

УДК 528.3:528.7:531.5

Бялик І. М., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕФЕКТІВ НА РЕЗУЛЬТАТИ ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКІВ

Визначено методи супутникової геодезії та дистанційного зондування землі, означено загальні принципи роботи цих систем та проаналізовано, які саме релятивістські ефекти можуть впливати на точність вимірювань. Намічено подальші кроки для досконалого вивчення впливу релятивістських ефектів на точність супутникових геодезичних спостережень.

Ключові слова: релятивістська механіка, дистанційне зондування Землі, GPS-вимірювання, точність.

Вступ. Невпинний розвиток науки і технологій суттєво змінює методики геодезичних вимірювань. Сучасні геодезичні прилади є електронними, а опрацювання даних спостережень відбуваються в спеціалізованих програмних продуктах за допомогою комп'ютерів. Все більше використовуються результати супутникових вимірювань, не дивлячись на великі відстані та інші перепони. Всі ці зміни потребують перегляду методологічних підходів не тільки до самих вимірювань, але й до опрацювання їх результатів. Адже забезпечення єдності вимірювань та необхідної точності є однією з найважливіших задач геодезії. Супутникові спостереження в геодезії почали використовуватися мало не з самого початку космічної ери. Для прикладу вперше штучний супутник Землі був запущений 4 жовтня 1957 р., та не пройшло двох років, як було зроблено і дешифровано перший космічний знімок. А за неповних десяти років було впроваджено супутникові навігаційні системи першого покоління (ЦИКАДА та TRANSIT), які стали прототипами сучасних GPS. Саме опрацювання результатів вимірювань цих систем лягли в основу при створенні сучасних систем координат WGS-84 та ITRS різних реалізацій, що використовуються практично у всьому світі. Таке ускладнення методів геодезичних вимірювань потребує розширення використання математичного апарату та використання фізичних законів при опрацюванні їх результатів. Так, наприклад, при опрацюванні результатів супутникових вимірювань недостатньо ви-

користувати лише евклідову геометрію та ньютонівську механіку, адже точність отриманих результатів не буде задовольняти сучасним вимогам. Таким чином, використання законів спеціальної та загальної теорії відносності при опрацюванні результатів супутникових вимірювань є обов'язковою умовою для досягнення необхідної точності.

Аналіз останніх досліджень. В світовій та вітчизняній науковій літературі впливу релятивістських ефектів на точність різних геодезичних супутникових вимірювань у порівнянні з іншими джерелами похибок присвячено відносно мало досліджень. Деякі ефекти не враховуються зовсім або враховуються частково і відсутня їх порівняльна характеристика та вплив на остаточні результати вимірювань. Вплив релятивістських ефектів на точність GPS-вимірювань частково врахований в роботах [1; 2]. Проте цей вплив враховується не повністю і в них не наведений порівняльний кількісний та якісний аналіз впливу різних релятивістських ефектів. Крім того, вплив кожного релятивістського ефекту враховується окремо, а загальна похибка становить їх алгебраїчну суму. Саме тому зовсім інший підхід було запропоновано в роботах [3; 4; 5; 6; 7; 8] для якомога більш повного врахування впливу релятивістських ефектів на точність GPS-вимірювань. Однак GPS-вимірювання, хоча і є надзвичайно популярним, проте не єдиним методом супутникових вимірювань, що використовуються в геодезії. Необхідні відомості з методів супутникової геодезії, систем координат, теорії відносності ми отримали з джерел [6; 7; 8; 9; 10].

Методика досліджень. На основі всіх вищеперелічених даних ми проведемо порівняльний аналіз методів супутникової геодезії, дистанційного зондування Землі та визначено джерела похибок, що обумовлені релятивістськими ефектами.

Постановка завдання. В даній статі нами визначено методи супутникової геодезії та дистанційного зондування землі, означено загальні принципи роботи цих систем та проаналізовано які саме релятивістські ефекти можуть впливати на точність вимірювань. Також намічено подальші кроки для досконалого вивчення впливу релятивістських ефектів на точність супутникових геодезичних спостережень.

Результати досліджень. Із самого початку використання штучних супутників Землі вони найчастіше виконують декілька різних функцій та використовуються в різних галузях. Наприклад, вже згадувані GPS системи є насправді за основним призначенням навігаційними. Проте широко використовуються в геодезії, для коригування годинників і навіть в метеорології, оскільки оснащенні відповідною вимірювальною апаратурою. Супутники для дистанційного зондування також надають свої дані для різних галузей та цілей. Тому не дивно, що насправді су-

путникові вимірювання не обмежуються цими двома системами. На даний час, залежно від прийомів спостережень, вимірювальних засобів і сукупності фізичних явищ, які лежать в основі спостережень, виділяють різні методи спостережень в супутниковій геодезії.

При спостереженні супутників фіксуються, реєструються або вимірюються величини, які в подальшому використовують для визначення положення супутників або їх швидкості в момент спостереження. Процес вимірювання або реєстрації виконують за допомогою спеціальних технічних засобів, які дозволяють визначити параметри сигналів, що надходять на станцію спостереження від супутників.

