

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ШИШКОВ ФЕДІР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 629.3.072:629.7:629.783(043.3)

**АВТОНОМНА НАВІГАЦІЯ СЕРВІСНИХ КОСМІЧНИХ
АПАРАТІВ ЗА СИГНАЛАМИ ГЛОБАЛЬНОЇ
НАВІГАЦІЙНОЇ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ**

Спеціальність 05.22.13 – Навігація та управління рухом

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2018

Дисертація є рукопис.

Роботу виконано в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, с.н.с.

КОНІН Валерій Вікторович

Національний авіаційний університет,
професор кафедри аеронавігаційних систем

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,

МАШКОВ Олег Альбертович

Державна екологічна академія
післядипломної освіти та управління,
проректор з наукової роботи;

кандидат технічних наук, професор

НАРИТНИК Теодор Миколайович

Директор інституту електроніки та зв'язку
Української академії наук
національного прогресу

Захист відбудеться « 16 » жовтня 2018 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, НАУ.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці НАУ за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розіслано « » вересня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., проф., с.н.с.



С. В. Павлова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Супутникові технології знайшли своє застосування у сферах зв'язку, телекомунікацій, забезпечення навігації, спостереження за метеорологічною ситуацією, у роботі геодезистів, моряків, у сільському господарстві, логістиці, тощо. На кінець 2017 року навколоземні орбіти вміщували більше ніж 1,700 активних супутників, більша частина яких знаходиться на низьких навколоземних орбітах (ННО). Будь-який технічний засіб має свій строк експлуатації. Після розробки нового засобу людина паралельно шукає можливості для збільшення строку його активного використання. Важко собі уявити сучасні прилади без можливості їх ремонту або обслуговування. Реалізація цієї ідеї має великий потенціал як для власників космічних апаратів (КА), так і серйозний ринковий потенціал, дозволяє замислитись про відокремлення космічного сервісу як окремого виду бізнесу. Більше того, частина супутників, що витратили свої експлуатаційні можливості, так і залишилися на орбіті у формі зайвого сміття, становлячи небезпеку для інших супутників на цих же орбітах, або при їх виведенні на орбіту. Космічне сміття, що являє собою непрацюючі космічні апарати, або їх уламки, становить серйозну загрозу для майбутнього розвитку, та навіть існуванню космічної галузі.

Це вказує на необхідність дозаправки КА, ремонту та заміни окремих модулів і блоків, переміщенню КА на орбіті та між орбітами, збірці складних космічних об'єктів та утилізації космічного сміття. Таким чином з'явився новий вид людської активності у космічному просторі – орбітальне сервісне обслуговування (ОСО) КА, що включає навігаційне забезпечення спеціалізованих сервісних космічних апаратів (СКА).

У дисертації вирішено актуальну науково-практичну задачу оцінювання характеристик автономної навігації у навколоземному космічному просторі по сигналам ГНСС для сервісних космічних апаратів, що має важливе значення при проведенні операцій орбітального сервісного обслуговування та утилізації космічного сміття.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Тема дисертаційної роботи та отримані результати відповідають проблематиці бюджетної теми, що виконувалася у Національному авіаційному університеті. Дисертаційна робота виконана згідно до плану бюджетних науково-дослідних робіт по темі № держресстрації 0114U001602 Інв. №945 – ДБ14. «Супутникова навігація космічних апаратів в нестійкому навігаційному полі в задачах утилізації космічного сміття»

Мета роботи та задачі дослідження. Метою дисертації є удосконалення моделі для оцінювання характеристик автономної навігації сервісних космічних апаратів на геостационарній орбіті за сигналами ГНСС.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Удосконалення математичної моделі радіонавігаційного поля для автономної навігації сервісних космічних апаратів на геостационарній орбіті з використанням ГНСС;

2. Розробка алгоритму оцінювання доступності та точності автономної супутникової навігації на геостационарній орбіті для КА;

3. Дослідження точності та доступності автономної навігації для масиву позицій КА на геостационарній орбіті за рахунок однієї або спільного використання декількох ГНСС по сигналам, що проходять крізь основні та бокові пелюстки діаграми спрямованості;

4. Дослідження впливу геометричного розташування навігаційних супутників на фактори погіршення точності та навігаційні характеристики при використанні ГНСС у локальній точці на геостационарній орбіті;

5. Розробка та застосування апаратно-програмного комплексу для напівнатурного дослідження точності та доступності супутників на геостационарній орбіті за допомогою приймача на Землі.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення навігації космічних апаратів у навколоземному просторі.

Предметом дослідження є процес забезпечення автономної навігації сервісних космічних апаратів по сигналам глобальної навігаційної супутникової системи у космічній області обслуговування.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у дисертації задач, а саме у процесі розробки та роботи моделі, використовувались методи статистичної радіотехніки, математичної статистики, матричне обчислення, методи обчислювальної математики та параметричного моделювання випадкових процесів. Достовірність та наукова обґрунтованість результатів підтверджувалась узгодженістю результатів теоретичних досліджень та комп'ютерного моделювання, та порівняння отриманих результатів з відомими даними незалежних дослідників та результатами вимірювань.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено модель радіонавігаційного поля, зокрема додано можливість використання загоризонтних супутників, для оцінювання навігаційних характеристик точності та доступності у космічній області обслуговування.

2. Вперше розроблено графоаналітичну модель інтегрального оцінювання ефективності навігаційного забезпечення на геостационарній орбіті при використанні сигналів ГНСС, що дозволяє відобразити значення точності та доступності для різних типових операцій, для масиву положень сервісних космічних апаратів на орбіті.

3. Вперше розроблено метод моделювання навігаційних характеристик при використанні сигналів ГНСС на геостационарній орбіті за допомогою наземного апаратно-програмного комплексу, що дозволяє оцінювати навігаційні характеристики у лабораторних умовах для напівнатурного моделювання супутникової навігації на геостационарній орбіті.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Показана принципова та технічна можливість автономної навігації у космічному просторі по сигналам ГНСС, що дозволяє використання супутникових приймачів для сервісних космічних апаратів на геостационарній

орбіті. При цьому теоретично можливо забезпечити повну доступність навігації з точністю до 100 м при використанні двох сузір'їв ГНСС.

