

УДК 004.942

Муригін С.Ю.,
Зудов О.М.,
Горіна В.В.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ

Національний авіаційний університет

skymurygin@gmail.como_zudov@mail.ruvikulek@yandex.ru

Описано методики комп'ютерного моделювання глобальних навігаційних супутникових систем, які можуть бути використані як у навчальних цілях для розуміння сучасних принципів побудови телекомунікацій, так і для створення різноманітних програмних продуктів, таких як навігатори, трекари, локаційні монітори тощо. Розроблено web-орієнтований програмний комплекс для комп'ютерної симуляції роботи існуючих глобальних навігаційних супутникових систем як у реальному масштабі часу, так і у прискореному масштабі

Ключові слова: глобальні супутникові навігаційні системи, симуляція орбітального руху, зона покриття, web-орієнтований програмний комплекс

Вступ

Технологія супутникової навігації зробила справжню революцію у сфері геопозиціонування. Із появою глобальних супутникових навігаційних систем (ГНСС) визначення географічних координат об'єкта вийшло на новий якісний рівень. Протягом останніх десятиріч точність та зручність визначення власного розташування або позиції де-якого об'єкта зробила супутникову навігацію незамінним атрибутом у галузях авіації, мореплавства, картографії, логістики, туризму та інших [1, 4].

Комп'ютерне моделювання роботи ГНСС є важливою навчальною задачею для розуміння сучасних принципів побудови телекомунікацій, а також може бути корисним для проектування навігаційного програмного забезпечення.

На даний момент найбільш розвиненими є наступні ГНСС:

1. *NAVSTAR GPS (Navigation Satellite Time and Ranging Global Positioning System)* - глобальна навігаційна супутникова система, розроблена та реалізована Міністерством оборони США, починаючи з 1973 року, основним завданням якої є високоточне позиціонування статичних та

рухомих об'єктів на місцевості. Це перша система, що почала працювати у цивільному сегменті.

2. ГЛОНАСС (Глобальна Навігаційна Супутникова Система) - російська супутникова система, створення якої почалося за підтримки уряду Російської Федерації у 1976 році.

3. *Galileo* - система, створена Європейським Союзом та Європейським космічним агентством у 2005 році. На відміну від *GPS* та ГЛОНАСС, система Галілео не контролюється національними військовими відомствами.

4. *Beidou* - китайська супутникова система, робота над якою розпочалась в 2000 році.

У 2004 році системи *NAVSTAR GPS* та *Galileo*, а у 2006 році і ГЛОНАСС, підписали договір про взаємодоповнюваність та сумісність своїх систем.

Методики комп'ютерного моделювання ГНСС

Сучасні ГНСС включаються в себе наступні три сегменти:

- космічний сегмент;
- контролюючий сегмент;
- користувацький сегмент.

Основним і найбільш складним з них є космічний сегмент, тобто сукупність навігаційних супутників.

Основним параметром орбіти навігаційного супутника з точки зору геометрії його руху є її радіус (або висота супутника на поверхнею Землі). Чим вище знаходиться супутник, тим більше зга-

сання сигналу, але із збільшенням радіусу орбіти збільшується "зона покриття", тобто площа поверхні, із якою супутник видимий.

У таблиці 1 наведено основні параметри орбіт чотирьох існуючих ГНСС [2-4].

Таблиця 1. Характеристики космічних сегментів ГНСС

Характеристики	GPS	ГЛОНАСС	Galileo	Beidou
Кількість супутників	32	28	30	16
Кількість орбітальних площин	6	3	3	різні типи орбіт
Нахил орбітних площин	55°	64.8°	56°	
Радіус орбіти	20 200 км	19 100 км	23 222 км	21 500 км, 35 786 км, 36 000 км

Для оцінки ймовірності потрапляння супутника у зону видимості можна побудувати дві концентричних сфери. Перша моделює Земну поверхню, друга є сферою, яка містить орбіти супутників (рис. 1). Дотична площина до першої (внутрішньої) сфери – це "площина горизонту". Вона ділить другу "небесну" сферу на дві нерівні частини. Для площі меншої частини сфери, що вона відсікається

"площиною горизонту", є геометричною ймовірністю потрапляння супутника у зону видимості. При цьому положення спостерігача на поверхні Землі відповідає точці дотику площини.

