

УДК 621.396.933: 629.763 (045)

О.П. Сушич, к.т.н., доц.
І.А. Приходько, асист.

МОДЕЛЮВАННЯ РИЗИКУ ВТРАТИ ЦІЛІСНОСТІ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ GALILEO

Національний авіаційний університет
E-mail: ans@nau.edu.ua

Наведено метод оцінки цілісності Європейської супутникової навігаційної системи Galileo. Розглянуто експериментальні результати моделювання ризику втрати цілісності Galileo.

The analysis of integrity assessment method of European satellite navigation system Galileo and experimental results of Galileo integrity risk modeling are presented.

Приведен метод оценки целостности Европейской спутниковой навигационной системы Galileo. Рассмотрены экспериментальные результаты моделирования риска потери целостности Galileo.

Постановка проблеми

Відповідно до Глобального аеронавігаційного плану стосовно систем CNS/ATM (зв'язку, навігації, спостереження/керування повітряним рухом) [1] та навігаційною стратегією держав Європейської конференції у справах цивільної авіації (ЕСАС) [2; 3] Глобальна навігаційна супутникова система (GNSS) починаючи з 2015 р. буде застосовуватися на всіх етапах польоту повітряних кораблів (ПК). До складу GNSS входять навігаційні системи GPS та ГЛОНАСС, а також згодом ввійде перспективна супутникова навігаційна система Galileo.

Вимоги до характеристик радіонавігаційного поля GNSS у просторі (точність, цілісність, неперервність) зумовлені необхідними навігаційними характеристиками (RNP) [4].

Концепція RNP визначає характеристики навігації в межах деякого району повітряного простору й тому впливає як на повітряний простір, так і на ПК.

Необхідні навігаційні характеристики призначені оцінювати повітряний простір за допомогою показника точності витримування навігаційних характеристик (типу RNP), що мають забезпечуватися в межах цього повітряного простору.

Тип RNP базується на значенні точності витримування навігаційних характеристик, що буде забезпечуватися протягом 95% часу всіма типами ПК, що виконують польоти в межах цього повітряного простору.

Характерним аспектом GNSS є варіювання в часі її характеристик унаслідок зміни базової геометрії розташування навігаційних супутників. У протоколах функціональних космічних (SBAS) та наземних (GBAS) доповнень [5] передбачені методи урахування цих змін за рахунок використання рівнів (радіусів) захисту, що забезпечують припинення використання системи в тому випадку, коли конкретний ризик для втрати цілісності стає занадто високим.

Просторові зміни характеристик системи можуть посилюватися, коли наземна система працює в режимі деградації після відмови таких компонентів системи, як станції контролю або лінії зв'язку. Ризик унаслідок просторових змін у роботі системи має передбачатись у рівнях захисту.

Функціональні доповнення GNSS схильні до впливу ряду атмосферних явищ, зокрема іоносферних.

Просторові та тимчасові зміни в іоносфері можуть зумовити місцеві або регіональні похибки, пов'язані з іоносферними

затримками, які не можуть бути скоректовані в архітектурі SBAS або GBAS. Такі події є рідкісними, і їх вірогідність залежить від регіону, проте ними не слід нехтувати.

У разі проектування наземної системи слід враховувати і такий аспект впливу як похибки внаслідок перевідбиття навігаційного сигналу, який залежать від фізичних умов розташування антен контролюючих станцій, а також перевищень супутників і часу спостережень.

Виходячи з цього виникає нагальна потреба в контролі цілісності системи Galileo безпосередньо споживачем.

Аналіз досліджень

Нині у джерелах є інформація стосовно концепції оцінювання цілісності системи Galileo з урахуванням вимог Європейського космічного агентства (European Space Agency) [6].

Сьогодні за відсутності розгорненого орбітального угруповання системи Galileo оцінювання ризику втрати цілісності можливе тільки за умов моделювання:

- орбітального угруповання Galileo (ефемериди, ефемеридні похибки, дрейф системного часу);
- сегменту спостереження Galileo (шуми приймачів станцій спостереження, нестабільність стандартів часу станцій спостереження);
- апаратури споживача Galileo (шуми приймачів, нестабільність стандартів часу).

Концепції оцінки цілісності GPS і Galileo використовують основні принципи, такі, як похибка визначення псевдовідстані у просторі (SISA) та помилка геометрії (DOP).

Мета роботи – експериментальне моделювання ризику втрати цілісності відповідно до концепції системи Galileo з використанням вихідних даних, отриманих від системи GPS.

Оцінка цілісності системи Galileo

Під цілісністю розуміють здатність системи забезпечувати споживачів своєчасним попередженням у випадках, коли її не можна

використовувати для навігації, або ступінь довіри, яку можна вважати вірогідністю інформації, що видається системою і передбачає її здатність забезпечувати споживача своєчасним попередженням, коли ця інформація не повинна використовуватися для запланованої операції [3].

Концепція оцінки цілісності сучасних супутникових навігаційних систем використовує двоступінчастий підхід:

- певне число видимих супутників має формувати прийнятну геометрію;
- статистична похибка визначення координат порівнюється з заданим порогом.