2. Удосконалена модель радіонавігаційного поля дозволяє оцінювати характеристики точності та доступності для сервісних космічних апаратів у навколосезному просторі. На відміну від стандартної моделі, область використання удосконаленої моделі розширена до космічної області обслуговування;

3. Досліджено точність та доступність автономної навігації для масиву позицій на геостаціонарній орбіті за рахунок однієї або спільного використання декількох ГНСС по сигналам, що проходять крізь основні та бокові пелюстки діаграми спрямованості;

4. Досліджено вплив геометричного розташування навігаційних супутників на фактори погіршення точності та навігаційні характеристики при використанні ГНСС у локальній точці на геостаціонарній орбіті;

Практичні результати роботи підтверджено актом впровадження у конструкторському бюро акціонерного товариства «НВК «КУРС».

Особистий вклад здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У працях, написаних у співавторстві, особистий внесок автора такий: у роботі [1] сформулював проблему, провів дослідження автономної супутникової навігації та показав базові елементи моделі радіонавігаційного поля; у роботі [2] зробив опис графоаналітичної моделі, що висунута на захист; у роботах [3], [6] автор поставив задачу, виконав дослідження супутникових систем, зокрема навігаційних характеристик та особливостей формування похибок; у роботі [4] сформулював задачу, створив програмний продукт у середовищі Matlab та провів дослідження навігаційної системи; у роботі [5] сформулював задачу, провів дослідження впливу сонячної радіації на роботу супутникових систем; у роботах [7], [8] сформулював задачу та отримав результати досліджень; у роботах [10] - [20] постановив задачу, створив та удосконалив алгоритм підрахунку точності та доступності.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: конференція Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи, НЦУВКЗ, 20.10. 2017, Київ, 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium. Kyiv, Ukraine, August, 29–31, 2017, 17th Ukrainian Conference on Space Research. – Odesa, August, 21–25, 2017, Авіа–2017. Матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф., 19–21 квітня 2017 р., МРФ–2017. Конференція «Радиолокація. Спутникова навігація. Радиомоніторинг», 24–26 октября 2017 Харьков, 2016 IEEE Radar Methods and Systems Workshop. – Kyiv, Ukraine, September 27–28, 2016, the seventh World Congress. Aviation in the XXI- st Century. Safety in Aviation and Space Technologies, September 19–21, 2016.– Kyiv: NAU.– 2016, МНТК Авіа-2015. – Національний авіаційний університет 28–29 квітня 2015, Київ, 5-я Международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее», Днепропетровск 19-21 мая 2015г, 14-а Українська конференція з космічних досліджень. – Ужгород 8–12 вересня

2014 р, Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии» МРФ-2014.– Харьков 14–17 октября 2014 г, International Congress. Aviation in the XXI-st century”, “Safety in Aviation and Space Technologies”, September 23–25, 2014, Kyiv.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 20 наукових праць, з яких 6 статей у фахових виданнях (всі включено до міжнародних наукометричних баз Web of Science, Index Copernicus International, DOAJ, PИИЦ) та 14 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний зміст дисертації викладений на 160 сторінках друкованого тексту. Робота містить 94 рисунка та 13 таблиць. Додатки розміщені на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертації, сформульовано мету і задачі дисертаційного дослідження, об'єкт, предмет і методи дослідження, визначено наукову новизну отриманих результатів та практичне значення роботи, наведено дані про особистий внесок аспіранта, впровадження результатів, їх апробацію та публікації.

У першому розділі проведено аналіз передмов виникнення та основні задачі орбітального сервісного обслуговування (ОСО), аналізу та класифікації космічного сміття як подальшої загрози для розвитку людства у космічній сфері, розподіл Землі та навколоземного простору на області обслуговування, радіонавігаційне поле (РНП) та особливості використання супутникової навігації у навколоземному просторі.

Серед найважливіших задач ОСО можна виділити наступні:

1. Інспекція технічного стану цільового космічного апарату (КА);
2. Переміщення цільового КА по поточній орбіті та з орбіти на орбіту;
3. Дозаправка та заміна компонентів (ремонт, оновлення) цільового КА;
4. Збірка складних космічних об'єктів;
5. Утилізація космічного сміття з використання сервісного космічного апарату (СКА).

Значну увагу приділено питанням класифікації та аналізу космічного сміття, утилізація якого є важливою задачею для СКА.

У розділі розглянуто розподіл зони обслуговування супутників на дві області. Ці області називають наземною областю обслуговування (НОО) та космічною областю обслуговування (КОО).

До НОО відносять поверхню Землі та 3000 км для системи GPS (2000 для системи ГЛОНАСС) навколоземного простору. Вважається, що у цій зоні користувачу завжди доступна необхідна для визначення місцеположення кількість супутників.

До КОО відносять навколоземний простір від границі НОО до 36000 км (приблизних висот знаходження геостационарної та геосинхронних орбіт). На даний момент немає чітких вимог щодо доступності супутників у цій зоні.

Визначення навігаційних характеристик користувача з використання супутникових навігаційних систем у навколосезному просторі здійснюється у так-званому радіонавігаційному полі (РНП), яке формується радіосигналами навігаційних супутників. За умови використання лише однієї супутникової системи, для визначення координат в тривимірному просторі необхідно, щоб приймач користувача одночасно приймав сигнали щонайменше від чотирьох супутників. При віддаленні об'єкту від поверхні Землі більш ніж 2000 км для ГЛОНАСС та 3000 км для GPS, тобто входженні у КОО, можна говорити про нестійке РНП, в якому можливість одночасного прийому сигналів від чотирьох навігаційних супутників однієї системи не гарантована.

РНП представляє собою накладення електромагнітних хвиль, що випромінюються усіма навігаційними супутниками в межах основного пелюстка ДС антени супутника як це показано на рис. 1.

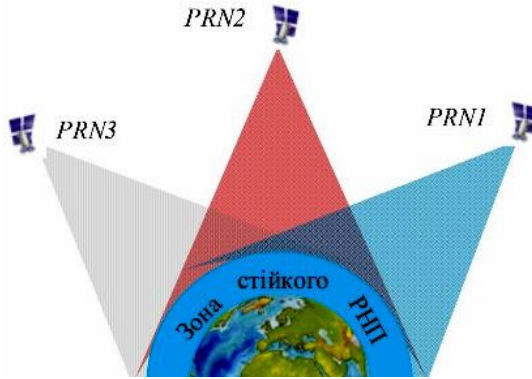


Рис. 1. Взаємне накладення електромагнітних полів

Визначення координат у тривимірному просторі виконується за даними, отриманим від чотирьох супутників із задовільним геометричним розташуванням щодо об'єкта, для якого обчислюється місце розташування. При невиконанні зазначеної умови радіонавігаційне поле вважається нестійким.

