ГНСС.

Проведений аналіз теоретичного матеріалу [4; 5] та накопичений досвід теоретичних і практичних досліджень [6] показує, що вимоги до навігаційних визначень для вирішення основних завдань значно перевищують характеристики точності безпосереднього використання сигналів ГНСС. Лише під час польоту літаків на маршруті точність безпосереднього використання сигналів ГНСС може бути визнана задовільною.

Похибки навігаційних визначень споживачів у разі прямого (абсолютного) режиму вимірів із використанням сигналів GPS і ГЛОНАСС залежать від похибок, внесених системами, обумовлених поширенням радіосигналів у атмосфері, а також від похибок результатів вимірів у апаратурі споживачів.

Близькість функціональних і тактико-технічних характеристик систем GPS та ГЛОНАСС визначає однотипність і схожість за значенням складових похибок, що впливають на точність навігаційних визначень споживачів.

Похибки вимірювань поточних навігаційних параметрів (ПНП) – псевдовідстаней і псевдошвидкостей – умовно розділяють на дві групи:

- похибки, що повільно змінюються;
- похибки, що швидко змінюються (флуктуаційні).

Дані, що стосуються складових похибок навігаційних вимірювань, різні.

Значення кожного виду похибок залежать від великої кількості факторів:

- класу апаратури споживачів;
- виду вимірюваних параметрів;
- часу доби й року.

Основні джерела похибок вимірів ПНП одночастотної апаратури споживачів при використанні абсолютного режиму вимірювання наведено в табл. 1.

Дані табл. 1 свідчать про те, що основний внесок у похибки вимірів ПНП вносить група похибок, що повільно змінюються (ефемеридні, атмосферні складові), без компенсації яких неможливе задоволення вимог до точності координатно-часового забезпечення.

Внесок шумів приймача навігаційних сигналів у кодові виміри ПНП зменшують збільшенням інтервалів усереднення спостережень із використанням фази несучої.

Сумарні шумові похибки можуть становити 1,0 м у разі кодових вимірів, 3–5 мм при фазових вимірах псевдовідстаней, 0,5 см/с у разі вимірів псевдошвидкостей.

До інших джерел (табл. 1) належать похибки, спричинені:

- не урахуванням ефектів спеціальної й загальної теорії відносності;

– внеском випадкових складових показників переломлення іоносфери й тропосфери, що не перевищує одиниць сантиметрів у вимірах псевдовідстані й одиниць міліметрів за секунду у вимірах псевдошвидкості для наземних об'єктів з обмеженнями у швидкості.

Традиційний диференціальний метод вимірів за сигналами ГНСС дозволяє значно підвищити точність навігаційних визначень споживачів за рахунок компенсації похибок вимірів ПНП, що повільно змінюються, які мають значну просторово-часову кореляцію.

Баланс складових похибок споживача в абсолютному й диференціальному режимі у разі використання кодових вимірів ПНП (споживач перебуває від контрольної станції (КС) на відстані не більше 100 км) наведено в табл. 2.

Дані в табл. 2 свідчать про високу ефективність використання традиційного диференціального режиму навігаційних визначень.

Повністю компенсуються похибки у вимірах ПНП, обумовлені впливом віддалення шкал часу (ШЧ) супутників системи GPS.

Значною мірою компенсується (зменшується на порядок і більш) внесок ефемеридних похибок супутників і атмосферних похибок у вимірах псевдовідстаней.

Застосування диференціального режиму вимірів ПНП не приводить до компенсації впливу атмосферних похибок і слабо компенсує вплив похибок ефемерид супутників у вимірах псевдошвидкості.

Збільшення шумових похибок і похибок вимірів за рахунок багатопроменевого поширення навігаційних сигналів пов'язане з внеском похибок власних вимірів КС у виміри споживача.

