

# ТОЧНІСТЬ НАЗЕМНОГО ОБЛАДНАННЯ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ ПОСАДКИ

Конін В.В., Куценко О.В.  
Національний авіаційний університет  
(Україна)

**Вступ.** Безпека та ефективність польотів повітряних суден значним чином залежить від систем зв'язку, навігації, спостереження / організації повітряного руху (CNS/ATM), в яких навігація є однією з основних функцій. В роботі досліджуються основні складові функції навігації, а саме система посадки повітряних суден з використанням глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS).

**Актуальність досліджень.** До нових основних вимог, які висувуються в навігації – це широке використання глобальної системи супутникової навігації GNSS для всіх стадій польоту з метою забезпечення основної економічної переваги систем CNS/ATM, а саме: виводу з експлуатації матеріалоємної частини існуючої навігаційної системи. Етапу посадки повітряного судна приділяється особлива увага, як одному з найбільш небезпечних етапів польоту повітряного судна.

**Постановка задачі.** Відповідно до [2] супутникова система посадки складається з навігаційних супутників GNSS, а також з наземної та бортової підсистем. Наземна підсистема складається з кількох (від двох до чотирьох) опорних навігаційних приймачів апаратури передачі даних на бортову підсистему та контрольну апаратуру.

Характеристики точності обладнання наземної підсистеми визначаються показником точності наземного обладнання. Показник точності складається з літерного та цифрового значення. Літерне значення характеризує точність опорних навігаційних приймачів які використовуються в наземній підсистемі, і визначається в [3] наступним чином:

- А – визначає стандартно досягну точність яка досягається з використанням зазвичай наявних навігаційних приймачів та помірних технологій придушення багатопроменевості.
- В – визначає покращену точність яка досягається з використанням високоточних сучасних приймачів та кращих технологій придушення багатопроменевості.
- С – визначає точність що узгоджується з останніми науковими розробками в виробництві навігаційних приймачів та технологій придушення багатопроменевості.

Цифрове значення являє собою кількість опорних навігаційних приймачів, які використовуються в наземній підсистемі.

Визначення точності в наземній підсистемі відбувається за допомогою порівняння між собою даних кожного з опорних приймачів наземної підсистеми супутникової системи посадки. Під даними мається на увазі ефемериди навігаційних супутників та згладжені по псевдофазі кодові псевдовідстані з усіх опорних навігаційних приймачів наземної підсистеми. Згладжені псевдовідстані містять похибки які визначаються в [3] як:

$$PR_m^n = R_m^n + SA^n + t^n + t_m + \text{iono}^n + \text{tropo}^n + n_m^n + \varepsilon^n$$

де:  $n$  - порядковий номер навігаційного супутника;

$m$  - порядковий номер опорного навігаційного приймача;

$PR_m^n$  - Псевдовідстань від навігаційного супутника  $n$  до опорного навігаційного приймача  $m$ ;

$R_m^n$  - Відстань від навігаційного супутника  $n$  до опорного навігаційного приймача  $m$ ;

$SA^n$  - Похибка яка може бути внесеною навмисно в дані навігаційного супутника  $n$  з метою обмеження доступу до навігаційної системи;

$t^n$  – зсув шкали часу навігаційного супутника  $n$ ;

$t_m$  – зсув шкали часу опорного навігаційного приймача  $m$ ;

$iono^n$  – іоносферна затримка для навігаційного супутника  $n$ ;

$tropo^n$  – тропосферна затримка для навігаційного супутника  $n$ ;

$n_m^n$  – похибка між наземною і бортовою підсистемами супутникової системи посадки, яка не усувається диференційною обробкою (є комбінацією теплових шумів приймача, багатопроменевості та інших);

$\varepsilon^n$  – похибка визначення ефемерид та розрахунку координат навігаційного супутника.

Маючи координати навігаційних супутників розраховані за ефемеридами та попередньо визначені точні координати опорних навігаційних приймачів можна визначити відстань між даними навігаційним супутником та опорним приймачем, за виразом:

$$R_m^n = \sqrt{(X^n - X_m)^2 + (Y^n - Y_m)^2 + (Z^n - Z_m)^2},$$

де:  $X^n, Y^n, Z^n$  - координати навігаційного супутника в системі координат ECEF;

$X_m, Y_m, Z_m$  - попередньо визначені координати опорного навігаційного приймача в системі координат ECEF.

