

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ЦІЛІСНОСТІ АВІАЦІЙНОЮ КОНТРОЛЬНО-КОРЕГУВАЛЬНОЮ СТАНЦІЄЮ

Національний авіаційний університет, м. Київ, e-mail: kutsenco@bigmir.net

В даній роботі представлена методика оцінки цілісності на контрольно-корегувальній станції, яка забезпечує посадку по першій категорії.

Вступ

Відповідно до концепції CNS/ATM (зв'язок навігація спостереження / організація повітряного руху) передбачається перехід до супутникової навігації, як до основного засобу навігаційного обслуговування на всіх стадіях польоту повітряного судна, включаючи посадку[1].

За даними ІКАО [2] точність (два сигма) в горизонтальній площині при заході на посадку по першій категорії метеомінімуму складає 16,0 м, а в вертикальній площині від 4,0 м до 6,0 м. Тоді як гарантована точність супутникової навігаційної системи GPS в горизонтальній площині складає 13 м, а в вертикальній 22 м.

Оскільки сама по собі супутникова навігаційна система не дозволяє здійснити посадку повітряного судна, то передбачається створення в зоні аеродрому контрольно-корегувальної станції (ККС). ККС призначена для забезпечення всіх типів заходу на посадку, посадок вилетів і наземних операцій і може забезпечувати операції на маршруті і в районі аеродрому.

ККС виконує такі функції як забезпечення локальних поправок до псевдовідстані та псевдошвидкості, забезпечення даних про ККС, забезпечення даних для кінцевої ділянки заходу на посадку, забезпечення прогнозування даних про експлуатаційну готовність навігаційного супутника та забезпечення контролю цілісності навігаційного сузір'я.

Постановка задачі

Одним з найважливіших параметрів супутникової системи посадки, наприклад, GBAS являються характеристика цілісності.

Під цілісністю мається на увазі міра певності, яка може бути закладена в вигляді показника коректності інформації, яка видається всією системою. Цілісність включає в себе здатність системи видавати користувачам своєчасні і обґрунтовані попередження, коли системи не повинна використовуватися для наміченої операції чи етапу польоту.

ККС забезпечується набір показників коректності інформації для кожної поправки до псевдовідстані. Показники коректності інформації включають в себе стандартне відхилення нормального розподілу, пов'язане з вкладом сигналу в просторі в похибку псевдовідстані σ_{pr_gnd} та параметри цілісності пов'язані з поправками до псевдовідстані $B_1 - B_4$. Дані показники передаються ККС в повідомленні типу 1.

В даній роботі представлена методика оцінки цілісності на ККС, яка забезпечує посадку по першій категорії.

Методика розрахунку

Розрахунок вищезгаданих параметрів відбувається за методикою оснований на викладках представлених в [4]. В даній методиці використовуються виміри кількох (від двох до чотирьох) навігаційних приймачів які входять до ККС. Кожна виміряна ними псевдовідстань включає в себе похибки вимірювання, що вносяться різними джерелами. Відношення між істинною відстанню між далекомірним джерелом та навігаційним приймачем та виміряною псевдовідстанню може бути представлена як:

$$PR_m^n = R_m^n + SA^n + t^n + t_m + iono^n + tropo^n + n_m^n + \varepsilon^n, \quad (1)$$

де: PR_m^n – виміряна псевдовідстань;

n – порядковий номер далекомірного джерела;

m – порядковий номер навігаційного приймача;

R_m^n – відстань між далекомірним джерелом n та навігаційним приймачем m ;

SA^n – похибка селективного доступу для n -го далекомірного джерела (на даний момент часу відсутня);

t^n – зсув годинника далекомірного джерела n ;

t_m – зсув годинника навігаційного приймача m ;

$iono^n$ – іоносферна затримка для далекомірного джерела n ;

$tropo^n$ – тропосферна затримка для далекомірного джерела n ;

n_m^n – похибка між ККС і бортовим навігаційним приймачем яка не усувається диференційною обробкою (є комбінацією теплових шумів приймача, багатопроменивості та інших);

ε^n – похибка визначення ефемерид супутника.

Середнє значення різниці між виміряною псевдовідстанню та вирахованою відстанню між навігаційним приймачем та далекомірним джерелом може бути вираховане для кожного навігаційного приймача з використанням всіх далекомірних джерел в зоні дії ККС:

$$(c\Delta t)_{m,j} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (PR_{m,j}^n - R_{m,j}^n), \quad (2)$$

де: j – індекс моменту часу;

N – кількість далекомірних джерел в зоні дії ККС.