Таблиця 1

Складові похибок вимірів для абсолютних визначень

Джерела похибок	Середньоквадратичне відхилення похибок вимірів ПНП	
	псевдовідстані, м	псевдошвидкості, см/с
Віддалення ШЧ супутників	3,0	0,1
Ефемериди	1–3	0,3
Регулярна іоносфера	2–5	0,3
Регулярна тропосфера	1–2	0,2
Багатопроменевість	1,0	0,3
Шуми приймача	1,0	0,5
Інші джерела	0,1	0,15
Сумарна похибка вимірів ПНП	4,1–7,0	0,8
Середньоквадратичне відхилення визначення місця розташування швидкості:		
планарне	6,2–10,5	0,9
вертикальне	9,0–15,4	1,76

Середньоквадратичне відхилення похибок при кодових вимірах ПНП

Джерела похибок	Абсолютний режим		Диференціальний режим	
	псевдовідстань, м	псевдошвидкість, см/с	псевдовідстань, м	псевдошвидкість, см/с
Віддалення ШЧ супутників	3,0	0,1	0,0	0,0
Ефемериди	1–3	0,3	0,01	0,0
Регулярна іоносфера	2–5	0,3	0,03	0,0
Регулярна тропосфера	1–2	0,2	0,01	0,0
Багатопрореневість	1,0	0,3	1,1–1,2	0,3
Шуми приймача	1,0	0,5	1,1	0,5
Геодезична прив'язка КС	–	–	0,01	–
Інші джерела	0,1	0,15	0,0	0,0
Сумарна похибка вимірів ПНП	4,1–7,0	0,8	1,6	0,6

Мета роботи – дослідження інверсного диференціального методу координатних вимірів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем для визначення поточних координат рухомих об'єктів у зоні аеропорту.

Координатні визначення рухомого об'єкта з застосуванням IDGPS-корекцій

Метод корекції координат, пов'язаний з прийманням поточних координат рухомого об'єкта та розрахунком диференціальних виправлень до обумовлених навігаційних параметрів, вимагає функціонування КС і рухомого об'єкта в одному робочому сузір'ї навігаційних супутників. Бажано, щоб сузір'я було оптимальним для КС та споживача. Це істотно обмежує зону дії IDGPS вимірів, тому що використання під час обчислення векторів оцінок координат КС і рухомого об'єкта різних супутників неприпустимо [7].

Під час реалізації IDGPS рухомий об'єкт (мобільний GPS приймач) передає дані місцезнаходження на автоматизоване робоче місце (АРМ) для подальшого оброблення, аналізу й відображення (рис. 1).

Дані місцезнаходження об'єкта корегуються з використанням диференціальних виправлень базової станції в реальному часі безпосередньо на АРМ, завдяки реалізації запропонованих оригінальних алгоритмів оброблення та розробленому спеціальному програмному забезпеченні (ПЗ) формування IDGPS.

В основу алгоритму формування IDGPS-корекції покладено вимоги ICAO, де псевдовідстані, виміряні та згладжені на несучій, визначаються так [2]:

$$P_{CSC_n} = \alpha P + (1 - \alpha) \left(P_{CSC_{n-1}} + \frac{\lambda}{2\pi} (\varphi_n - \varphi_{n-1}) \right),$$

де P_{CSC_n} – згладжена псевдовідстань;

α – вагова функція фільтра;

P – необроблені «сирі» виміри псевдовідстані;

λ – довжина хвилі L1;

L1 – частота GPS (1575.42 MHz \pm 10 MHz);

$P_{CSC_{n-1}}$ – попереднє значення псевдовідстані;

φ_n – фаза несучої;

φ_{n-1} – попереднє значення фази несучої.

Скорегована псевдовідстань для цього супутника на час t має такий вигляд [2]:

$$PR_{corrected} = P_{CSC} + PRC + PRC(t - tz - count) + TC + c \times (\Delta t_{sv})_{L1},$$

де PRC (pseudo-range correction) – поправка до псевдовідстані;

RRC (range rate correction) – поправки до швидкості зміни псевдовідстані;

tz-count – час прив'язки;

TC (tropospheric correction) – тропосферна корекція;

c – швидкість світла;

$(\Delta t_{sv})_{L1}$ – корекція шкали часу супутника.

Методика проведення експерименту

Оцінювання характеристик точності координатних визначень із використанням режиму IDGPS можливе у разі відповідних еталонних методах і засобах. Для цього необхідно зібрати експериментальний стенд, який складається з апаратно-програмних засобів на рухомому об'єкті (рухомий об'єкт) та на стаціонарному об'єкті АРМ (рис. 1).