У другому розділі викладено особливості побудови складної моделі РНП у навколосезному просторі. Основні навігаційні супутники ГНСС знаходяться на орбітах висотою близько до 20000 км над поверхнею Землі. Виникають сумніви у можливості виявлення необхідної кількості супутників для вирішення навігаційної проблеми для космічних апаратів (КА) як до висоти знаходження супутників, так і над нею. Оскільки у навігаційних супутників відсутнє зворотне випромінювання антен, то необхідне інше рішення для знаходження місцеположення на високих орбітах.

Для забезпечення супутникової навігації у КОО використовуються «загоризонтні супутники», тобто супутники, що знаходяться за Землею по відношенню до КА. На рис. 2 дано приклад такого загоризонтного супутника.

У центрі рисунку зеленим колом зображена Земля, зліва умовно зображено супутник. Діаграма спрямованості супутника розділена на основну та бокові пелюстки. Сигнали, що проходять крізь основний пелюсток, частково затінені Землею, але частину сигналів все ще можна прийняти. Сигнали, що проходять крізь бокові пелюстки, значно слабкіші за сигнали, що проходять крізь основний пелюсток діаграми спрямованості, але їх все ще можливо прийняти на геостационарній орбіті.

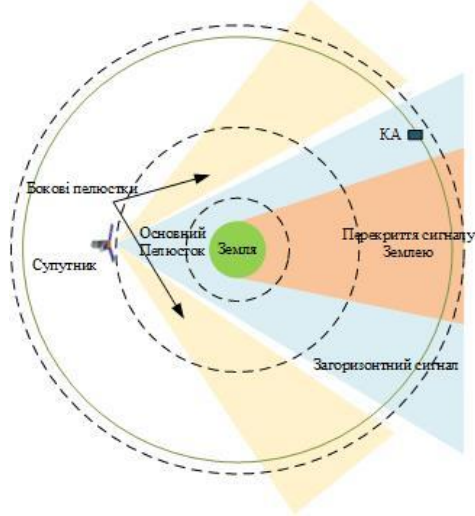


Рис. 2. Приклад загоризонтного супутника

Вищезгадана інформація дозволяє сформулювати модель радіонавігаційного поля у зоні знаходження СКА як сукупність наступних компонентів:

1. Оцінювання орбіт навігаційних супутників;
2. Фіксація часового параметру;
3. Визначення ефемерид супутників;
4. Визначення кутів закриття;
5. Характеристики діаграми спрямованості (ДС) антени навігаційних супутників з урахуванням кутів закриття;
6. Прийом сигналів у космічній області обслуговування;
7. Використання різних частот при передачі сигналів з навігаційних супутників;
8. Оцінювання наявності радіонавігаційного поля у космічній області обслуговування.

Для оцінювання можливостей прийому сигналів навігаційних супутників у першу чергу необхідно знати діаграми спрямованості їх антен. Антена решітка навігаційного супутника містить 12 випромінюючих елементів, які розташовані на двох концентричних колах і утворюють дві підґратки. Вісім

випромінюючих елементів розміщені на зовнішньому колі радіуса 438.82 мм (зовнішня підгратка), чотири – на внутрішньому колі радіуса 162.4 мм (внутрішня підгратка). Випромінюючим елементом є спіральна антена.

Оскільки ГНСС у першу чергу розраховані для навігації на поверхні Землі, то для КОО залишається лише вузький «промінь» від номінальної видимості основного пелюстка діаграми спрямованості супутника GPS за рахунок затінення сигналу планетою.

Природно, що це значно обмежує видимість та не дозволяє визначити координати КА на великих висотах КОО лише за допомогою основних пелюсток діаграм спрямованості супутників і виникає необхідність застосовувати «спідницю» основного пелюстка та бічні пелюстки діаграми спрямованості супутника GPS, де рівень потужності сигналу значно нижчий ніж у основному пелюстку.

На рис. 3 (*a*, *б*) зображені об'ємні діаграми спрямованості для частот L1 та L2 (*a* та *б* відповідно) побудовані у Matlab за вихідними даними Lockheed Martin.

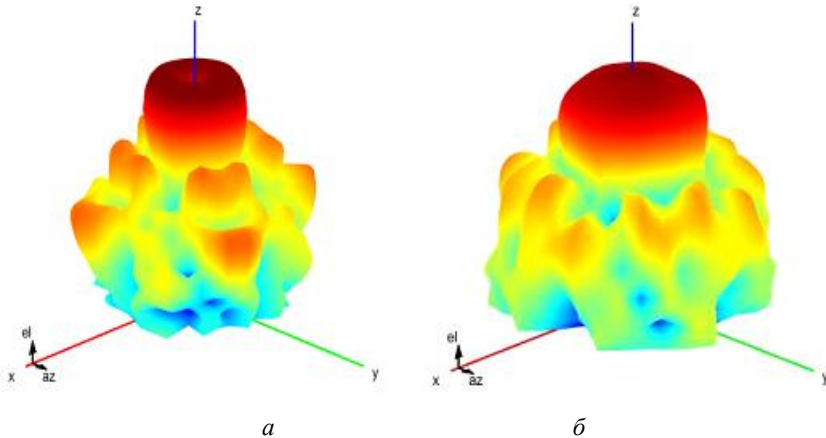


Рис. 3. Об'ємні діаграми спрямованості антени супутника GPS
a – для частот L1; *б* – для частот L2

Зверху зображені найбільш сильні сигнали, які з найбільшою імовірністю можна прийняти на ГЕО орбіті, при русі вниз помітне поступове зниження потужності сигналу. Як видно з рисунка, основний пелюсток діаграми спрямованості на частоті L2 ширший за відповідний у L1, що також впливає на бокові пелюстки.

Нехай маємо координати області, де знаходиться КА. Координати сервісного КА у загальному вигляді обчислюються з використанням значень псевдодальності видимих навігаційних супутників. Видимі навігаційні супутники можуть належати до різних навігаційних систем.

