

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-11>

УДК 621.3.095.21:621.3.018

ШУЛЬГА Олександр

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0008-2472-6814>

shulga.ov@ukr.net

СОКІРИНА Валерія

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0001-2628-655>

sokirina.valeria@gmail.com

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ГЛОБАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ (GNSS) ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

Супутникова радіонавігаційна система (СРНС) – це високотехнологічна інформаційно – вимірювальна система, що складається з п'яти основних сегментів.

Супутникові радіонавігаційні системи є всепогодними системами космічного базування, які дають змогу в глобальних масштабах визначати місцезоложення рухомих об'єктів та їхню швидкість у певний момент часу, а також здійснювати точну координату часу.

Принцип дії систем полягає в тому, що навігаційні супутники випромінюють спеціальні електромагнітні сигнали. Апаратура споживачів, встановлена на об'єктах, розташованих на поверхні Землі чи в навколосемному просторі, приймає та вимірює ці сигнали і після оброблення видає дані про місцезоложення та швидкість об'єкта в реальному часі чи в заданий момент часу.

Космічний сегмент є системою навігаційних супутників, що рухаються по еліптичних орбітах навколо Землі. На кожній орбіті перебувають декілька супутників. Навігаційний супутник має на борту стандарт часу та радіоелектронну апаратуру, що випромінює в напрямку Землі шумоподібні безперервні радіосигнали. Ці сигнали містять інформацію, необхідну для проведення навігаційних визначень за допомогою апаратури споживача. Завдяки достатній кількості навігаційних супутників і спеціальних параметрів радіосигналів апаратура споживача може в будь-який час за будь-яких погодних умов приймати випромінені супутниками сигнали та визначати місцезоложення, швидкість і поточний час споживача.

Наземний керуючий сегмент у своєму складі має центр керування космічним сегментом, радіолокаційні й оптичні станції спостереження за навігаційними супутниками та апаратуру контролю за станом навігаційних супутників. Керуючий сегмент визначає, прогнозує й уточнює параметри руху навігаційних супутників, формує й передає в бортову апаратуру супутників відповідну цифрову інформацію, а також виконує ряд контрольних і профілактичних функцій.

Сегменти космічних і наземних функціональних доповнень являють собою апаратурно - програмні комплекси, призначені для забезпечення точності навігаційних визначень, а також цілісності, неперервності, доступності й експлуатаційної готовності системи. Призначення та функції цих доповнень розглядаються далі.

Сегмент користувачів потенційно може складатися з необмеженої кількості супутникових навігаційних приймачів, які приймають та вимірюють сигнали навігаційних супутників і виконують розрахунки місцезоложення, швидкості й поточного часу з похибками, зумовленими характеристиками супутникової навігаційної системи та апаратури споживача.

Ключові слова: супутникова радіонавігаційна система, сегмент, функціональне доповнення, радіонавігаційний сигнал, супутник, диференційний режим, похибка.

SHULGA Olexandr, SOKIRINA Valeriia

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute

PROSPECTS OF USING THE GLOBAL SATELLITE SYSTEM (GNSS) TO DETERMINE THE PARAMETERS OF MOVING OBJECTS

The satellite radio navigation system is a high-tech information and measurement system consisting of five main segments. Satellite radio navigation systems are all-weather space-based systems that enable on a global scale to determine the location of moving objects and their speed at a certain moment in time, as well as to carry out precise time coordination. The principle of operation of the systems is that navigation satellites emit special electromagnetic signals. Consumer equipment, installed on objects located on the surface of the Earth or in near-Earth space, receives and measures these signals and, after processing, issues data on the location and speed of the object in real time or at a given moment in time. The space segment is a system of navigation satellites moving in elliptical orbits around the Earth. There are several satellites in each orbit. The navigation satellite has on board a time standard and radio-electronic equipment that emits noise-like continuous radio signals in the direction of the Earth. These signals contain information necessary for navigation determinations using the consumer's equipment. Thanks to a sufficient number of navigation satellites and special parameters of radio signals, the consumer's equipment can receive signals emitted by satellites at any time under any weather conditions and determine the location, speed and current time of the consumer. The ground control segment includes the space segment control center, radar and optical observation stations for navigation satellites and equipment for monitoring the condition of navigation satellites. The control segment determines, predicts and specifies the movement parameters of navigation satellites, forms and transmits relevant digital information to the on-board equipment of the satellites, and also performs a number of control and preventive functions. Segments of space and ground functional additions are hardware and software complexes designed to ensure the accuracy of navigational determinations, as well as the integrity, continuity, availability and operational readiness of the system. The purpose and functions of these additions are