На рухомому об'єкті встановлюють частину експериментального стенду, що складається з:

- антени GPS 702GG (NovAtel);
- сплітера (GPS 4-Way Splitter);
- одночастотного GPS-приймача Superstar II (SSII) (NovAtel);
- контролера (розроблення Науково-навчального центру «Аерокосмічний центр» Національного авіаційного університету);
- GSM/GPRS модема з антеною (Wavocom);
- двочастотного GPS-приймача DL-V3 (NovAtel).

У Науково-навчальному центрі «Аерокосмічний центр» створюється АРМ, що складається з:

- антени GPS 702GG;
- двочастотного GPS-приймача DL-4 (NovAtel);
- персонального комп'ютера (PC) зі спеціалізованим ПЗ формування IDGPS (власного розроблення);
- підсистеми візуалізації та інтерфейсу мережі Інтернет.

У ході експерименту необхідно з використанням приймача SSII накопичувати результати координатних визначень рухомого об'єкта як прямого розрахунку місцезнаходження так і з застосуванням режиму IDGPS у реальному масштабі часу.

Для визначення еталонної траєкторії рухомого об'єкта необхідно паралельно накопичувати «сирі» дані з двочастотного GPS-приймача DL-V3.

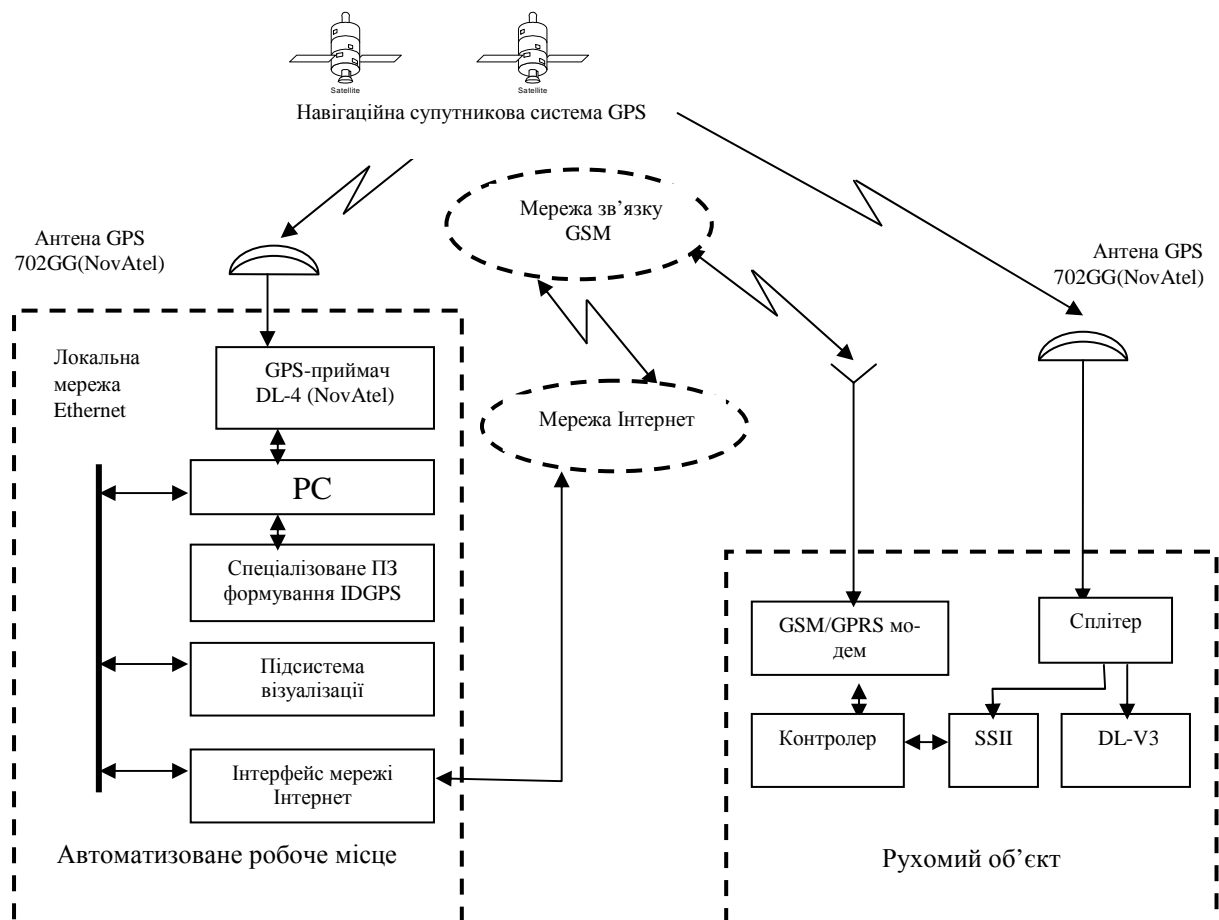


Рис. 1. Схема проведення експерименту з застосуванням режиму IDGPS

Накопичені «сирі» спостереження включають високоточні двочастотні фазові спостереження, що дозволяють з використанням аналогічного набору даних базової станції, встановленої на АРМ, оцінити статичні та кінематичні поточні координати антени SSII одно-частотного приймача, за допомогою якого виконується тестування режиму IDGPS навігаційного забезпечення.

Для побудови еталонної траєкторії та характеристик точності визначення поточних координат рухомого об'єкта необхідно використати апробоване ПЗ високоточної післясеансного оброблення GrafNav/GrafNet NovAtel/Waypoint Consulting (Канада), що забезпечить визначення еталонних координат із сантиметровою або навіть міліметровою точністю.

Для досягнення мети тестування, визначення характеристик точності координатних визначень рухомого об'єкта необхідно, щоб еталонні координати або просторові параметри руху тестованого приймача були відомі з точністю в декілька разів вищою, ніж точність засобів, що перевіряються.