Корекція між даними навігаційним супутником та опорним навігаційним приймачем визначається як:

$$PRCt_m^n = PR_m^n - R_m^n = SA^n + t^n + iono^n + tropo^n + \varepsilon^n + n_m^n + t_m.$$

Дана корекція містить в собі похибки які умовно можна розділити на дві групи: Похибки спільні для бортової і наземної підсистем GBAS  $SA^n + t^n + iono^n + tropo^n + \varepsilon^n$  та похибки окремі для бортової і наземної підсистем GBAS  $n_m^n + t_m$ .

Далі необхідно визначити наближене значення зсуву шкали часу опорного навігаційного приймача яка є спільною для всіх навігаційних супутників для даного приймача. В [3] вважається що даний параметр з достатньою достовірністю можна отримати за виразом

$$\tilde{\tau}_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N PRCt_m^n,$$

де:  $N$  - це кількість навігаційних супутників в зоні видимості наземної підсистеми.

Потім необхідно виключити з кожної з корекцій між даними навігаційним супутником та опорним навігаційним приймачем визначених вище отримане наближене значення зсуву шкали годинника опорного навігаційного приймача

$$PRC_m^n = PRCt_m^n - \tilde{\tau}_m.$$

Далі розраховується параметр  $Z_m^n$  який визначаються як різниця між корекціями до псевдовідстаней, між даними навігаційним супутником та опорним навігаційним приймачем з урахуванням зсуву шкали часу опорного навігаційного приймача  $PRC_m^n$  та середнім значенням даної корекції, по опорним приймачам, але без урахування даних опорного навігаційного приймача для якого розраховується параметр

$$Z_m^n = PRC_m^n - \frac{1}{M-1} \sum_{\substack{m=1, \\ m \neq n}}^M PRC_m^n.$$

Параметр  $Z_m^n$  містить не корельовані похибки, а саме багатопроменевість, інтерференцію, теплові шуми, а також залишкову похибку визначення зсуву шкали часу опорного навігаційного приймача, що власне і складає вклад наземної підсистеми в похибку скоректованої псевдовідстані.

Далі відбувається статистична обробка часової вибірки параметру  $Z_m^n$  для кожного з опорних навігаційних приймачів, а саме знаходження середнього квадратичного значення за виразом

$$RMS_{pr\_gnd}^n = \text{MAX} \left( \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (Z_{cm_{m,j}}^n)^2} \right) \quad (1)$$

де:  $J$  - кількість вимірів в часовій вибірці даних;  
 $j$  - індекс значення параметру в часовій вибірці.

Тривалість часової вибірки відповідно до [3] складає 200 сек. Поки буфер даних повністю не заповнений дані не обробляються. Для подальшої обробки вибирається максимальне значення з усіх опорних навігаційних приймачів

Відповідно до [2] Величина  $RMS_{pr\_gnd}^n$  не повинна перевищувати величини яка визначається за виразом:

$$RMS_{pr\_gnd}^n \leq \sqrt{\frac{\left( a_0 + a_1 e^{-\Theta_n / \Theta_0} \right)^2}{M}} + (a_2)^2 \quad (2)$$

де,  $\Theta_n$  – кут місця для навігаційного супутника  $n$  в градусах;

$a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  і  $\Theta_0$  – параметри, визначені в Таблиці 1 для кожного з визначених показників точності наземної підсистеми GBAS.

Таблиця 1 - Параметри надані ІКАО для визначення показника точності наземної підсистеми GBAS

Літерне значення показника точності наземної підсистеми GBAS	$\Theta_n$ (градуси)	$a_0$ (метри)	$a_1$ (метри)	$\Theta_0$ (градуси)	$a_2$ (метри)
A	$\geq 5$	0,5	1,65	14,3	0,08
B	$\geq 5$	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

Якщо для якогось з навігаційних супутників розраховане значення  $RMS_{pr\_gnd}^n$  перевищує максимально допустиме значення для вибраного показника точності наземного обладнання, то дані такого навігаційного супутника в ефір не передаються.

**Результати досліджень.** Описана вище методика була перевірена експериментально. При проведенні експерименту було використане обладнання Експериментального комплексу моніторингу глобальних навігаційних супутникових систем що знаходиться а ННЦ «Аерокосмічний центр» НАУ [4]. В якості опорних навігаційних приймачів була використана апаратура виробництва фірми Novatel (Канада) п'ятого покоління. Було використано два одно частотних навігаційних приймачі, на яких був здійснений сеанс запису даних тривалістю дев'ять годин. За отриманими експериментальними даними були визначені значення  $RMS_{pr\_gnd}^n$  відповідно до виразу (1). Потім був визначений показник точності для кожного з видимих навігаційних супутників за максимально допустимими значеннями визначеними за виразом (2).