discussed below. A user segment can potentially consist of an unlimited number of satellite navigation receivers that receive and measure signals from navigation satellites and perform position, speed, and current time calculations subject to errors due to the characteristics of the consumer's satellite navigation system and equipment.

Keywords: satellite radio navigation system, segment, functional addition, radio navigation signal, satellite, differential mode, errorpropane,

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Основою супутникових навігаційних технологій є два сузір'я середньо-орбітальних навігаційних супутників: *глобальна система визначення місцеположення (GPS)*, що належить США, і *глобальна навігаційна супутникова система (ГЛОНАСС)*, яка розроблена ще в колишньому СРСР і зараз використовується Російською Федерацією. Космічні сегменти обох систем містять по 24 навігаційні супутники (без урахування резервних), які безперервно випромінюють радіонавігаційні сигнали. Прийняті спеціальним приймачем (приймачем-індикатором), сигнали навігаційних супутників дають змогу визначити місцеположення, швидкість і поточний час споживача, а також отримувати інформацію про працездатність супутникових систем. Для визначення місцеположення та швидкості у тривимірному просторі потрібно, щоб у зоні радіовидимості приймача-індикатора перебували щонайменше чотири супутники, які належать до одного сузір'я, або п'ять супутників, що належать до різних сузір'їв.

Створені свого часу для задоволення потреб збройних сил США і СРСР, середньо орбітальні супутникові навігаційні системи GPS і ГЛОНАСС мають глобальний характер. Вони забезпечують можливість високоточного й безперервного визначення місцеположення та швидкості мобільних об'єктів у будь-якій точці Землі і в навколоземному просторі та є результатами розвитку наземних і локальних низькоорбітальних супутникових радіонавігаційних систем – "Лоран", "Омега", "Чайка", "Транзит", "Цикада" та ін. Після повномасштабного введення в експлуатацію в середині 90-х років супутникових систем GPS і ГЛОНАСС уряди США та Росії прийняли рішення про можливість їх використання цивільними споживачами. Упродовж минулих років засоби супутникової навігації надійно ввійшли в практику землевпорядних робіт і мореплавання у відкритому морі та в прибережній зоні і починають усе ширше використовуватися в аеронавігації. Федеральне авіаційне управління США визнало апаратуру СРНС основним засобом навігації під час польотів над океанами і додатковим засобом під час польотів у національному повітряному просторі США.

Зменшення похибки вимірювань місцеположення користувача забезпечують елементи GNSS – сузір'я навігаційних супутників GPS і ГЛОНАСС, космічне функціональне доповнення SBAS, наземне функціональне доповнення GBAS і бортовий супутниковий навігаційний приймач. Без таких доповнень похибка визначення місцеположення становить десятки метрів. Через це точні, тобто в умовах поганої видимості, заходження на посадку виконати неможливо. Крім високої точності визначення місцеположення, повинен забезпечуватися також безперервний контроль за цілісністю (нормальним функціонуванням) навігаційних супутників.

Диференціальний режим супутникової навігації дає змогу в десятки разів зменшити похибку визначення місцеположення і забезпечити безперервний контроль за цілісністю, експлуатаційною готовністю й доступністю системи. Завдяки впровадженню диференціального режиму супутникова навігація може претендувати на роль єдиного засобу аеронавігації.