Під геометричною видимістю навігаційних супутників розуміємо теоретичну можливість прийняти сигнал навігаційного супутника за допомогою приймача на КА, що зумовлено особливостями діаграми спрямованості супутника та областю затінення від Землі у випадку використання загоризонтних супутників.

Згідно до матеріалів розділу вважаємо, що сигнали супутників у межах від $\pm 13.8^\circ$ (затінення Землею) до $\pm 23.5^\circ$ та від $\pm 13.8^\circ$ до $\pm 26^\circ$ для основних пелюсток діаграм спрямованості на частотах L1 та L2/L5 відповідно, і сигнали від $\pm 30^\circ$ до $\pm 60^\circ$ для бокових пелюсток при умові використанні обох частот є видимими. Вважається, що сигнали супутників проходять вище за іоносферу Землі, а сигнали супутників, що видимі лише за рахунок іоносфери, не можна використовувати для розрахунку навігаційної задачі.

У **третьому розділі** представлено втілення удосконаленої моделі РНП у вигляді алгоритму та графоаналітичної моделі.

Алгоритм можна розділити на ряд модулів, призначених виконувати окремі функції. На рис. 4 представлено структурну блок-схему алгоритму.

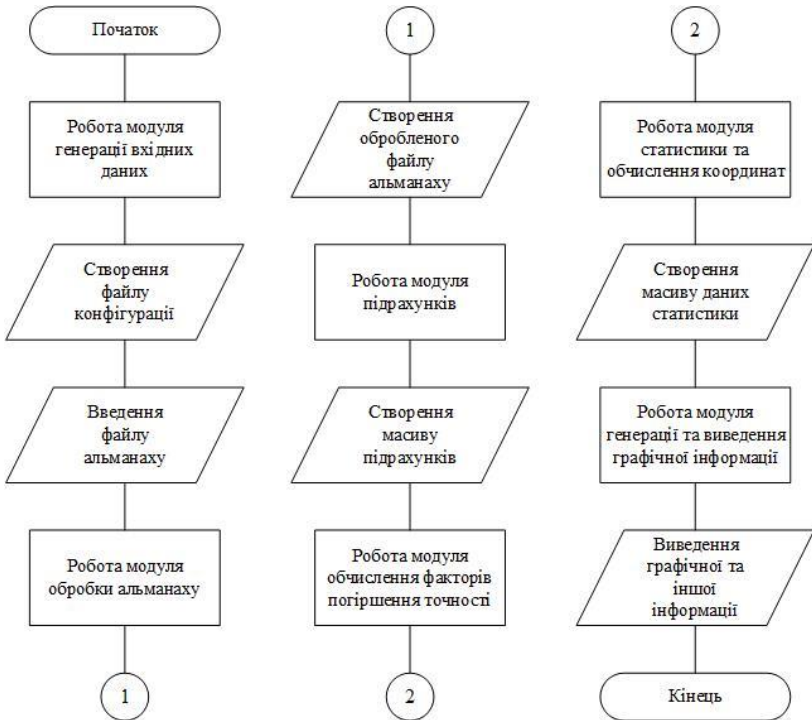


Рис. 4. Структурна блок-схема алгоритму

До складу основних модулів входять:

1. Модуль генерації вхідних даних – використовується для введення даних у програму та їх обробки для зручного використання;
2. Модуль обробки альманаху – читання, обробка даних альманаху;
3. Модуль підрахунків
 - а) Обчислення дати у форматі супутникового часу;
 - б) Трансформація координат точки з географічних координат у систему ECEF;
 - в) Обчислення даних супутників та вибору видимих – обчислення даних наявних супутників, вибір «видимих» супутників;
4. Модуль обчислення факторів погіршення точності – обчислення факторів погіршення точності для кожної точки в кожен момент часу;
5. Модуль статистики та обчислення координат – обчислення координат заданої точки за рахунок псевдо відстані до супутників, при введенні нормальних помилок з заданим σ . Накопичення статистики, обчислення DOP факторів для отриманих точок;
6. Модуль генерації та виведення графічної інформації – виведення на екран заданих графіків, виведення на екран додаткових графіків.

Для вирішення навігаційної задачі, тобто для встановлення місцеположення користувача, у супутникових системах використовується псевдодальномірний метод. Сутність даного методу полягає у визначення відстаней між навігаційними супутниками та КА задля знаходження його координат.

Якщо координати КА оцінюються за допомогою однієї супутникової системи, то при одночасному розрахунку трьох координат та різниці часової шкали супутника і приймача (тобто чотири невідомі величини) (рис. 5) псевдодальномірним методом необхідно знати відстань між КА та хоча б чотири навігаційними супутниками.

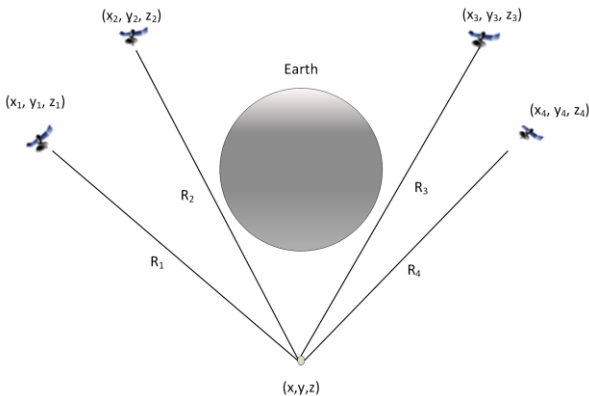


Рис. 5. Визначення координат користувача псевдодальномірним методом у КОО

У випадку спільного використання декількох систем необхідно визначати різницю часової шкали для кожної системи, що збільшує мінімально необхідну кількість рівнянь.

Ці відстані вимірюються між фазовими центрами передавальної антени навігаційного супутника та прийомної антени КА та використовуються для формування рівнянь для оцінки значень координат та різниці шкал часу.

На рис. 5 – R_i – псевдодальність до i -того супутника, $(x; y; z)$ – координати користувача, $(x_i; y_i; z_i)$ – координати i -того супутника.