Розбіжності (нев'язки) між оціненими координатами, отриманими за тестованою технологією IDGPS з використанням спеціальних алгоритмів оброблення, й еталонними координатами дозволять оцінити точність засобів місцезнаходження, що перевіряються. У цьому полягає методика тестування характеристик точності визначень поточних координат рухомих об'єктів.

Результати експерименту

У ході експерименту оцінювання характеристик точності координатних визначень рухомого об'єкта з застосуванням режиму IDGPS було проведено спостереження, що включають кінематичну зйомку.

Під час спостереження для подальшого аналізу і оброблення були записані результати поточних координат тестового приймача SSII в режимі прямого розрахунку місцезнаходження, режимі IDGPS у РМЧ.

За допомогою приймача DL-V3 записані первинні «сирі» спостереження для розрахунку еталонної траєкторії в післясеансному режимі за ПЗ GrafNav/GrafNet.

Результати експерименту (рис. 2–4) показують, що режим IDGPS дозволяє компенсувати похибки ШЧ супутників GPS, ефемеридні та атмосферні похибки супутників у вимірах псевдовідстані. Це забезпечило сумарну точність координатних визначень в межах 1–1,5 м відносно еталонної траєкторії.

Завдяки реалізації запропонованих алгоритмів формування IDGPS-корекції в апаратно-програмних засобах одержано координати рухомого об'єкта з точністю 1–1,5 м без використання додаткового каналу зв'язку для передавання диференціальних корекцій на рухомий об'єкт.

Вимоги до інверсного диференціального методу такі ж, як і до прямого диференціального методу корекції координат: забезпечення кінцевих навігаційних визначень з того самого робочого сузір'я супутників.

Висновки

1. У результаті досліджень інверсного диференціального режиму за допомогою апаратно-програмного комплексу й експериментальної оцінки характеристик точності поточних координат рухомого об'єкта визначено, що цей метод дозволяє реалізувати функції прямого диференціального режиму.

2. Результати оброблення та аналізу даних показують, що характеристики точності режиму IDGPS досягаються в межах 1–1,5 м у нормальних умовах радіовидимості GPS супутників та достатній геометрії робочого сузір'я.