Метою роботи є дослідження методів визначення параметрів рухомих об'єктів за допомогою оптимізації каналів інформації в функціональних доповненнях СРНС

Постановка задачі дослідження

Розглянемо перспективи використання і застосування глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS).

Бортове доповнення ABAS є вдосконаленням у бортовому приймачі GNSS системи автоматичного контролю за цілісністю супутникового сузір'я, яку зазвичай називають RAIM. За умови достатньої кількості навігаційних супутників (не менше шести), що спостерігаються користувачем, процедури RAIM уможливають визначення тих супутників, інформацію з яких не можна використовувати під час розрахунків навігаційних характеристик. У разі недостатньої кількості супутників, що спостерігаються, процедури системи RAIM не забезпечують 100-відсоткового контролю за працездатністю навігаційних супутників, і її доповнює ABAS.

Супутникова й наземна системи функціонального доповнення до сузір'я навігаційних супутників забезпечують диференціальний режим навігаційних визначень. Суть такого режиму полягає в тому, що координати місцеположення об'єкта обчислюються з використанням не лише радіонавігаційних сигналів навігаційних супутників GNSS, але й корегувальної інформації, що надходить від SBAS та (або) GBAS.

Принципова відмінність між доповненнями SBAS і GBAS – у способах отримання й доставляння корегувальної інформації, а також у розмірах зони дії цих підсистем. GBAS – локальна система, що

функціонує в зоні дії радіусом до 50 км, а SBAS – глобальна система, зона дії якої має радіус декілька тисяч кілометрів.

Супутникове доповнення SBAS (рис. 1) складається з наземних контрольних станцій, розосереджених на досить великій території. Одним з основних завдань цих станцій є формування корегувальної інформації з сигналів супутників GNSS та інформації про цілісність системи. Корегувальна інформація з усіх контрольних станцій та інформація про цілісність навігаційних супутників обробляється за певними алгоритмами. У вигляді повідомлення, що містить широкозонні диференціальні поправки до сигналів навігаційних супутників, інформацію про цілісність та іншу службову інформацію з каналів зв'язку "Земля – супутник зв'язку – ПК" вона передає в бортові приймачі GNSS за допомогою геостационарних супутників (GEO). Ці супутники одночасно виконують роль навігаційних, збільшуючи кількість радіо видимих споживачеві навігаційних супутників.

Прикладами створення SBAS є американська широко зонна система функціонального доповнення WAAS, аналогічна за своїми функціями європейська система EGNOS та японська супутникова система функціонального доповнення MSAS (рис. 2). На відміну від систем WAAS і MSAS, система EGNOS є широко зонним доповненням не лише до GPS але й до ГЛОНАСС.

Експлуатація функціонального доповнення WAAS почалася з 2001 р., а доповнення EGNOS – з 2003 р. Зону дії доповнення EGNOS передбачається поширити на Близький Схід, Центральну Азію, Африку та Латинську Америку.