Виміряні відстані між i -тим навігаційним супутником та користувачем називають псевдодальностями до i -того супутника. Псевдодальність є розрахунковою величиною i вимірюється як добуток швидкості розповсюдження електромагнітних хвиль та часу, під час якого сигнал супутника досягає користувача (КА). Цей час вимірюється у апаратурі користувача.

Отже, оскільки маємо 3 координати та враховуємо різниці шкал часу Δt отримуємо наступне рівняння:

$$R_i = \sqrt{((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2)} + c\Delta t \quad (1)$$

Але, різниця у шкалах часу між навігаційним супутником та користувачем є не єдиним джерелом похибок, тому у загальному вигляді рівняння (1) можна записати наступним чином:

$$R_i = \sqrt{((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2)} + c\Delta t + \Delta_i \quad (2)$$

де Δ_i – похибки визначення псевдодальності i -го супутника за рахунок похибок визначення ефемерид, частотно-часового забезпечення, швидкості розповсюдження радіохвиль у тропосфері та іоносфері, шуму у місці прийому, шуму прийомного каналу апаратури користувача, а також сонячної радіації, тощо.

Згідно до результатів дослідження EGNOS у НАУ відомо, що похибки вимірювання псевдодальності користувача мають випадкову природу та наближені до нормального закону розподілу.

Значення похибки вимірювання псевдодальності користувача Δ_i для формули (2) розраховуються наступним чином:

$$UERE = \sqrt{(\Delta_{sys}^2 + \Delta_{user}^2)}, \quad (3)$$

де $UERE$ – похибки вимірювання псевдодальності користувача;

Δ_{sys} – системна похибка вимірювання псевдодальності;

Δ_{user} – похибка вимірювання псевдодальності за рахунок місцеположення та апаратури користувача.

Системна похибки вимірювання псевдодальності з рівняння (3) визначається як квадратний корінь з суми квадратів похибок системного сегменту GPS.

$$\Delta_{sys} = \sqrt{\sum_k^n \Delta_k^2}.$$

Якщо прийняти значення похибки користувача у 1 м, то маємо наступні значення похибки вимірювання псевдодальності користувача *UERE*:

1. Значення *UERE*: при свіжих значеннях дорівнює 3.24 м
2. Значення *UERE*: при стандартних операціях дорівнює 4.12 м
3. Значення *UERE*: при граничних операціях дорівнює 6.63 м

Для оцінки характеристик автономної навігації на геостаціонарній орбіті необхідно, у першу чергу, розглянемо такі характеристики як доступність та точність.

Для оцінки доступності було використано наступні вимоги до операцій:

1. Рух у просторі – значення похибки вимірювання по трьом координатам не має перевищувати 556 м (подібно до вимог аеродромної зони літаків), для зручності задана типова операція 1 (ТО1);

2. Операції автономної навігації – значення похибки вимірювання по трьом координатам не має перевищувати 100 м, для зручності задана типова операція 2 (ТО2);

3. Наближення до цілі – значення похибки вимірювань у горизонтальній площині до 40 м, та 20 м у вертикальній площині (подібно до APV-2), для зручності задана типова операція 3 (ТО3).

Доступність вираховується як відсоток ітерацій, які задовольняють висунуті зверху умови відповідно до операції, по відношенню до загальної кількості ітерацій:

$$Av = \frac{\sum_{i=0}^n \begin{cases} 1, RMS3D \leq AL \\ 0, RMS3D > AL \end{cases}}{n},$$

де *AL* – граничне значення точності згідно з вимогами до операцій вище.

Точність визначається у координатній системі ENU.

Для відтворення результатів моделювання була запропонована графоаналітична модель інтегрального оцінювання якості навігації на геостаціонарній орбіті. Модель дозволяє стисло та конкретно, у зручній формі, показати результати оцінювання точності та доступності для кожного орбітального слоту. Приклад використання даної моделі наведено у четвертому підрозділі.

У четвертому розділі проведено дослідження якості автономної навігації для масиву позицій на геостационарній орбіті.

У даному розділі розглянуто як окреме використання сигналів, що проходять крізь основну пелюстку діаграм спрямованості супутників різних комбінацій навігаційних сузір'їв ГНСС, так і спільне використання сигналів, що проходять як крізь основний так і бокові пелюстки діаграм спрямованості супутників. Таблиця 1 містить загальні результати вимірювань з використанням основного пелюстка ДС.

Таблиця 1

Результати вимірювання по основному пелюстку ДС

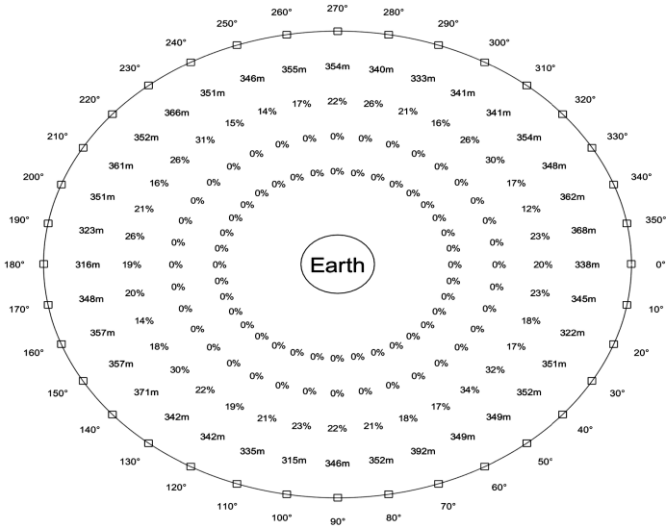
СКВ UREE, м	GPS		GPS та ГЛОНАСС		Мульти-ГНСС		
	Мін. точність , м	ТО1, %	Мін. точність, м	ТО1, %	Мін. точність, м	ТО1, %	ТО2, %
3.24	128.7	11.29	125.56	25.38	–	–	–
4.12	172.2	9.02	144.13	21.29	48.47	57.23	10.86
6.63	282.04	4.23	246.34	10.93	–	–	–

Як видно з табл. 1, використання більшої кількості сузір'їв дозволяє отримати кращі результати, у випадку використання одного сузір'я порівняно з використанням двох маємо покращення результатів більше ніж у 2 рази. У випадку спільного використання ГНСС результати цікавіші – незважаючи на підвищення загальної доступності, насправді значні покращення маємо лише у зонах, де видно геосинхронній та геостационарні навігаційні супутники. Тобто значне покращення точність та доступності спостерігається лише у деякому секторі.