Вираз (2) з урахуванням виміряної псевдовідстані в (1) для j -го моменту часу можна представити як:

$$(c\Delta t)_{m,j} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (R_{m,j}^n + t_j^n + t_{m,j} + iono_j^n + tropo_j^n + n_{m,j}^n + \varepsilon_j^n - R_{m,j}^n). \quad (3)$$

З урахуванням того, що зсув годинника навігаційного приймача t_m однаковий для кожної з виміряних псевдовідстаней, а також скорочення відстані між далекомірним джерелом та навігаційним приймачем R_m^n , вираз (3) можна представити у вигляді:

$$(c\Delta t)_{m,j} = t_{m,j} + \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (t_j^n + iono_j^n + tropo_j^n + n_{m,j}^n + \varepsilon_j^n)}_{\Delta T_{m,j}} = t_{m,j} + \Delta T_{m,j}. \quad (4)$$

$(c\Delta t)_{m,j}$ може бути використане при визначенні параметру $Z_{m,j}^n$. Даний параметр подібний до поправки псевдовідстані і розраховується наступним чином:

$$Z_{m,j}^n = PR_{m,j}^n - R_{m,j}^n - (c\Delta t)_{m,j}. \quad (5)$$

Використовуючи вирази (1) та (4), параметр $Z_{m,j}^n$ можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} Z_{m,j}^n &= (PR_{m,j}^n - R_{m,j}^n + t_j^n + t_{m,j} + iono_j^n + tropo_j^n + n_{m,j}^n + \varepsilon_j^n) - (R_{m,j}^n) - (t_{m,j} + \Delta T_{m,j}) = \\ &= t_j^n + iono_j^n + tropo_j^n + n_{m,j}^n + \varepsilon_j^n - \Delta T_{m,j}. \end{aligned} \quad (6)$$

Зсув годинника далекомірного джерела t^n може бути визначений за даними ефемерид котрі передаються з далекомірного джерела. Методика визначення зсуву годинника далекомірного джерела описана в [2] та [3]. При відніманні t^n від $Z_{m,j}^n$ отримаємо параметр $Zc_{m,j}^n$ котрий має вигляд:

$$Zc_{m,j}^n = Z_{m,j}^n - t^n = iono_j^n + tropo_j^n + n_{m,j}^n + \varepsilon_j^n - \Delta T_{m,j} - \Delta t_j^n, \quad (7)$$

де Δt_j^n – залишкова похибка яка виникає в наслідок неточності визначення зсуву годинника далекомірною джерела. Середнє значення параметру $Zc_{m,j}^n$ для всіх навігаційних приймачів ККС $\overline{Zc}_{m,j}^n$ можна знайти за виразом:

$$\overline{Zc}_{m,j}^n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (Zc_{m,j}^n), \quad (8)$$

де M – це кількість навігаційних приймачів ККС. З урахуванням (7) даний вираз можна записати як:

$$\overline{Zc}_{m,j}^n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (iono_j^n + tropo_j^n + n_{m,j}^n + \varepsilon_j^n - \Delta T_{m,j} - \Delta t_j^n). \quad (9)$$

Оскільки, навігаційні приймачі знаходяться на порівняно невеликій відстані один від одного, то похибки $iono_j^n$, $tropo_j^n$, ε_j^n і Δt_j^n є спільними для всіх навігаційних приймачів. Таким чином вираз (9) можна записати у вигляді

$$\overline{Zc}_{m,j}^n = iono_j^n + tropo_j^n + \varepsilon_j^n - \Delta t_j^n + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (n_{m,j}^n - \Delta T_{m,j}). \quad (10)$$

Віднімемо середнє значення $\overline{Zc}_{m,j}^n$ від параметру $Zc_{m,j}^n$:

$$Zcm_{m,j}^n = Zc_{m,j}^n - \overline{Zc}_{m,j}^n. \quad (11)$$

З урахуванням (7) та (10) даний вираз набуває вигляду:

$$Zcm_{m,j}^n = (iono_j^n + tropo_j^n + n_{m,j}^n + \varepsilon_j^n - \Delta T_{m,j} - \Delta t_j^n) - \left(iono_j^n + tropo_j^n + \varepsilon_j^n - \Delta t_j^n + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (n_{m,j}^n - \Delta T_{m,j}) \right). \quad (12)$$