3. Проведені експериментальні дослідження показали, що реалізація режиму IDGPS забезпечує характеристики точності, аналогічні прямому диференціальному режиму, але не потребує додаткового каналу зв'язку, що є досить ефективним під час диспетчеризації великої кількості рухомих об'єктів у робочій зоні аеропорту.

4. Розроблений апаратно-програмний комплекс зі спеціальним ПЗ формування IDGPS корекцій забезпечує роботу в РМЧ, а також збереження корекцій та істинних координат рухомого об'єкта в спеціальній базі даних, що дає можливість у разі необхідності післясеансного оброблення.

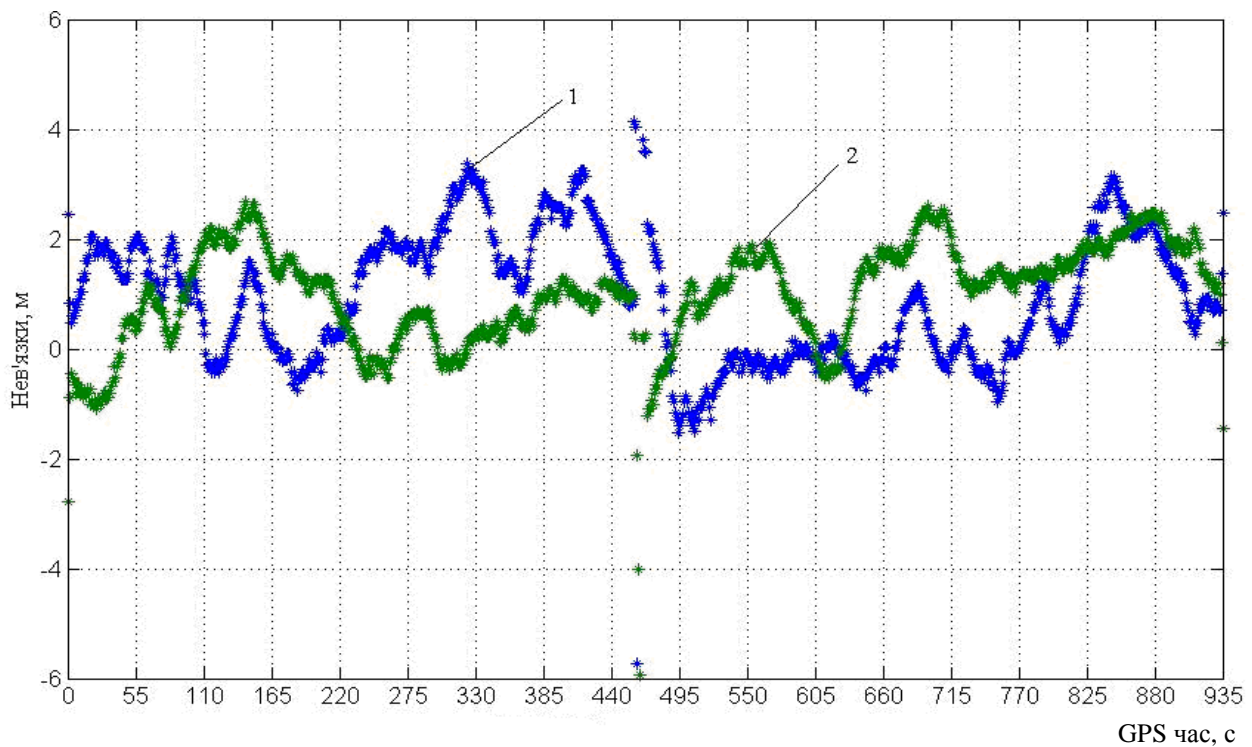


Рис. 2. Оцінка нев'язки рішення широти та довготи, отриманих за допомогою приймача SSII, відносно еталонних:
1 – широта;
2 – довгота