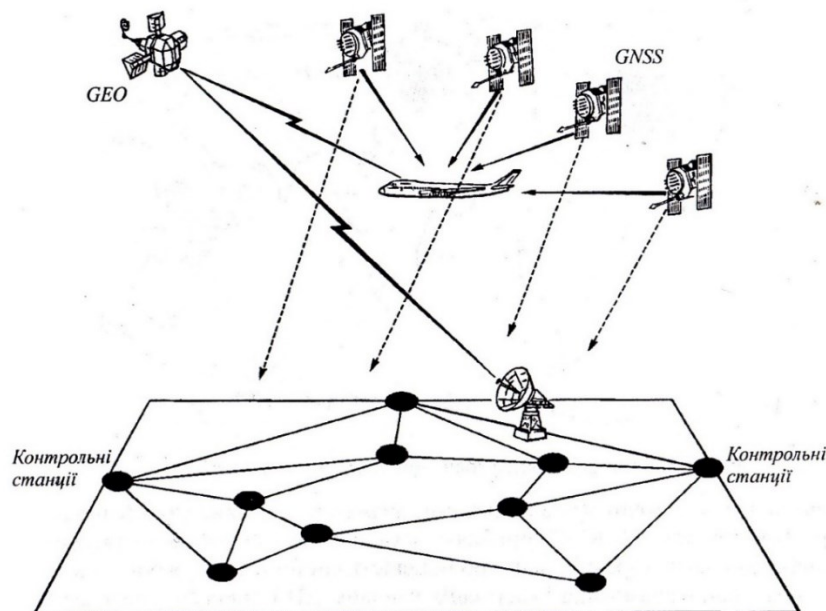


Рис. 1. Структура супутникового доповнення SBAS

Наземне доповнення GBAS (рис. 2) має контрольну-корегувальну станцію (ККС) з антеною для приймання радіонавігаційних сигналів, яка встановлена в точці з координатами, визначеними з високою (сантиметровою) точністю. У ККС обробляються сигнали супутників, формуються диференціальні корекції, дані про цілісність системи та службові повідомлення. Далі сформована інформація каналом ДВЧ-діапазону передається в бортовий приймач GNSS.

Розташування GBAS у зоні аеродрому створює умови для розширення функцій цієї системи. Їй надається можливість керувати всіма об'єктами, що рухаються по аеродрому, та контролювати їх. Для цього аеродромні транспортні засоби обладнують супутниковими навігаційними приймачами, координати яких передаються радіоканалом у робочу станцію диспетчера. Маючи повну картину розташування транспортних засобів і руху їх по аеродрому, диспетчер здійснює оперативне керування.

Модернізація аеронавігаційної системи України передбачає вдосконалення як бортового обладнання ПК, так і наземної аеродромної інфраструктури [1,2,3].

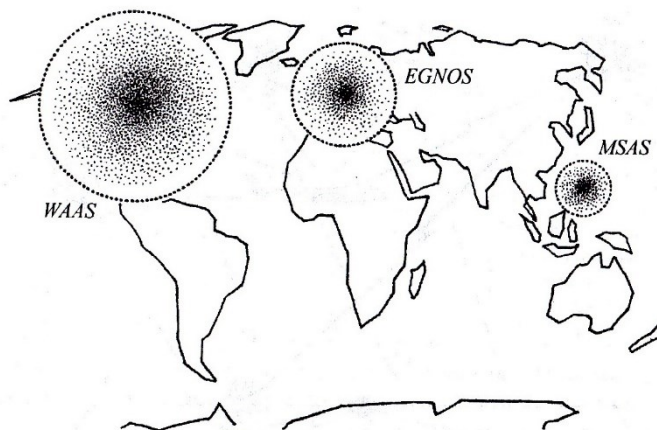


Рис. 2. Зони дії та обслуговування SBAS

З рис. 2 видно, що Україна розташовується в зоні дії системи EGNOS. Якщо Україна буде користувачем цієї системи, то її ПК мають облаштуватися бортовими приймачами GNSS, які приймають сигнали EGNOS. Але це не означає, що всі аеронавігаційні питання будуть розв'язані. Досвід експериментальної експлуатації системи WAAS свідчить, що її використання не завжди уможливорює визначення координат з необхідною точністю. Тому додатково до WAAS США розробляють і впроваджують мережу локальних ККС (система LAAS), що встановлюються на кожному аеродромі. Отже, створюється функціональне доповнення до системи GBAS. Вважають, що це – найбільш раціональний шлях модернізації аеронавігаційної системи України.

Як бачимо, впровадження супутникових аеронавігаційних технологій в Україні має орієнтуватися на створення наземних функціональних доповнень GBAS на аеродромах та устаткування ПК апаратурою, що приймає сигнали GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, EGNOS і WAAS.