Залежність експериментально визначених та максимально допустимих значень  $RMS_{pr\_gnd}^n$  від кута місця навігаційного супутника представлена на Рисунку 1а. На Рисунку 1б представлені треки навігаційних супутників.

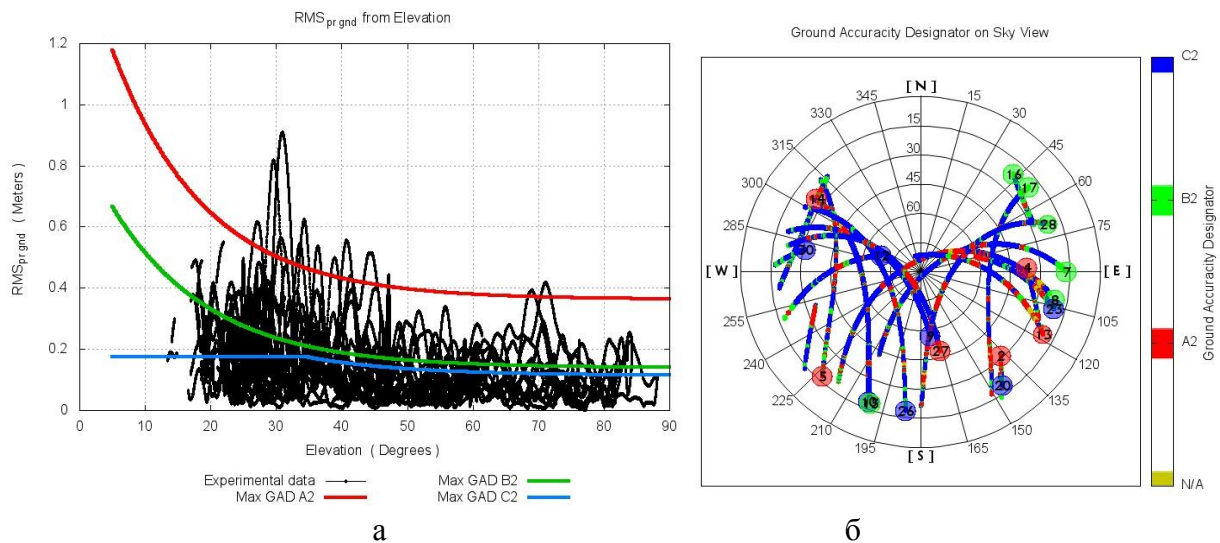


Рисунок 1 – Результати експериментальної оцінки точності наземного обладнання

Трек навігаційного супутника являє собою траєкторію руху навігаційного супутника відносно місця розташування наземного обладнання в координатах азимут / кут місця. Колір треку показує максимально досяжний показник точності наземного обладнання протягом руху навігаційного супутника. Даний колір збігається з кольором графіків показаних на Рисунку а. Також вказані номери навігаційних супутників.

**Висновки.** За результатами експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки. Загалом, характер зміни експериментально визначеного значення параметру  $RMS_{pr\_gnd}^n$  відносно кута місця навігаційного супутника в цілому відповідає теоретичним викладкам представленим в [2]. Проте присутні короточасні викиди значення даного параметру. При цьому дані викиди залежать не тільки від кута місця навігаційного супутника, а і від його азимуту. Даний ефект можна пояснити тим, що досліджуваний параметр містить в собі не корельовані між опорними навігаційними приймачами похибки, зокрема теплові шуми, та багатопроменевість розповсюдження сигналів від навігаційних супутників. Негативний ефект від зумовлений даними проблемами можна зменшити покращивши умови встановлення антен опорних навігаційних приймачів, та використання апаратури більш високої якості. Загалом можна зробити висновок про адекватність представленої методики контролю точності наземного обладнання та доцільності її використання при оцінці якості супутникових систем посадки повітряних суден.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Конин В.В. Харченко В.П. Системы спутниковой навигации / В.В. Конин, В.П. Харченко .- К. Холтех, 2010. – 250 с.
2. ICAO Приложение 10 Авиационная электросвязь том 1 шестое издание, 2006. – 606 с.
3. RTCA DO - 245A MINIMUM AVIATION SYSTEM PERFORMANCE STANDARDS FOR THE LOCAL AREA AUGMENTATION SYSTEM (LAAS) 2004. - 226 с.
4. Сайт ННЦ «Аерокосмічний центр» НАУ [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://www.asc.nau.edu.ua>