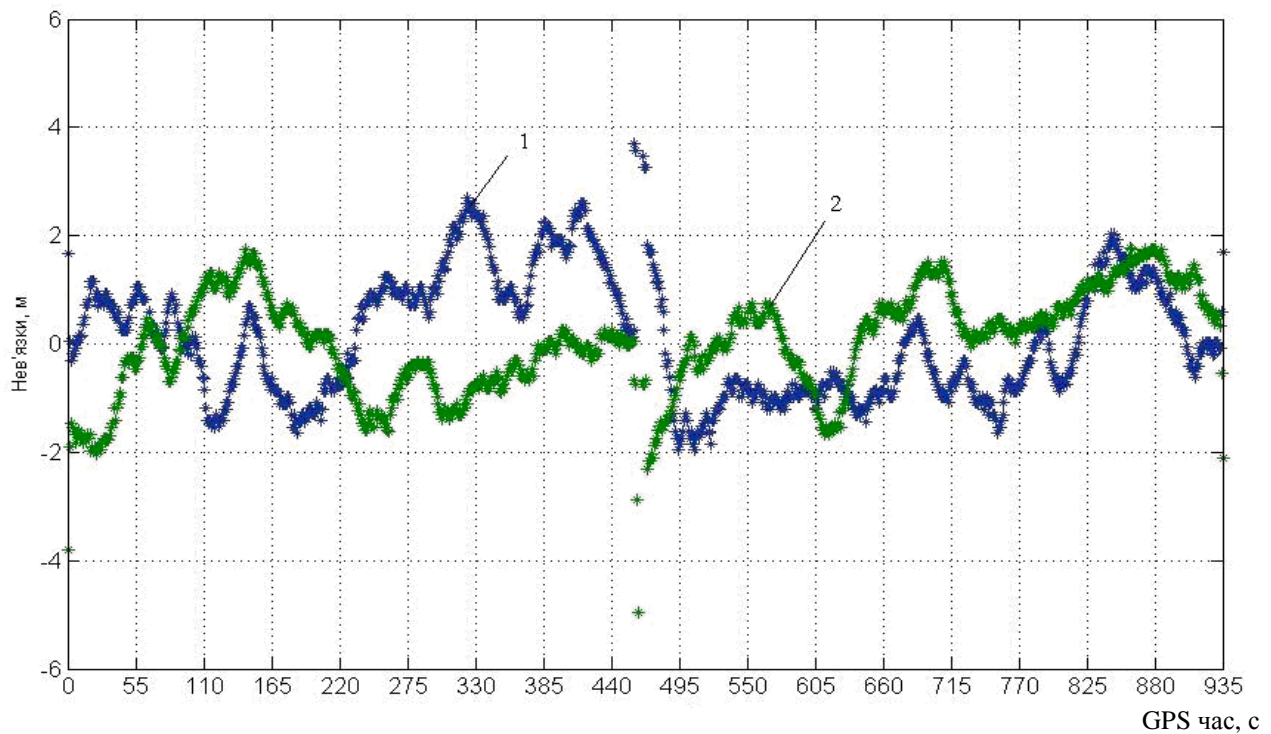


Рис. 3. Оцінка нев'язки рішення широти та довготи, отриманих за допомогою приймача SSII з використанням режиму IDGPS, відносно еталонних:
1 – широта;
2 – довгота