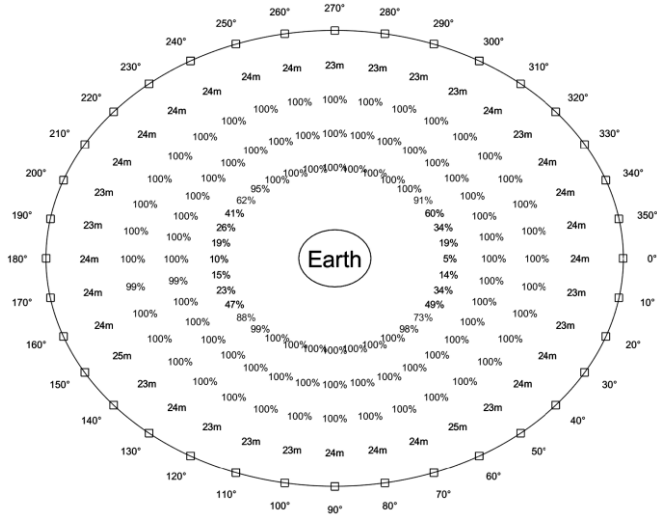
Результати вимірювань отримані у 24-годинній симуляції з кроком у 5 хв., при цьому для кожної точки у кожен момент часу сформовано до 400 реалізацій. Точки на орбіті обрані з кроком у 10° починаючи з 0° .

Для представлення результатів використовується графоаналітична модель, як наприклад на рис. 6 (а, б).

Зовнішнє коло на рисунку відображає номер «слоту» (довготу) супутника на геостационарній (ГЕО) орбіті. Наступне суцільне коло умовно відображає знаходження геостационарної орбіти відносно Землі, яка нарисована у центрі. Наступне коло зображає точність, яка являє собою навігаційну похибку користувача (НПК) за умови усереднення результатів вимірювань для доступних вимірів ТО1, дана величина вимірюється у метрах. Далі кола зображають типові операції у наступному порядку: ТО1, ТО2, ТО3 згідно до переліку операцій вище. Рисунок а створено при використанні лише супутників, сигнали яких проходять лише крізь основні пелюстки діаграм спрямованості антен, тоді як б відображає результати використання супутників, сигнали яких проходять як крізь основні, так і крізь бічні пелюстки.



a



б

Рис. 6. Графоаналітична модель представлення результатів доступності
 а – при використанні основного пелюстка GPS;
 б – при використанні основного та бокових пелюстків GPS

В табл. 2 маємо загальні результати вимірювань по доступності з використанням основного та бокових пелюсток діаграми спрямованості. Як видно з таблиці 2, використання двох супутникових сузір'їв по основному та боковим пелюсткам дозволяє забезпечити автономну супутникову навігацію на всьому часовому проміжку, а також покращує значення вертикальної доступності для ТОЗ.

Таблиця 2

Результати вимірювання по основному та бокових пелюстках ДС

СКВ UERE, м	GPS		
	Гориз. доступність (ТОЗ) %	Вертик. доступність (ТОЗ) %	Автономна навігація (ТО2) %
3.24	99.2	65	99.9
4.12	95.94	45.29	99.9
6.63	52.88	23.26	98.6
СКВ UERE, м	GPS та ГЛОНАСС		
3.24	99.97	95.15	100
4.12	99.96	69.45	100
6.63	93.79	35.69	100

У п'ятому розділі досліджено вплив геометричного розташування навігаційних супутників при використанні ГНСС у локальній точці на геостационарній орбіті.

Хоча загальний огляд орбіти дає уявлення про параметри доступності та точності на ГЕО, варто також зробити детальний аналіз особливостей супутникової навігації на ГЕО у одній точці. Для цього була обрана точка на ГЕО орбіті з довготою у 80° , що відповідає місцезнаходженню супутника Astra 5-B (супутник для трансляції навігаційних даних EGNOS), що покриває територію Європи. Симуляція проведена у 24-годинному часовому інтервалі по 1 хвилині.

При окремому використанні сузір'я ГНСС для сигналів у межах основної пелюстки діаграми спрямованості антен навігаційних супутників значення доступності склали 8.125 % – 2.153 % для операції ТО1 при найкращому та найгіршому сценарію відповідно. Жодне значення не задовольняє умови для інших операцій. А, отже, використання даної конфігурації не підходить для забезпечення операцій автономної супутникової навігації.

При використанні двох сузір'їв ГНСС для сигналів у межах основної пелюстки діаграми спрямованості антен навігаційних супутників значення доступності склали 23.47 % – 10 % для операції ТО1 при найкращому та найгіршому сценарію відповідно. Жодне значення не задовольняє умови для інших операцій. Порівняно з використанням лише одного сузір'я результати кращі, але все ще не відповідають умовам забезпечення автономної супутникової навігації.

При окремому використанні сузір'я ГНСС для сигналів у межах основної та бокових пелюсток діаграми спрямованості антен навігаційних супутників значення доступності склали 100 % – 99.93 % для операції TO2 при найкращому та найгіршому сценарію відповідно на денному. Це дозволяє забезпечити автономну супутникову навігацію при використанні основного та бокових пелюсток навіть одного сузір'я ГНСС. Використання двох сузір'їв ГНСС дозволяє покращити результати навіть при найбільших значеннях похибок.

Розроблено метод моделювання навігаційних характеристик при використанні сигналів ГНСС на геостационарній орбіті за допомогою апаратно-програмного комплексу на поверхні Землі, що дозволяє оцінювати навігаційні характеристики у лабораторних умовах. За рахунок даного методу було проведено експеримент для перевірки впливу геометричних конфігурацій супутникових сузір'їв на фактори погіршення точності.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено актуальну науково-практичну задачу оцінювання характеристик автономної навігації у навколосемному космічному просторі по сигналам ГНСС для сервісних космічних апаратів, що має важливе значення при проведенні операцій орбітального сервісного обслуговування та утилізації космічного сміття.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Удосконалено традиційну модель радіонавігаційного поля, що дозволяє оцінювати навігаційні характеристики точності та доступності у наземній області обслуговування. За рахунок сигналів навігаційних супутників, що випромінюють з основного та бокових пелюсток антен, модель було удосконалено для оцінювання характеристик у космічній області обслуговування, до геостационарної орбіти. При цьому отримані аналітичні вирази, що поєднують кути видимості навігаційних супутників, тобто напрям випромінювання сигналів їх антен, з експериментальними даними діаграми спрямованості антен супутників. Удосконалена модель РНП складається з оцінювання орбіт навігаційних супутників, фіксації часового параметру, визначення ефемерид супутників, визначення кутів закриття, характеристик діаграми спрямованості (ДС) антени навігаційних супутників з урахуванням кутів закриття, прийому сигналів у космічній області обслуговування, використання різних частот при передачі сигналів з навігаційних супутників, оцінювання наявності радіонавігаційного поля у космічній області обслуговування.