Задати площину орбіт кожного супутника можна за допомогою добутку рівняння кола на відповідні матриці повороту (1).

$$A_i := \begin{pmatrix} R_o \cdot \cos\left(\frac{N}{20} + c_i\right) \\ R_o \cdot \sin\left(\frac{N}{20} + c_i\right) \\ 0 \end{pmatrix} \quad B_i := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(f_i) & -\sin(f_i) \\ 0 & \sin(f_i) & \cos(f_i) \end{pmatrix} \quad C_i := B_i \cdot A_i \quad (1)$$

де i – номер супутника;

A_i – матриця орбіти у площині екватору;

R_o – радіус орбіти;

c_i – фаза, визначає положення супутника на орбіті;

B_i – матриця повороту площини орбіти;

f_i – кут нахилу площини орбіти відносно площини екватору;

C_i – нове положення орбіти.

Опишемо алгоритм визначення видимості супутника з довільної точки на

поверхні Землі. Даний алгоритм використовується для визначення видимості кожного окремого супутника активної ГНСС.

Виведемо загальну умову (рис. 2), при якій супутник видимий в довільній точці:

$$L_{AB} \leq R_B, \quad (2)$$

де L_{AB} – найкоротша відстань на карті між точками A і B (проекція позиції супутника на карту);

R_B – відстань від B до границі видимості супутником поверхні Землі.