Якщо статистична помилка більше припустимого значення, навігаційне рішення вважається помилковим, якщо ж вона виявляється менше порога, то рішення вважається правильним усередині захищеного радіуса (порога, інтервалу).

Концепції оцінки цілісності GPS+WAAS та Galileo+EGNOS не передбачають використання інформації від інших систем. Такий підхід має свої недоліки.

Отримані дані, що необхідні для оцінки цілісності, залежать від схожого поширення помилок вимірювань.

Архітектура системи Galileo передає навігаційними супутниками інформацію про цілісність.

Будь-який споживач Galileo зможе отримати такі вихідні дані для оцінювання цілісності навігаційного рішення [6]:

- значення геометрії (погіршення точності визначення координат, що залежить від взаємного розташування навігаційних супутників відносно місцеположення споживача);
- похибку визначення псевдовідстані між навігаційним супутником та споживачем (SISA);
- похибку моніторингу SISA наземним сегментом Galileo (SISMA);
- інформацію про цілісність, що передається навігаційними супутниками;
- еквівалентну користувачу похибку визначення псевдовідстані (UERE);

– значення захисних інтервалів по горизонталі (HAL) та вертикалі (VAL), які залежать від етапу польоту ПК (типу RNP).

Остаточне оцінювання цілісності споживача являє собою вірогідність втрати цілісності, чи вірогідність отримання помилкової інформації P_{HMI} .

Концепція оцінювання цілісності Galileo не передбачає, що всі супутники, які мають номінальний статус «здоров'я», дійсно працюють у штатному режимі. Тому повна вірогідність втрати цілісності P_{HMI} розраховується як сума вірогідності втрати цілісності безпомилкового режиму (Fault-Free – FF) та вірогідності втрати цілісності помилкового режиму (Faulty Mode – FM):

$$P_{HMI}(VAL, HAL) = P_{HMI}(VAL)_{FF} + P_{HMI}(VAL)_{FM} + P_{HMI}(HAL)_{FF} + P_{HMI}(HAL)_{FM}.$$

Таким чином, повна вірогідність отримання помилкової інформації складається з чотирьох незалежних складових, отриманих із комбінації безпомилкового та помилкового режимів із вертикальним та горизонтальним ризиком втрати цілісності [6]:

$$P_{HMI}(VAL)_{FF} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{VAL}{\sqrt{2}\sigma_{u,V,FF}}\right),$$

$$P_{HMI}(VAL)_{FM} = P_{HMI}(VAL)_{FF} + P_{Fail} \sum_{j=1}^N \left(1 - \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{VAL + \mu_{u,V}}{\sqrt{2}\sigma_{u,V,FM}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{VAL - \mu_{u,V}}{\sqrt{2}\sigma_{u,V,FM}}\right) \right) \right),$$

$$P_{HMI}(HAL)_{FF} = e^{\left(\frac{-HAL^2}{2\xi_{FF}^2}\right)},$$

$$P_{HMI}(HAL)_{FM} = P_{HMI}(HAL)_{FF} + P_{Fail} \sum_{j=1}^N \left(1 - \chi_{CDF,2,\delta_{u,H}}^2 \left(\frac{HAL^2}{\xi_{FM}^2} \right) \right),$$

де erf – функція похибок;

$\sigma_{u,V,FF}$ – середньоквадратичне відхилення похибки по вертикалі;

P_{Fail} – вірогідність відмови одного з навігаційних супутників;

$\mu_{u,V}$ – середня величина похибки по вертикалі за вимірами j -го супутника;

ξ – середньоквадратичне відхилення похибки по горизонталі;

$\chi_{CDF,2,\delta}^2$ – кумулятивна функція щільності розподілення χ^2 з двома ступенями вільності та параметром нецентральності δ .

Для моделювання ризику втрати цілісності Galileo на кафедрі аеронавігаційних систем Національного авіаційного університету створено експериментальний апаратно-програмний комплекс, в склад якого входять:

– GPS+WAAS навігаційний приймач OEMV Family фірми NovAtel Inc (Канада);
– оригінальне програмне забезпечення.

Як вхідні дані для моделювання використовуються логічні файли, отримані з супутникового навігаційного приймача:

– географічні координати користувача (лог GPGLL);

– координати користувача в геоцентричній системі координат (лог BESTXYZ);

– координати супутника в геоцентричній системі координат (лог SATXYZ);

– псевдодальність від супутника до користувача (лог PSRPOS);

– похибка визначення псевдодальності (SISA) – очікуване значення $SISA < 85$ см;

– загальна помилка UERE (для режиму стандартного визначення координат – SPS) звичайно поблизу 25 м;

– значення захисного інтервалу по горизонталі та вертикалі (HAL та VAL).

У експерименті моделювався ризик втрати цілісності системи Galileo для різноманітних конфігурацій орбітальних угруповань та значень захисних інтервалів.