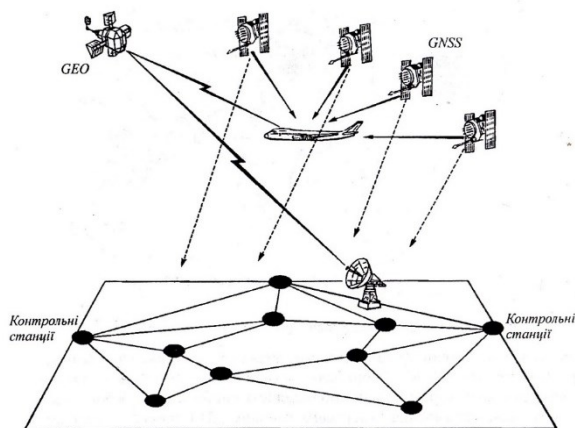


Рис. 3. Структура наземного доповнення GBAS

Розглядаючи економічні аспекти впровадження супутникових технологій в аеронавігацію, слід підкреслити, що вони належать до категорії енергозберігаючих технологій за двома основними показниками:

1) енергоспоживання ККС становить близько 2,5 кВт, що більш як на порядок менше за енергію, споживану радіолокаційними системами;

2) точність визначення місцеположення в зоні дії ККС є такою високою, що маневрування під час заходження на посадку зводиться до мінімуму, а це дає змогу суттєво заощадити на паливі.

Перехід від традиційних засобів управління повітряним рухом до тих, що ґрунтуються на супутникових технологіях, дає величезні економічні й технічні вигоди.

Крім того, на основі використання даних GNSS актуальним є створення регіональних систем позиціонування (RPS). Структуру RPS зображено на рис. 4. Розглянемо, як вона функціонує.

Існує мережа наземних станцій дистанційного моніторингу сигналів GPS (Remote integrity monitoring stations – RIMS), розосереджених у заданому регіоні. Станції приймають радіосигнали навігаційних супутників GPS. Координати фазових центрів їхніх приймальних антен виміряні з високою точністю.

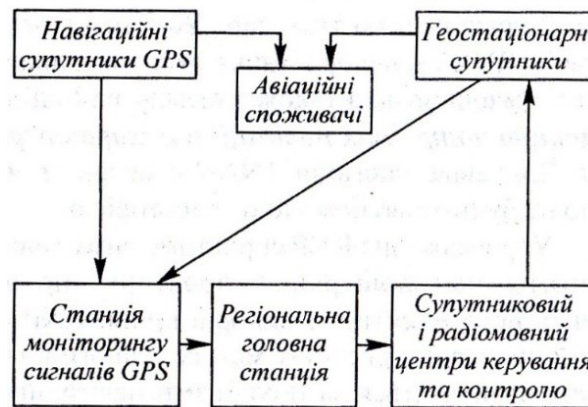


Рис.4. Структура регіональної системи позиціонування

RIMS визначають свої координати, зіставляють їх з координатами фазових центрів антен, розраховують середньоквадратичні похибки, що впливають на точність визначення місцеположення об'єкта, і передають цю інформацію на регіональну головну станцію (Regional master station – RMS). На RMS обробляється інформація, що надходить від усіх RIMS у вигляді інтегрованого повідомлення, яке містить дані про місцеположення, поточний час, корекцію і цілісність системи, та передається на супутниковий і радіомовний центри керування (Satellite and broadcast control centres – SBCC).

Центр SBCC керує геостационарними радіомовними супутниками (RPS GEO broadcast satellites), які є також додатковими навігаційними супутниками. Радіонавігаційна інформація супутників GEO надходить у RIMS і обробляється разом із сигналами GPS. Супутники GEO приймають навігаційну інтегровану інформацію з SBCC і транслюють її споживачам відповідного регіону. Отже, апаратура споживача приймає радіонавігаційну інформацію з супутників GPS, радіонавігаційну скореговану інформацію та інформацію про цілісність супутників з RPS GEO, і після її загального оброблення визначає місцеположення з високою точністю.