Методи спостережень ШСЗ поділяють на оптичні і радіотехнічні (радіоелектронні) залежно від діапазону довжин електромагнітних хвиль, які використовуються в процесі спостережень. До оптичних відносяться візуальні, фотографічні, телевізійні і лазерні. До найбільш поширених радіотехнічних відносяться імпульсні, фазові, а також диференціальні та інтегральні доплерівські методи. Варто відмітити, що в даний час все частіше використовуються комбіновані методи радіотехнічних і оптичних спостережень. Таким чином, для кожного з перелічених методів необхідно визначити свої релятивістські ефекти, що впливають на точність вимірювань.

Далі систематизуємо відомості про релятивістські ефекти, що впливають на точність вимірювань. Існує декілька різних класифікацій впливу релятивістських ефектів на вимірювання за допомогою супутників. Так в роботі [11] релятивістські ефекти, які впливають на поправки поділяють на чотири групи:

1. Ефект Доплера другого порядку, який полягає у впливі швидкостей руху двох об'єктів – носіїв годинників на вимірювану величину відносного частотного зсуву сформованих ними сигналів.

2. Гравітаційний зсув частоти, який полягає у впливі різниці гравітаційних потенціалів в місцях розташування носіїв годинників, що обумовлена неоднорідністю гравітаційного поля, на вимірювану величину відносного частотного зсуву формуючих ним сигналів.

3. Ефекти, які пов'язані з обертовим рухом систем відліку, що використовуються в GPS. Вони полягають у впливі так званих гравітаційних полів, які усуваються, на математичну інтерпретацію в рамках загальної теорії відносності результатів вимірів частотного зсуву і часової затримки електромагнітних сигналів.

4. Слабші релятивістські ефекти. Це перш за все ефект запізнення електромагнітного сигналу в гравітаційному полі; динамічні ефекти, які впливають на рух в гравітаційних полях різних об'єктів, в тому чи-

слі супутників; ефекти втягнення інерціальних систем відліку гравітаційними полями рухомих, в тому числі обертових об'єктів; релятивістські гравітаційні ефекти, які впливають на значення взаємних відстаней і швидкостей об'єктів і деякі інші.

Схожа, але дещо інша класифікація зустрічається в роботі [12]:

1. Три основні релятивістські ефекти в GPS:
 - 1.1. Ефект постійного частотного зсуву;
 - 1.2. Ефект обертової часової затримки;
 - 1.3. Затримка Сагнака;
2. Два ефекти, що спостерігаються в рухомих приймачах:
 - 2.1. В приймачах на рухомих об'єктах;
 - 2.2. В приймачах, що знаходяться високо над рівнем моря.
3. Чотири другорядні ефекти:
 - 3.1. Сонячно-місячний потенціал;
 - 3.2. Несферична гравітація;
 - 3.3. Затримка Шапіра;
 - 3.4. Ефект Ланса-Зірінга.

Таким чином, нараховується до десятка різних релятивістських ефектів, які впливають на точність GPS-спостережень. Проте першопричиною виникнення всіх ефектів є неінерціальність систем відліку та вплив гравітаційних полів космічних об'єктів, які входять в дану систему.

Виділимо основні поправки за релятивістські ефекти, в яких максимально повно врахуємо вплив релятивістських ефектів.

По-перше, при синхронізації атомного годинника супутника із годинником наземної станції між ними відбувається обмін електромагнітними хвилями. Оскільки при синхронізації супутник і наземна станція мають різні просторові координати і перебувають в різних неінерціальних системах відліку, то виникає часова поправка, пов'язана із поширенням сигналу синхронізації в просторі з викривленою метрикою.

По-друге, при отриманні наземним приймачем GPS-сигналу супутник перебуває в іншій точці простору, порівняно із точкою синхронізації, з іншими метричними параметрами, в якій хід атомного годинника супутника сповільнюється. При цьому виникає часова поправка, пов'язана з релятивістською зміною ходу атомного годинника супутника.

По-третє, відбувається скорочення довжини Лоренца при визначенні відстані між наземною станцією управління та супутником.

І, на кінець, по-четверте, відбувається скорочення довжини Лоренца при визначенні відстані між GPS-приймачем і супутником.

Висновки. Очевидно, що релятивістські ефекти впливають на точ-

ність супутникових геодезичних вимірювань. Більш того, найбільші ефекти враховуються при опрацюванні результатів вимірювань систем GPS. Проте в інших супутникових геодезичних методах релятивістські ефекти або зовсім не враховуються, або враховуються в значно меншому обсязі.

Проведений аналіз врахування впливу релятивістських ефектів при супутникових геодезичних вимірюваннях на сучасному етапі показав, що існують деякі недоліки, зокрема:

- абсолютно не враховується обертовий рух Землі навколо Сонця, хоча він впливає на всі перелічені вище похибки;

- всі поправки враховують лише один з релятивістських ефектів (обертання Землі навколо осі, відносний рух супутника і Землі, гравітаційні поля Землі, Сонця та Місяця), хоча при комплексному їх врахуванні вони можуть впливати на числові значення один одного;

- для багатьох поправок спрощені співвідношення, за якими вони визначаються;

- відсутній ґрунтовний порівняльний аналіз впливу релятивістських ефектів на точність GPS-спостережень;

- не існує достатнього обґрунтування врахування того чи іншого релятивістського ефекту при GPS-спостереженнях.