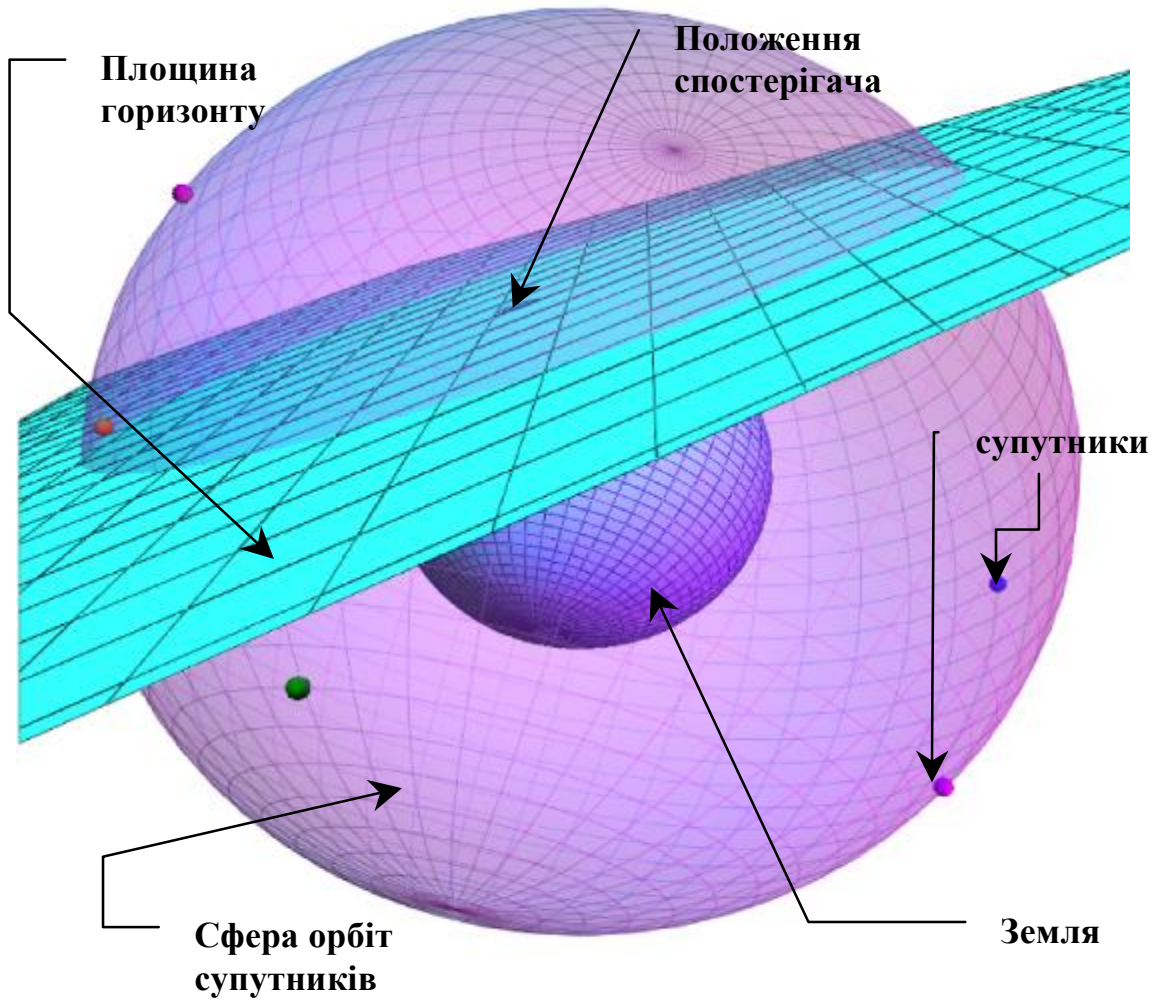


Рис.1. Геометрична модель для оцінки ймовірності потрапляння супутника у зону видимості

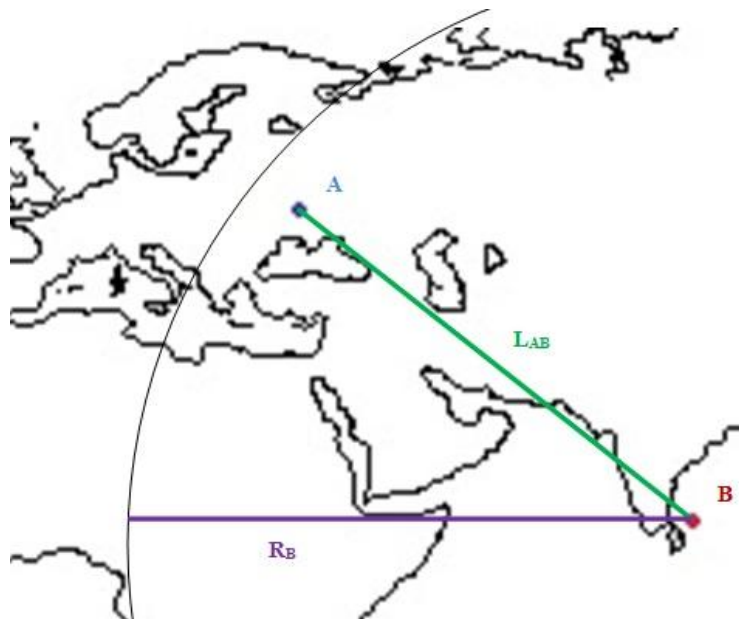


Рис. 2. Видимість супутника В з точки А.
Дугою позначена границя видимості земної поверхні супутником

Точки A і B представлені у вигляді картографічних координат (широта і довгота у градусах): $A(\lambda_1, \varphi_1)$, $B(\lambda_2, \varphi_2)$

Використовуючи закони сферичної тригонометрії та знаючи радіус Землі, визначимо L_{AB} :

$$L_{AB} = R \times \arccos(\sin(j_1) \times \sin(j_2) + \cos(j_1) \times \cos(j_2) \times \cos(I_1 - I_2)) \quad (3)$$

Для визначення RB спростимо модель взаємодії між супутником та Землею до двовимірного простору (рис. 3), з супутником у вигляді точки, та Землею у вигляді кола з центром в точці O .

Відомими величинами є (згідно з рис. 3):

- радіус Землі: $OA = OC = OF = R$;
- висота супутника над рівнем моря: $FB = h$.