Як видно з виразу іоносферна, тропосферна похибки, а також похибки які вносяться самим далекомірним джерелом скорочуються. Отже вираз (11) набуває вигляду:

$$Zcm_{m,j}^n = n_{m,j}^n - \Delta T_{m,j} - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (n_{m,j}^n - \Delta T_{m,j}). \quad (13)$$

$Zcm_{m,j}^n$ містить некорельовані похибки вимірювання такі як: багатопроменевість проходження сигналу, інтерференцію сигналу, теплові шуми та зсув годинника навігаційного приймача. Дані похибки власне і являють собою так званий вклад ККС в похибку визначення псевдовідстані. Таким чином для кожного з навігаційних приймачів можна знайти середнє значення і дисперсію $Zcm_{m,j}^n$ для J вимірів псевдовідстані, які зроблені протягом вибраного проміжку часу:

$$\begin{aligned} \overline{Zcm}_m^n &= \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (Zcm_{m,j}^n), \\ \sigma_m^n &= \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (Zcm_{m,j}^n - \overline{Zcm}_m^n)^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Максимальне значення σ_m^n і буде являтися шуканим значенням σ_{pr_gnd} для вибраного далекомірного джерела:

$$\sigma_{pr_gnd} = \text{MAX}(\sigma_m^n), \quad (15)$$

де MAX означає максимальне значення. Також за допомогою параметра $Zcm_{m,j}^n$ можна визначити середньоквадратичне значення вкладу ККС в похибку скоректованої псевдо відстані

$$\text{RMS}_{pr_gnd} = \text{MAX} \left(\sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (Zcm_{m,j}^n)^2} \right). \quad (16)$$

Величина RMS_{pr_gnd} не повинна перевищувати величини яка визначається за виразом:

$$\text{RMS}_{pr_gnd} \leq \sqrt{\frac{\left(a_0 + a_1 e^{-\Theta_n / \Theta_0} \right)^2}{M}} + (a_2)^2 \quad (17)$$

де, Θ_n – кут місця для далекомірного джерела n ;

a_0 , a_1 , a_2 і Θ_0 – параметри, визначені в таблиці 1 для кожного з визначених показників точності ККС.

Таблиця 1

Вимоги ІКАО до точності ККС-GPS

Літерне позначення показника точності ККС	Θ_n градуси	a_0 метри	a_1 метри	Θ_0 градуси	a_2 метри
A	≥ 5	0,5	1,65	14,3	0,08
B	≥ 5	0,16	1,07	15,5	0,08
C	> 35	0,15	0,84	15,5	0,04
	5-35	0,24	0	-	0,04

Параметри $B_1 - B_4$ для даного далекомірного джерела являють собою різниці між поправкою до псевдовідстані, яка отримана з використанням всіх навігаційних приймачів та поправкою до псевдовідстані, яка отримана при виключенні з розрахунку навігаційного приймача з відповідним порядковим номером.

На кафедрі аеронавігаційних систем Національного авіаційного університету був поставлений експеримент з визначення середньоквадратичного значення вкладу ККС в похибку скоректованої псевдовідстані RMS_{pr_gnd} . Для цього було використане наступне навігаційне обладнання. Навігаційний приймач Novatel ProPak-LB plus та навігаційний приймач Novatel ProPak-V3. Дані прилади є геодезичними навігаційними приймачами які працюють з сигналами навігаційної супутникової системи GPS. Навігаційні приймачі підключалися до персонального комп'ютера по інтерфейсу RS-232 (COM). На персональному комп'ютері було встановлене програмне забезпечення Novatel CDU (версії 3.4.0), за допомогою якого відбувалося налаштування навігаційних приймачів та збереження даних отриманих під час експерименту.

Виміри кодової псевдовідстані, які виконувались один раз в секунду, та ефемериди далекомірних джерел отримані навігаційними приймачами були збережені в файли. Потім отримані файли були опрацьовані за допомогою розробленого, згідно розглянутої вище методики, програмного забезпечення. Дане програмне забезпечення функціонує в середовищі GNU OCTAVE (версії 3.0.3). Дане середовище є програмним продуктом для здійснення математичних розрахунків та проведення моделювання, що розповсюджується з відкритим кодом. Згідно з алгоритмом розробленого програмного забезпечення спочатку для кожної часової епохи за виразом (2) розраховується параметр $c\Delta t$. Потім для вибраного далекомірного джерела визначається інтервал часу на якому буде відбуватися усереднення за часом. На

даному інтервалі для кожного навігаційного приймача за виразом (11) визначається параметр $Z_{ст}$ для даного виміру в вибраному часовому інтервалі. Потім для вибраного часового інтервалу розраховуються значення RMS_{pr_gnd} для кожного з навігаційних приймачів, і вибирається максимальне з них.