2. Методами математичного моделювання встановлено, що використання лише основних пелюсток діаграм спрямованості антен навігаційних супутників не може забезпечити неперервну навігацію на геостационарній орбіті навіть при спільному використанні GPS, GALILEO, BeiDou, ГЛОНАСС, QZSS. Лише 10.86 % вимірювань задовольняють вимоги для виконання операцій автономної супутникової навігації, тобто лише дана кількість вимірювань має точність до 100 м від загальної кількості

вимірювань по орбіті. Дана точність забезпечується лише у вузькій смузі орбіти за рахунок видимих супутників QZSS.

3. Розроблено графоаналітичну модель інтегрального оцінювання якості навігації на геостационарній орбіті при використанні сигналів ГНСС, що дозволяє відобразити значення точності та доступності для різних типових операцій, для масиву положень сервісного космічного апарату на орбіті у стислій формі.

4. Розроблено метод моделювання навігаційних характеристик при використанні сигналів ГНСС на геостационарній орбіті за допомогою апаратно-програмного комплексу на поверхні Землі, що дозволяє оцінювати навігаційні характеристики у лабораторних умовах. За рахунок даного методу було проведено експеримент для перевірки впливу геометричних конфігурацій супутникових сузір'їв на фактори погіршення точності, і, як наслідок, на характеристики точності та доступності. Важливою особливістю даного експерименту і методу є використання реального супутникового приймача для отримання результатів.

За результатами досліджень було встановлено, що забезпечення автономної супутникової навігації можливе лише при використанні сигналів супутників, що проходять крізь основний та бокові пелюстки діаграми спрямованості для, як мінімум, одного сузір'я ГНСС, а стабільне використання з високою доступністю лише при наявності як мінімум двох сузір'їв ГНСС.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. V. Konin and F. Shyshkov, "Autonomous navigation of service spacecrafts on geostationary orbit using GNSS signals", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 59, no. 12, pp. 562–566, 2016. DOI: 10.3103/S0735272716120049 (Scopus)

2. Ф. О. Шишков та В. В. Конін, «Графоаналітична модель інтегрального оцінювання якості супутникової навігації на геостационарній орбіті,» *Вісник Інженерної Академії України*, № 4, с. 21–25, 2017.

3. F. Shyshkov, V. Konin, «European geostationary navigation overlay service in Ukraine,» in *Proceedings of the National Aviation University*, v. 2, pp. 23–26, 2015.

4. V. Kharchenko, Y. Varabanov, A. Grekhov and F. Shyshkov, «Modeling of airborne collision avoidance system performance using Matlab,» *Proceedings of the National Aviation University*, no. 3, pp. 13–17, 2013. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnau_2013_3_4. [Accessed: 13 May 2018].

5. S. Polishchuk, Y. Chynchenko and F. Shyshkov, "Aviation accidents and incidents in USA during 23rd solar cycle", *Proceedings of National Aviation University*, vol. 51, no. 2, 2012, pp. 30–34. DOI:10.18372/2306–1472.51.2153

6. V. Konin та F. Shyshkov, «Extending the Reach of SBAS Some Aspects of EGNOS Performance in Ukraine,» in *InsideGNSS*, v. January– February, pp. 50–54, 2015.

7. F. Shyshkov, O. Pogurelskiy and V. Konin, "Differences in measurements with separate use of frequencies L1 and L2 for the application of satellite navigation in near-earth space," in 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS), Kyiv, Ukraine, August 29–31, 2017, pp. 67–70. DOI: 10.1109/MRRS.2017.8075028 (Scopus)

8. V. Konin, F. Shyshkov and O. Pogurelskiy, "Estimation of coordinates on geostationary orbit by using GNSS signals," in 2016 IEEE Radar Methods and Systems Workshop (RMSW), Kyiv, Ukraine, September 27–28, 2016, pp. 32–35. DOI: 10.1109/RMSW.2016.7778544 (Scopus)

9. V. Vasiliev, V. Konin, F. Shyshkov, S. Matvienko, L. Godunok and O. Pogurelskiy, "The navigation on the geostationary orbit using signals from global navigation satellite systems", Abstracts of 17th Ukrainian Conference On Space Research, August 21–25, 2017, p. 192.

10. Ф. А. Шишков и В. В. Конин, «Моделирование параметров навигации спутников на геостационарной орбите с помощью аппаратно-программного комплекса,» в 6-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2017. Конференция «Радиолокация. Спутниковая навигация. Радиомониторинг». Сб. научных трудов, Харьков, 2017, с. 187–190.

11. Ф. О. Шишков та В. В. Конин, «Дослідження супутникової навігації для космічних апаратів,» в Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи. Тези доповідей, Київ, 2017, с.15.

12. F. Shyshkov, V. Konin and E. Kovalevskiy, «Concept of group debris cleaning using unmanned servicing spacecraft,» Proceedings of the seventh World Congress. Aviation in the XXI- st Century. Safety in Aviation and Space Technologies, pp. 2.34–2.37, 19–21.09.2016.

13. Ф. Шишков, В. Конин и А. Погурельский, «GNSS availability on geostationary orbit,» 5-я международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее» : тезисы доклада. – Днепропетровск : КБ «Южное», р. 82, 18 – 21.05.2015.

14. Ф. Шишков, В. Конин і О. Погурельский, «Use of GNSS for autonomous navigation on medium Earth orbits,» Авіа–2017. Матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф., с. 12.25–12.29, 19–21.04.2017.