Необхідно знайти довжину дуги \widehat{AF} :

$$RB = \widehat{AF} = R \times \beta \quad (3)$$

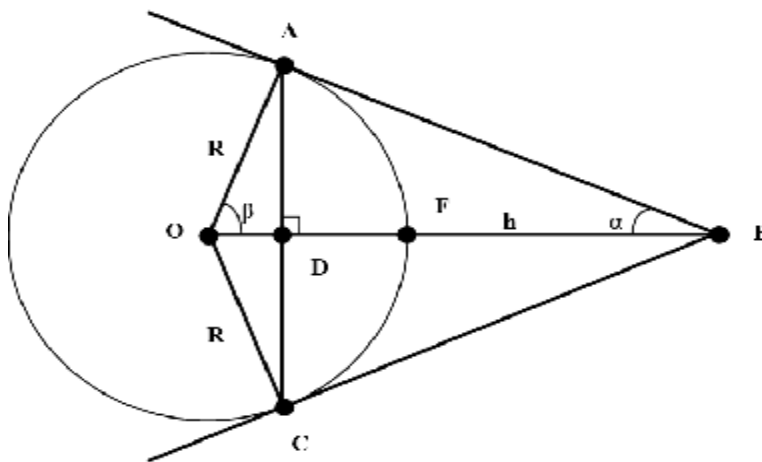


Рис. 3. Визначення кута зони покриття супутника

Для визначення кута β , маючи значення R , нам достатньо дізнатись довжину сторони AD . Це значення можна отримати з наступної рівності:

$$AD = DC = AB \times \sin a \quad (4)$$

Спочатку визначимо кут a :

$$a = \arcsin\left(\frac{R}{OB}\right) = \arcsin\left(\frac{R}{R+h}\right) \quad (5)$$

Визначимо відстань d супутника до точки перетину дотичної з колом:

$$d = AB = AC = \sqrt{OB^2 - R^2} = \sqrt{(R+h)^2 - R^2} = \sqrt{2Rh + h^2} \quad (6)$$

Повертаючись до рівності (4), отримуємо значення AD :

$$AD = DC = d \times \sin a = \sqrt{2Rh + h^2} \times \sin\left(\arcsin\left(\frac{R}{R+h}\right)\right) = \sqrt{2Rh + h^2} \times \frac{R}{R+h} \quad (7)$$

В результаті отримуємо:

$$b = \arcsin\left(\frac{AD}{R}\right) = \arcsin\left(\frac{\sqrt{2Rh+h^2} \times \frac{R}{R+h}}{R}\right) = \arcsin\left(\frac{\sqrt{2Rh+h^2}}{R+h}\right) \quad (8)$$

Повертаючись до загальної умови (2) видимості супутника з довільної точки на поверхні Землі, маємо наступну нерівність:

$$\arccos(\sin(j_1) \times \sin(j_2) + \cos(j_1) \times \cos(j_2) \times \cos(I_1 - I_2)) \leq \arcsin\left(\frac{\sqrt{2Rh+h^2}}{R+h}\right) \quad (9)$$

Після нескладних перетворень, отримуємо критерій видимості:

$$\sin(j_1) \times \sin(j_2) + \cos(j_1) \times \cos(j_2) \times \cos(I_1 - I_2) \leq 1 - \frac{h \times (2R + h)}{(R + h)^2} \quad (10)$$

де λ_1, φ_1 - картографічні координати точки на поверхні Землі;

λ_2, φ_2 - картографічні координати проекції супутника на поверхню Землі;

R - радіус Землі;

h - висота супутника над рівнем моря.

Опис веб-орієнтованого програмного комплексу для комп'ютерного моделювання ГНСС

На основі описаних методів моделювання і геометричних побудов було розроблено веб-орієнтований програмний комплекс комп'ютерного моделювання космічного сегменту ГНСС. Програмний комплекс дозволяє у реальному і масштабованому часі імітувати рух навігаційних супутників різних систем, отримуючи онлайн актуальні дані про їх координати, а також визначати їх видимість для різних точок на поверхні землі.

Розроблений комплекс дозволяє досліджено динамічні та статичні характеристики навігаційних супутників наступних систем: NAVSTAR (GPS), ГЛОНАСС, Galileo, Beidou та інших.