Результати розрахунку

Результати роботи програмного забезпечення для всіх навігаційних супутників GPS які на час проведення експерименту знаходились в зоні видимості навігаційних приймачів показані на рис. 1, рис. 2 та рис. 3.

На даних рисунках представлена залежність визначеної в ході експерименту RMS_{pr_gnd} від кута місця далекомірного джерела для GPS супутників з номерами 17, 20, 22 (рис. 1), 23, 31, 32 (рис. 2) та 11, 14, 19 (рис. 3). Плавними кривими на малюнку позначені максимально допустимі величини RMS_{pr_gnd} для ККС з літерними показниками точності А В і С. Дані величини розраховані за виразом (17) та даними з таблиці 1.

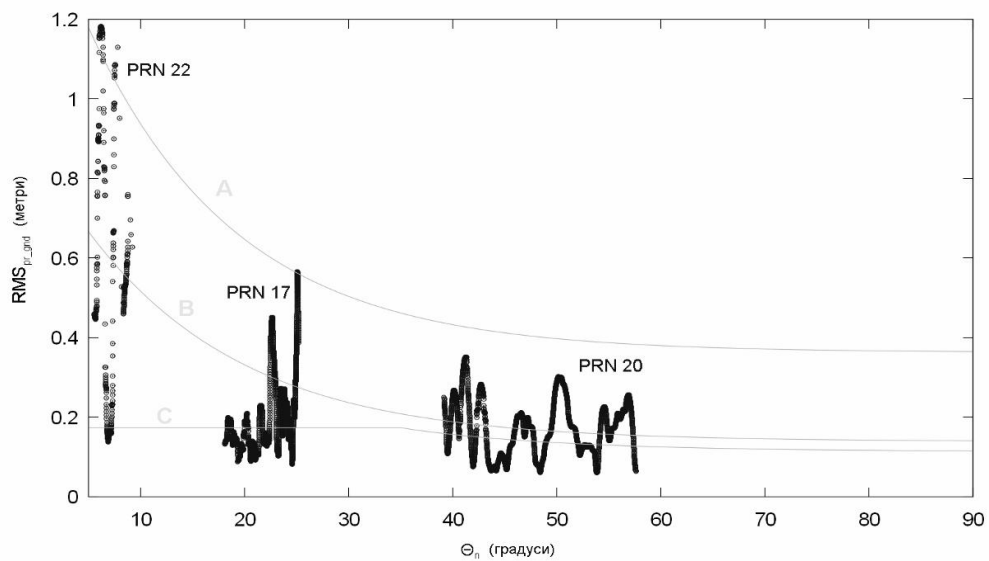


Рис. 1 Результати розрахунку RMS_{pr_gnd} для супутників GPS з номерами 17, 20 та 22.

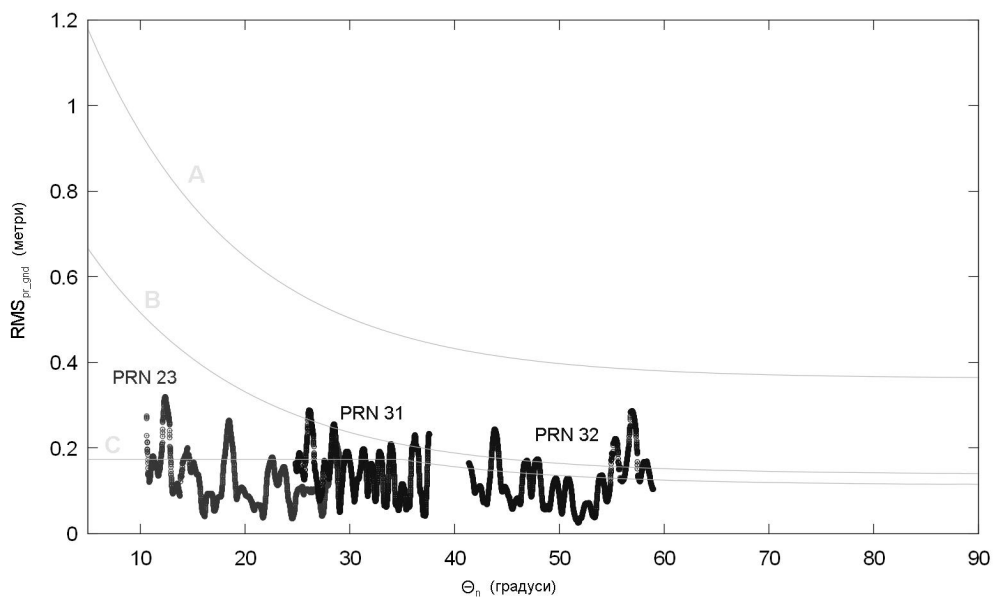


Рис. 2 Результати розрахунку RMS_{pr_gnd} для супутників GPS з номерами 23, 31 та 32.