Таким чином, необхідно детально вивчити як впливи кожного з релятивістських ефектів окремо, так їх взаємний вплив. Частково такий аналіз проведено в роботах [3-8], проте там аналіз проводився лише для систем GPS, та лише для деяких релятивістських ефектів.

Так, в подальших роботах слід приділити увагу наступним напрямкам:

1. Визначити в супутникових системах та окремих супутниках, що використовуються в геодезії параметри та характеристики, на які впливають релятивістські ефекти. При цьому більша частина релятивістських ефектів будуть повторюватись, частина буде незначно відрізнятися в деталях, а деякі будуть суто індивідуальні – притаманні лише даній системі.

2. Створити математичні моделі комплексного врахування релятивістських ефектів для кожної супутникової системи. Основною вимогою до таких моделей має бути забезпечення врахування взаємного впливу релятивістських ефектів, а також максимальне їх врахування.

3. Апробація моделей на основі реальних даних супутникових спостережень.

4. Детальний аналіз впливу на точність вимірювань як кожного релятивістського ефекту окремо, так і їх комплексного впливу.

1. Б. Гофманн-Велленгоф. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенегер, Д. Коллінз. – К. : Наукова думка, 1996. – 392 с.
2. Hecmann В. (1985): Über die Auswirkung von relativistischen Effekten auf geodatische Messungen. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 8-9: 329-336.
3. Бялик І. Вплив релятивістського викривлення простору-часу на точність GPS-вимірювань / Бялик І., Бялик М., Черняга П. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Л., 2002. – С. 85–88
4. Бялик І. Теоретичний аналіз впливу релятивістського викривлення простору-часу на точність GPS-вимірювань / Бялик І., Бялик М., Черняга П. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Л., 2003. – С. 55–66.
5. Бялик І. М. Порівняльний аналіз похибок за релятивістські ефекти при GPS-вимірюваннях / І. Бялик // Вісник Українського державного університету водного господарства і природокористування. – Вип. 4 (23). – Рівне, 2003. – С. 230–235.
6. Бялик І. М. Розрахунок та аналіз метричного тензора, що визначає величину похибок за релятивістські ефекти при GPS-вимірюваннях / І. М. Бялик // Вісник геодезії та картографії. – 2006. – № 2. – С. 10–14.
7. Бялик І. М. Розрахунок та аналіз похибок за релятивістські ефекти при GPS-вимірюваннях / І. М. Бялик // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Вип. 1 (33). – Рівне, 2006. – С. 186–194.
8. Бялик І. М. Порівняльний аналіз впливу релятивістських ефектів на точність GPS-спостережень / І. М. Бялик // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Вип. 1 (11). – Л., 2006. – С. 131–137.
9. Куликовський П. Г. Звездная астрономия / П. Г. Куликовський. – 2-е изд. – М. : Наука, 1985.
10. Белова Н. А. Курс сферической астрономии / Н. А. Белова. – М. : Недра, 1971.
11. Владимиров Ю. С. Системы отсчёта в теории гравитации / Ю. С. Владимиров. – М. : Энергоиздат, 1982. – 256 с.
12. Бялик І. М. Супутникова геодезія : навчально-методичний посібник / Бялик І. М., Черняга П. Г., Янчук Р. М. – Рівне : НУВГП, 2013. – 220 с.
13. Пучков В. Ю. Учёт релятивистских и гравитационных эффектов при обработке результатов измерений в системе Navstar / Пучков В. Ю., Шербаевич В. С. // Зарубежная электроника. – 1989. – С. 54–59.
14. Franz T. Geyling and Westerman H. Robert. Introduction to Orbital Mechanics: – Addison Wesley Publishing Company, 1971.

Рецензент: к.т.н., доцент Янчук Р. М. (НУВГП)

Bialyk I. M., Candidate of Engineering, Associate Professor (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

ANALYSIS OF INFLUENCE OF THE RELATIVISTIC EFFECTS ON RESULTS OF GEODETIC MEASUREMENTS BY SATELLITES

Identify methods of satellite geodesy and remote sensing, noted the general principles of operation of these systems and analyze what kind of relativistic effects can affect accuracy. Scheduled next steps for a thorough study of the influence of relativistic effects on the precision satellite geodetic observations.

***Keywords:* relativistic mechanics, remote sensing, GPS-measurement, accuracy.**

Бялик И. Н., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭФФЕКТОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Определены методы спутниковой геодезии и дистанционного зондирования Земли, отмечено общие принципы работы этих систем и проанализированы какие именно релятивистские эффекты могут влиять на точность измерений. Намечены дальнейшие шаги для досконального изучения влияния релятивистских эффектов на точность спутниковых геодезических наблюдений.

***Ключевые слова:* релятивистская механика, дистанционное зондирование Земли, GPS-измерения, точность.**