Основними елементами графічного інтерфейсу користувача веб-клієнту є: 3D інтерактивна модель (Земля, супутники, їхні орбіти, та позиція приймача); панелі інструментів - кнопки, які виконують певні дії над сценою та активують відповідні меню (Супутник, Тип Карти, Симуляція, та інші). Зовнішній вигляд елементів інтерфейсу подано на рис. 4.

На сьогоднішній день кількість ПЗ, орієнтованого на моделювання космічного сегменту ГНСС, величезна. Але більшість з цих програм мають вузьке коло функціональних можливостей, і є комерційними. Особливо це стосується ПЗ для мобільних платформ.

Розроблений продукт має набір функціональних можливостей, які відсутні у всіх/деякий аналогів:

- зміна швидкості плину часу моделюваної сцени;
- зміна частоти оновлення супутникових даних;
- візуалізація інформації про видимі супутники з власноручно обраної точки поверхні Землі;
- вибір візуалізації орбітального руху супутників на 3D моделі або на плоскій карті та інші.

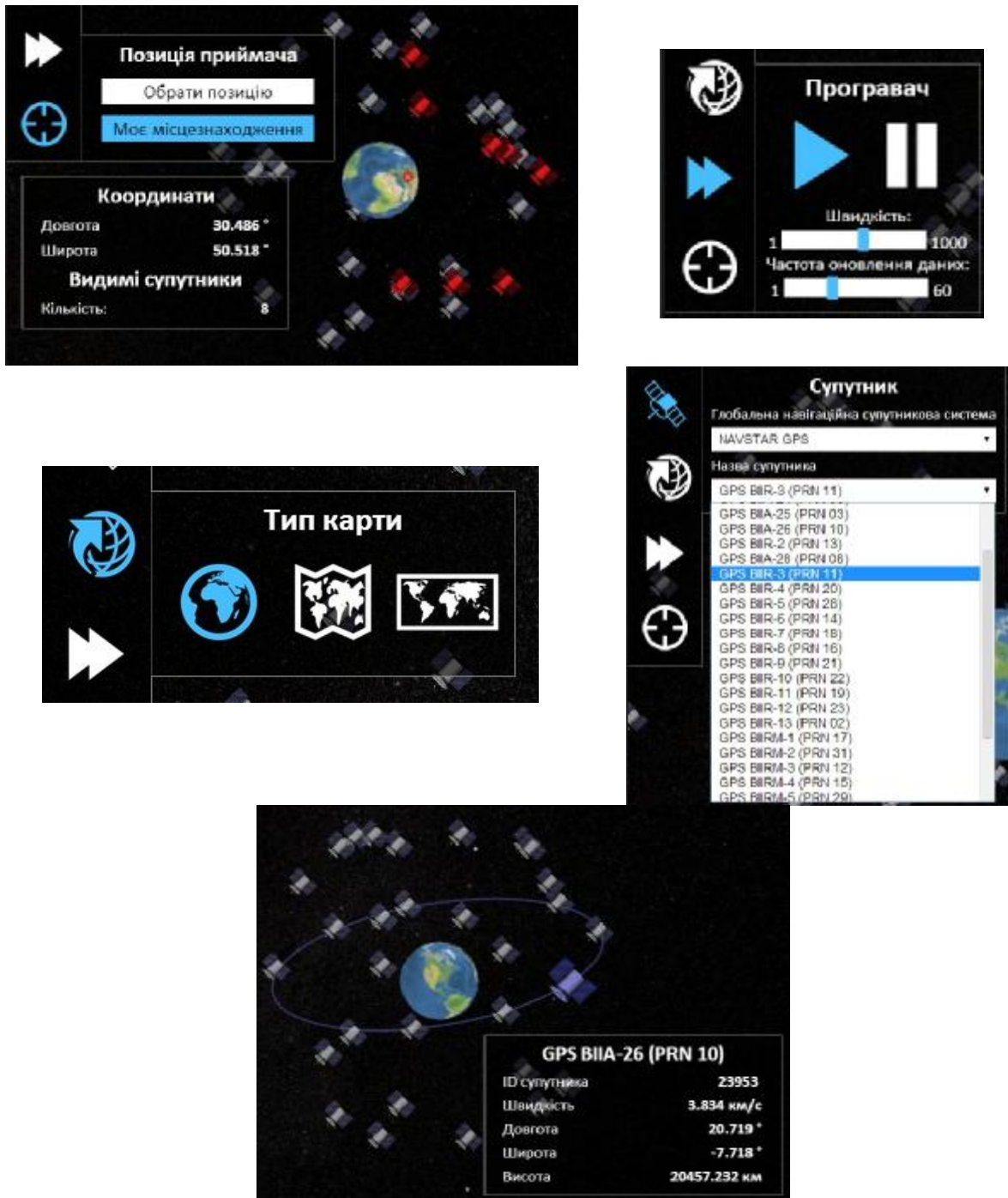


Рис.4. Елементи інтерфейсу веб-клієнта

Дослідження та розробка проводилися в середовищі *JetBrains WebStorm*. В процесі створення були використані наступні інструменти: клієнтська частина (браузер користувача) – *Javascript* (з додатковими бібліотеками *RequireJS*, *BackboneJS*, *UnderscoreJS*, *CesiumJS*), *HTML*, *CSS*, *WebGL* (браузерна оболонка

над *OpenGL*); серверна частина (веб-сервер) – *NodeJS* сервер.

В якості вхідних даних про супутники використовуються дані формату *TLE* [5-6], який є основним загальноприйнятим видом представлення даних про властивості космічних об'єктів. *TLE* (абр. від англ. *Two-Line Element set*, дворядковий набір елементів) – дворядковий формат

даних, що представляє собою набір елементів орбіти для супутника Землі. Формат *TLE* був визначений угрупованням *NORAD* (*North American Aerospace Defense Command* - Командування повітряно-космічної оборони Північної Америки) і, відповідно, використовується в *NORAD*, *NASA* та інших системах, які використовують дані угруповання *NORAD* для визначення положення та властивостей космічних об'єктів. Орбітальні елементи визначаються для багатьох тисяч космічних об'єктів з бази даних *NORAD* і вільно розповсюджуються для подальшого використання в Інтернеті. *TLE* завжди складається з двох рядків відформатованого тексту.