Ідея створення RPS наближена до WAAS. Передбачається, що RPS матиме глобальний характер і здатність поєднуватися з іншими функціональними доповненнями (WAAS, MSAS, EGNOS).

Крім того, на сьогодні розповсюджена тенденція до створення високоточних систем позиціонування на основі GNSS, основною метою яких є виконання завдань RTK (Real Time Kinematics), тобто завдань «он-лайн» управління рухомими об'єктами. В основу таких систем покладене створення мережі активних референтних контрольних станцій, що постійно обмінюються даними із обчислювальним центром. Відповідно, обидві ці мережі відрізняються своїми задачами, точністю, інфраструктурою тощо [4,5]. Якщо мережа перманентних станцій є фактично опорною фундаментальною мережею, що покликана вирішувати науково-технічні задачі найвищої точності, то мережа активних референтних станцій повинна донести до користувачів, що працюють в області координатного забезпечення, можливість практичного отримання координат будь-якої доступної для супутникових технологій точки на земній поверхні чи у навколишньому просторі з достатньою точністю (см-метри) та оперативністю.

Головною перепоною на шляху широкого впровадження сучасних GNSS-технологій в Україні, особливо тих, що пов'язані з режимом реального часу – RTK, є порівняно висока вартість організації подібної інфраструктури та очевидність її практичної ефективності.

Всі описані функціональні доповнення так чи інакше мають у своєму складі наземні контрольні станції, які корегують дані отримані із супутників GNSS, таким чином підвищуючи точність визначення просторово-часових координат [6,7]

Якщо взяти основне рівняння диференційних фазових вимірювань з j -го супутника:

$$\lambda^j \Phi_{mob}^j(t)^{corr} = \left[\rho_{mob}^j(t) + \delta\rho_{mob}^j(t) + \delta\rho^j(t) + \delta\rho_{mob}(t) + \lambda^j N_{mob}^j \right] - \left\{ \delta\rho_{ref}^j(t_0) + \delta\rho^j(t_0) + \delta\rho_{ref}(t_0) + \dots + \lambda^j N_{ref}^j \right\} + RRC_{ref}^j \times (t - t_0), \quad (1)$$

то $t-t_0$ є запізненням диференційних корекцій або затримкою даних, RRC_{ref}^j – швидкість зміни диференційної корекції на референтній (ref) станції. Відповідно, якість отриманих результатів прямо залежить від цього запізнення. Для визначення координат мобільного (mob) приймача диференційним методом GPS (DGPS або DGNSS) застосовують корекції псевдовіддалі (на основі фазових даних), які екстраполюються на момент спостереження $t-t_0$, тоді як для визначення координат мобільного приймача

відносним методом використовуються одночасні спостереження, що здійснюються на кінцевих станціях базису, тобто $t=t_0$. У разі визначення координат мобільного приймача у режимі реального часу (РТК-методом) необроблені вимірювання фази передаються йому із референційної станції, а обчислення здійснюються на опорний момент часу в мобільному модулі t_0 .

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Отже можна зробити наступний висновок: висока пропускна здатність мережі наземних контрольних станцій функціональних доповнень СРНС забезпечує високі показники точності визначення просторово-часових координат і точності позиціонування об'єкта управління відповідно.

Динамічне управління потоками інформації з найбільшою ефективністю може бути застосоване для мереж (телекомунікаційних чи комп'ютерних) з метою покращення показників якості їх функціонування. Цим і можна визначити перспективу і актуальність застосування методів динамічного управління потоками для ефективного і надійного обміну даними в СРНС.

Взаємне проникнення обчислювальної техніки в техніку зв'язку та техніки зв'язку в обчислювальну техніку привели до розробки високоорганізованих адаптивних систем управління мережами зв'язку та потоками інформації. Такі адаптивні системи управління забезпечують усунення або ослаблення впливу виникаючих несправностей окремих елементів мережі і зміни в часі потоків інформації між абонентами і вузлами мережі на якість обслуговування заявок абонентів і якість передачі інформації.