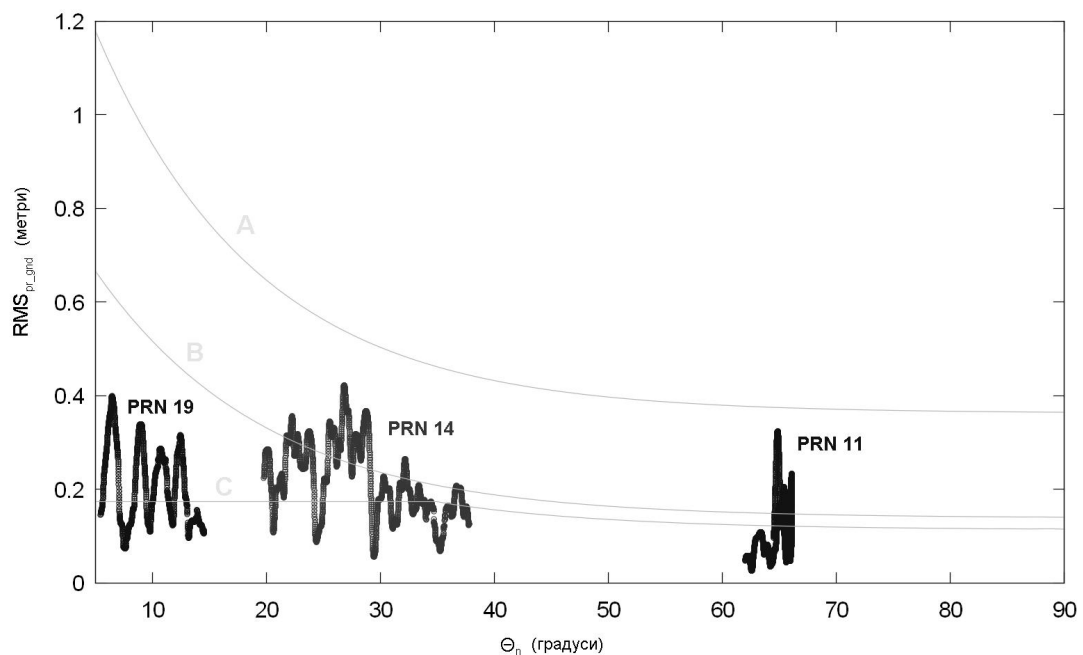


Рис. 3 Результати розрахунку RMS_{pr_gnd} для супутників GPS з номерами 11, 14 та 19.

Висновки

Як видно за результатами експерименту середньоквадратичне значення вкладу ККС в похибку скоректованої псевдовідстані для всіх GPS супутників окрім номерів 17 і 22 відповідає показнику точності А для ККС що складається з двох навігаційних приймачів. Значення даного параметру для GPS супутників з номерами 17 і 22 дещо перевищує задану межу. Це можна пояснити високим рівнем перешкод при порівняно низьких кутах місця далекомірного джерела, оскільки експеримент проводився в міських умовах. Таким чином використовувати супутники з номерами 17 і 22 для розрахунку координат не рекомендується. В цілому можна зазначити, що розраховані параметри збігаються з визначеними ІКАО теоретичними розрахунками. І таким чином розглянуту методику доцільно використовувати для визначення показників коректності інформації авіаційної контрольно-корегувальної станції.

Список літературних джерел

1. Бабак В.П., Конін В.В., Харченко В.П. Супутникова радіонавігація. – К.: Техніка, 2004. – 328 с.
2. ICAO Приложение 10 Авиационная электросвязь том 1 шестое издание, 2006. – 606 с.
3. Navstar global positioning system interface specification draft is-gps-800, 2006 – 133 p.
GBAS Operational Validation PEGASUS MARS Development MARS3 Technical Note for PEGASUS, 2006 – 102 p.

Ключові слова: CNS/ATM, контрольно-корегувальна станція, характеристика цілісності.