Маючи дані про актуальне положення супутників будь-якої ГНСС, розроблений програмний продукт дає можливість визначити, скільки супутників і які саме знаходяться у зоні видимості для заданих географічних координат спостерігача, як у даний час, так і у будь-який момент майбутнього або минулого часу. Визначення видимості супутника ведеться згідно з умовою (10).

Висновки

Методики комп'ютерного моделювання глобальних навігаційних супутникових систем, описані вище, можуть бути використані як у навчальних цілях для розуміння сучасних принципів побудови телекомунікацій, так і для створення різноманітних програмних продуктів, таких як навігатори, трекери, локаційні монітори тощо.

Розроблений програмний комплекс дозволяє досліджувати фізичні, математичні та астрономічні аспекти взаємодії навігаційних супутників та планети Земля, методи позиціонування об'єкту на мі-

сцевості за допомогою ГНСС. Є можливість вивчати різні системи координат, що використовуються в глобальному позиціонування, а також способи конвертації одних систем в інші (прямокутна, сферична геоцентрична, статична чи прив'язана до обертання землі тощо), вивчати розрахунки у неевклідовій метриці (відстані між точками на поверхні землі), досліджувати різні проекції географічних карт Землі і розрахунки координат і відстаней на них, вивчати методи екстраполяції руху супутників за даними їхніх ефемерид.

Перелік посилань

1. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Картгеоцентр, 2004. — 355 с.
2. Офіційний сайт *NAVSTAR GPS* [електронний ресурс]. Адреса: <http://www.gps.gov>
3. Офіційний сайт ГЛОНАСС [електронний ресурс]. Адреса: <http://glonassiac.ru>
4. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. — М.: Эко-Трендз, 2000. — 270 с.
5. *SpaceTrack Reeport* [електронний ресурс]. Адреса: <http://www.celestrak.com/NORAD/documentation/spacetrk.pdf>
6. *CelesTrak* [електронний ресурс]. Адреса: <http://celestrak.com>

Статтю подано до редакції 12.12.2015