Якість обслуговування заявок на передачу інформації системою зв'язку залежить від ряду параметрів, до основного з яких звичайно відносять: об'єм інформації, що підлягає передачі (наприклад, телефонне навантаження в системах телефонного зв'язку) Y ; пропускну здатність мережі зв'язку G ; структурну надійність та живучість системи зв'язку H ; завадозахищеність і якість передачі інформації K і алгоритм обслуговування заявок на передачу інформації U . При цьому якість обслуговування заявок може бути оцінена у вигляді деякого узагальненого критерію

Література

1. В. П. Бабак Супутникова радіонавігація / В. П. Бабак, В. В. Конін, В. П. Харченко. – Київ: Техніка, 2004. – 327 с.
2. Козелков С. В., Кочерук С. М. Напрямки розвитку радіонавігаційного забезпечення України/ С.В. Козелков, С.М. Кочерук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС. – 2009. – Вип. 3(21). – С. 86-90.
3. Концепція створення та експлуатації системи координатно-часового і навігаційного забезпечення України з застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем на період 2006-2011 рр. – Національне космічне агентство України, 2006.
4. Лемешко, А. В. Методика вибору незалежних путей с определением их количества при решении задач многопутевой маршрутизации / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсева, О.А. Дробот // Праці УНДІРТ. – 2006. – № 4 (48). – С. 69 – 74.
5. Конвенция о международной гражданской авиации // Приложения 1-18: Брюссель.: Международная организация гражданской авиации, 1990. – 42 с.
6. Наумов О. В. Перспективи розвитку навігаційних засобів / О. В. Наумов. // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. – 2011. – №14. – С. 105–108
7. Аналіз світових тенденцій розвитку навігації для сухопутних військ / [В. М. Корольов, Е. В. Лучук, Я. Г. Заець та ін.] // Військово-технічний збірник. – 2011. – №1. – С. 19–29.

References

1. V. P. Babak Suputnykova radionavighatsiia / V. P. Babak, V. V. Konin, V. P. Kharchenko. – Kyiv: Tekhnika, 2004. – 327 s.
2. Kozelkov S. V., Kocheruk S. M. Napriamky rozvytku radionavighatsiinoho zabezpechennia Ukrainy/ S.V. Kozelkov, S.M. Kocheruk // Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl. – Kh.: KhUPS. – 2009. – Vyp. 3(21). – С. 86-90.
3. Kontseptsiiia stvorennia ta ekspluatatsii systemy koordynatno-chasovoho i navighatsiinoho zabezpechennia Ukrainy z zastosuvanniam hlobalnykh navighatsiinykh suputnykovykh system na period 2006-2011 rr. – Natsionalne kosmichne ahentstvo Ukrainy, 2006.
4. Lemeshko, A. V. Metodyka vybora nezavysymykh putei s opredeleniem ykh kolychestva pry reshenyу zadach mnohoputevoi marshrutyzatsyy / A.V. Lemeshko, O.Iu. Evseeva, O.A. Drobot // Pratsi UNDIRT. – 2006. – № 4 (48). – С. 69 – 74.
5. Konventsiya o mezhdunarodnoi hrazhdanskoi avyatsyy // Prylozheniya 1-18: Briussel.: Mezhdunarodnaia orhanyzatsiya hrazhdanskoi avyatsyy, 1990. – 42 s.
6. Naumov O. V. Perspektyvy rozvytku navighatsiinykh zasobiv / O. V. Naumov. // Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovodoslidnoho instytutu aviatsii. – 2011. – №14. – С. 105–108
7. Analiz svitovykh tendentsii rozvytku navighatsii dlia sukhoputnykh viisk / [V. M. Korolov, E. V. Luchuk, Ya. H. Zaiets ta in.] // Viiskovo-tekhnichnyi zbiryk. – 2011. – №1. – С. 19–29.