15. Ф. А. Шишков, В. В. Конин и А. С. Погурельский, «Модель для оценки доступности спутников навигационных систем для объектов на высотах до 36 000 км,» 14-а Українська Конференція з Космічних Досліджень , с. 100, 8–12.09.2014.

16. Ф. О. Шишков, В. В. Конин та О. С. Погурельский, «Тестирование модели для оценки доступности спутников навигационных систем на высотах до 36 000 км» в 14-а Українська Конференція з Космічних Досліджень, Ужгород, с. 127, 8–12.09.2014.

17. F. Shyshkov, V. Konin and O. Pogurelskiy, «Simulation of navigation satellites availability in the near-earth space,» Proceedings of the 6-th World

Congress. Aviation in the XXI – st Century. Safety in Aviation and Space Technologies, vol.2, pp. 3.2.26–3.2.29, 23–25.09.2014.

18. F. Shyshkov, V. Konin and O. Pogureskiy, «Model for navigation satellite availability on various Orbits analysis,» Proceedings of the 6–th World Congress. Aviation in the XXI- st Century. Safety in Aviation and Space Technologies, vol.2, pp. 3.2.22–3.2.25, 23–25.09.2014.

19. F. Shyshkov, V. Konin and O. Pogurelskiy, «Initial analysis of space debris hazard,» Proceedings of the 6-th World Congress. Aviation in the XXI- st Century. Safety in Aviation and Space Technologies, Kyiv, vol.2, pp. 3.2.18–3.2.21, 23–25.09.2014.

20. Ф. Шишков, В. Конин и А. Погурельский, «Near-earth space navigation using over-the-horizon satellites,» 5-й Междунар. радиоэлект-ронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», т.1, с. 205–206, 14–17.10.2014.

АНОТАЦІЯ

Шишков Ф. О. Автономна навігація сервісних космічних апаратів за сигналами глобальної навігаційної супутникової системи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.13 – Навігація та управління рухом – Інститут аеронавігації, електроніки та телекомунікацій НАУ України, Київ, 2018.

У дисертації удосконалено модель радіонавігаційного поля для автономної супутникової навігації сервісних космічних апаратів на геостационарній орбіті у області космічного обслуговування, що дозволяє оцінювати навігаційні характеристики по сигналам, які проходять крізь основний та бокові пелюстки діаграми спрямованості антен навігаційних супутників однієї або багатьох сузір'їв глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС). На основі моделі створено алгоритм. Для представлення результатів розроблено графоаналітичну модель інтегральної оцінки якості навігації на геостационарній орбіті при використанні сигналів ГНСС, що дозволяє відобразити значення точності та доступності для різних типових операцій, для масиву положень сервісного космічного апарату на орбіті.

Запропоновано метод моделювання навігаційних характеристик при використанні сигналів ГНСС на геостационарній орбіті за допомогою апаратно-програмного комплексу на поверхні Землі, що дозволяє оцінювати навігаційні характеристики у лабораторних умовах.

У роботі оцінено параметри точності та доступності для сервісних космічних апаратів у навколосемному просторі. Змодельовано навігаційну ситуацію на геостационарній орбіті за рахунок наземного апаратно-програмного комплексу. Досліджено особливості окремого використання частот L1 та L2 супутникової системи GPS для задачі навігації у космосі.

Ключові слова: глобальна навігаційна супутникова система, загоризонтні супутники, радіонавігаційне поле, точність, доступність

АННОТАЦИЯ

Шишков Ф. А. Автономная навигация сервисных космических аппаратов по сигналам глобальной навигационной спутниковой системы. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.22.13 – Навигация и управление движением – Институт аэронавигации, электроники и телекоммуникаций НАУ Украины, Киев, 2018.

В диссертации усовершенствована модель радионавигационного поля для автономной спутниковой навигации сервисных космических аппаратов на геостационарной орбите в области космического обслуживания, позволяет оценивать навигационные характеристики по сигналам, которые проходят через основной и боковые лепестки диаграммы направленности антенн навигационных спутников одного или многих созвездий глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). На основе модели создан алгоритм. Для представления результатов разработана графоаналитическая модель интегральной оценки качества навигации на геостационарной орбите при использовании сигналов ГНСС, что позволяет отобразить значения точности и доступности для различных типовых операций, для массива положений сервисного космического аппарата на орбите.

Предложен метод моделирования навигационных характеристик при использовании сигналов ГНСС на геостационарной орбите с помощью аппаратно-программного комплекса на поверхности Земли, позволяет оценивать навигационные характеристики в лабораторных условиях.

В работе оценены параметры точности и доступности для сервисных космических аппаратов в околоземном пространстве. Смоделирована навигационная ситуация на геостационарной орбите за счет наземного аппаратно-программного комплекса. Исследованы особенности отдельного использования частот L1 и L2 спутниковой системы GPS для задачи навигации в космосе.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система, загоризонтные спутники, радионавигационное поле, точность, доступность

ABSTRACT

Shyshkov F.O. Autonomous navigation of service space vehicles using the signals of the global navigation satellite system. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences (Ph.D.) in specialty 05.22.13 – Navigation and traffic management – Institute of air navigation, electronics and telecommunications NAU, Kyiv, Ukraine, 2018.

In the dissertation, the model of the radionavigation field for the autonomous satellite navigation of service space vehicles in the geostationary orbit in the field of space service is improved. This allows to evaluate the navigational characteristics of the signals passing through the main and lateral petals of the antenna pattern of the

navigational satellites of one or many global navigation satellite system (GNSS) constellations. To present the results, a graphic-analytic model of the integrated assessment of the quality of navigation in the geostationary orbit using the GNSS signals is developed, which allows to display the values of accuracy and availability for various typical operations, for an array of positions of the service spacecraft in orbit.

A method of modeling navigation characteristics using GNSS signals in a geostationary orbit using a hardware-software complex on the Earth's surface is proposed, which allows to evaluate the characteristics in laboratory conditions.

The work evaluates the parameters of accuracy and accessibility for service spacecraft in the near-Earth space. The navigation situation in the geostationary orbit has been simulated due to the ground hardware and software complex. The peculiarities of the separate use of frequencies L1 and L2 of the satellite GPS system for the space navigation problem are investigated.

Key words: global navigation satellite system, over-the-horizon satellites, radio navigation field, accuracy, availability

Підп. до друку 13.09.2018. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.
Тираж 100 пр. Замовлення № -1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002