Як приклад отриманих результатів моделювання ризику втрати цілісності на рис. 1 показано окрему конфігурацію навігаційних супутників, яка відображає зміну положення супутників протягом 2 год спостережень та для якої виконувалось моделювання ризику втрати цілісності.

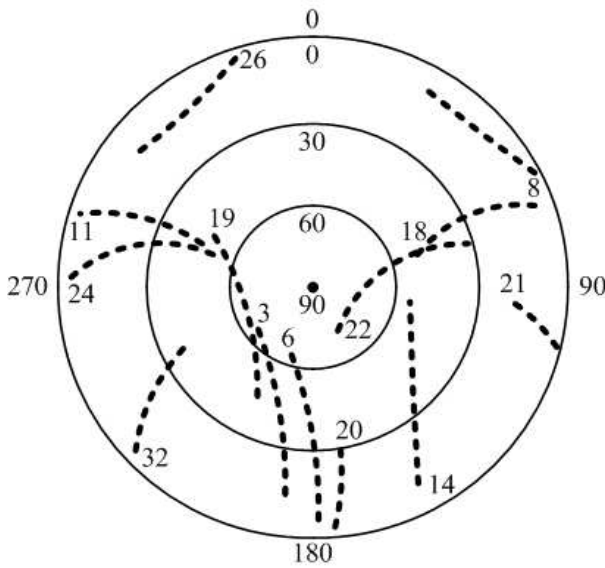


Рис. 1. Зміна положення навігаційних супутників за 2 год спостережень

Вірогідність втрати цілісності для орбітального угруповання, зображеного на рис. 1, для різних величин захисних інтервалів по горизонталі (HAL) показано на рис. 2.

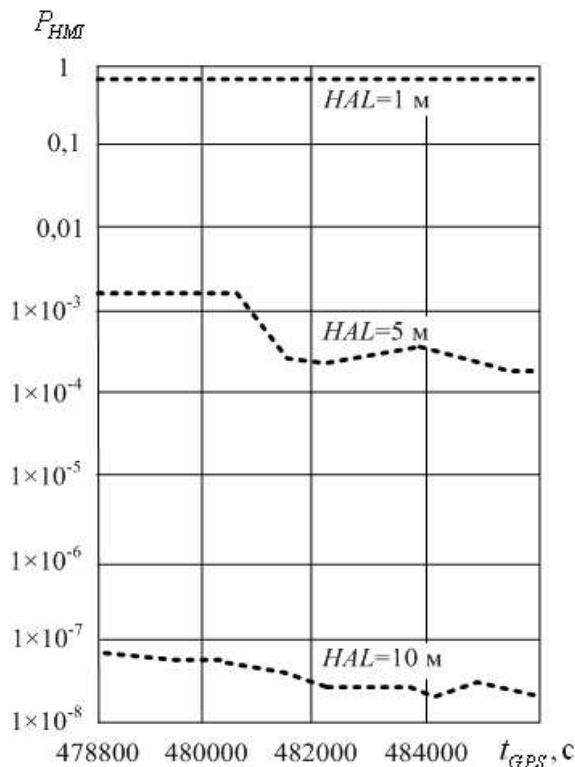


Рис. 2. Вірогідність втрати цілісності для окремого орбітального угруповання

На вісі X відкладений час GPS t_{GPS} , а на вісі Y вірогідність втрати цілісності P_{HMI} при заданих величинах захисних інтервалів по горизонталі. Під час експерименту кількість супутників змінювалась від 9 до 12.

Висновки

Результати експериментального моделювання ризику втрати цілісності Galileo показали, що ризик втрати цілісності залежить від величини захисного інтервалу, геометричного фактора погіршення точності вимірювання координат та інших факторів, які вносять похибки при розрахунку координат ПК.

Для забезпечення безпеки польоту ПК під час застосування GNSS необхідно виділяти такі розміри захисних інтервалів, щоб унеможливити ризик втрати цілісності, за умов урахування найменшої кількості видимих супутників та найгірших умов позиціонування, що здатні спотворити сигнал від супутника на приймачі ПК.

Література

1. *Глобальный аэронавигационный план применительно к системам CNS/ATM.* – 3-е изд. // Doc. 9750-AN/963, ICAO, 2007. – 139 с.
2. *Конин В.В. Системы спутниковой радионавигации / В.В. Конин, В.П. Харченко.* – К.: Холтех, 2010. – 520 с.
3. *Бабак В.П. Супутникова радіонавігація / В.П. Бабак, В.В. Конін, В. П. Харченко.* – К.: Техніка, 2004. – 328 с.
4. *Руководство по требуемым навигационным характеристикам (RNP).* – 2-е изд. // Doc. 9613-AN/937, ICAO, 1999. – 68 с.
5. *Радионавигационные средства. Приложение 10 к Конвенции о Международной гражданской авиации. Т. 1 // ICAO, 2006.* – 598 с.
6. *Oehler V. Use Integrity Risk Calculation at the Alert Limit without Fixed Allocations / V. Oehler, Luongo, P. Boyero, R. Stalford, H.L. Trutenberg // Proceedngs ION GNSS 2004.* – Long Beach, California, USA, September 2004.