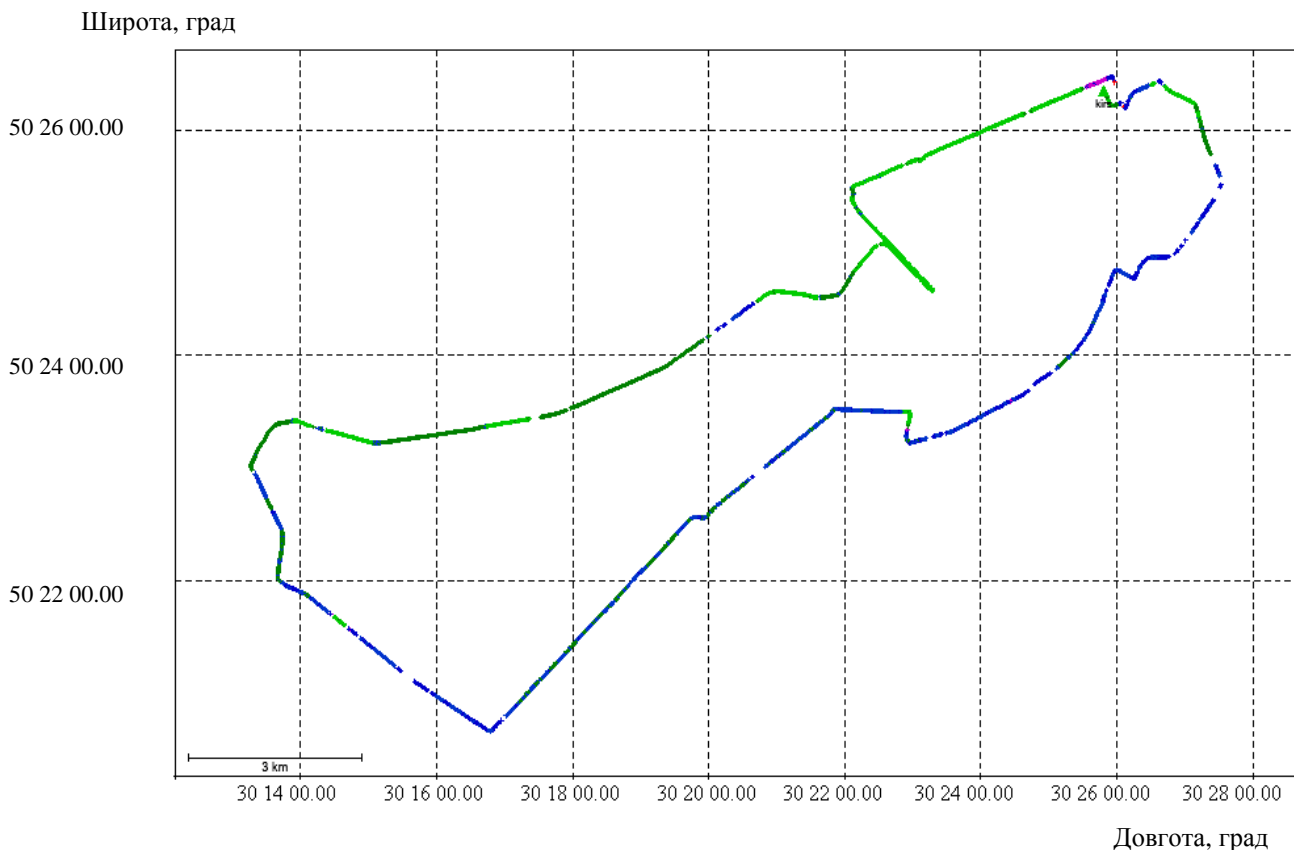


Рис. 4. Оцінка планових координат, отриманих з використанням ПЗ GrafNav/GrafNet

5. Для остаточних висновків та рекомендацій щодо застосування режиму IDGPS необхідно провести додаткові дослідження з обладнанням різних класів та різних виробників в умовах аеропорту та з використанням різних каналів зв'язку.

Література

1. *Конин В.В.* Системы спутниковой радионавигации / В.В.Конин, В.П.Харченко. – К.: Холтех, 2010. – 520 с.
2. *ICAO.* Приложение 10. Авиационная электросвязь: 6-е изд. – Т. 1. – 2006. – 606 с.
3. *ICAO.* Руководство по усовершенствованным системам управления наземным движением и контроля за ним (A-SMGCS) Doc 9830, 2004. – 100 с.
4. *ГЛОНАСС.* Принципы построения и функционирования. – 3-е изд. / под ред. А.И. Перова, В.И. Харисова. – М. : Радиотехника, 2005. – 688 с.
5. *Соловьев Ю.А.* Спутниковая навигация и ее приложения / Ю.А. Соловьев. – М.: ЭКОТRENДЗ, 2003. – 326 с.
6. *НДДКР.* Розроблення та впровадження апаратно-програмного комплексу моніторингу та управління спеціальними рухомими об'єктами / Договір №12НТ/62 (364-Х06) від 05.09.2006 р.
7. *Parkinson B.W.* Global Position System: Theory and Application / B.W. Parkinson, Jr.J. Spilker. – Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. – 793 p.

Стаття надійшла до редакції 22.04.10.