

ПОБУДОВА СУЧАСНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ РЕФЕРЕНЦІЙНИХ СИСТЕМ КООРДИНАТ

© Савчук С.Г., 2002

Рассмотрены аспекты построения современных референционных систем координат и пути их практической реализации. Сформулированы основные условия реконструкции ранее построенных референционных систем координат.

The aspects of construction modern geodetic coordinate reference systems and way of their practical realization are considered. The basic conditions of reconstruction before constructed geodetic coordinate reference systems are formulated.

1. Референційні системи координат

Для практичної реалізації системи координат необхідно виконати спеціальні спостереження та пов'язати їх за допомогою вибраних фізичних моделей з параметрами, що характеризують систему, зокрема координатами опорних об'єктів. Залежно від вибору опорних об'єктів, методів спостережень та їх опрацювання отримують різні реалізації інерційної і земної систем відліку – так звані *референційні системи*, відповідно, ICRS (International Celestial Reference System) та ITRS (International Terrestrial Reference System).

Інерційна система координат пов'язана з позагалактичними радіоджерелами і служить для опису руху в ній земної системи координат. Визначення інерційної системи координат базується на динамічних властивостях Сонячної системи (теорії руху тіл Сонячної системи і ШСЗ) або на кінематиці позагалактичних радіоджерел. Найкращою інерційною системою координат є система, що задається положеннями позагалактичних радіоджерел. Розрізняють два типи її практичної реалізації:

1. Зоряні системи координат, в яких опорними об'єктами є зорі (в майбутньому це будуть позагалактичні радіоджерела). Інерційні зоряні системи координат зв'язані із зорями фундаментального каталогу FK5, а з 2000 р. фундаментального каталогу FK6 і базуються на оптичних спостереженнях (проект *Hipparcos*), а інерційні системи координат радіоджерел

задаються положеннями позагалактичних радіоджерел, які або зоряні об'єкти – квазари, або галактичні ядра. Основний метод створення інерційної системи координат радіоджерел – це радіоінтерферометричні спостереження з наддовгими базами (VLBI).

2. Ефемеридні системи координат. У цій системі один або декілька рухомих об'єктів використовуються для реалізації системи координат, наприклад, Місяць, планети, глобальні супутникові радіонавігаційні системи типу GPS. Так теорія глобальних супутникових систем задає видимі (для радіодіапазону) ефемериди супутників як функції часу, а послідовні розташування супутників, що спостерігаються, є опорними точками для поширення цієї системи координат.

Земна система координат призначена для кількісного опису розташування та руху тіл на Землі. Відносно цієї системи земна кора може мати тільки деформації. Зв'язок між координатами земної та інерційної систем здійснюється за допомогою параметрів орієнтації Землі: прецесії, нутації та обертання Землі.

До основних методів визначення параметрів орієнтації Землі належать:

- класичні астрономічні спостереження (пасажні інструменти, астролябії, зенітні труби тощо);

- доплерівські спостереження ШСЗ: навігаційна система TRANSIT (використовувалась до середини 80-х років XX ст.), супутникова система DORIS;

- лазерні світловідалемірні спостереження (SLR) ШСЗ Lageos;

- лазерні світловідалемірні спостереження Місяця (LLR);

- радіотехнічні спостереження ШСЗ глобальної навігаційної системи GPS – один із основних засобів оперативного визначення параметрів орієнтації Землі;

- радіотехнічні спостереження ШСЗ навігаційної системи ГЛОНАСС;

- радіоінтерферометрія з наддовгими базами (VLBI).

Перераховані методи спостережень, які застосовують для визначення параметрів орієнтації Землі, дозволяють визначати і координати станцій, тобто встановлювати земну систему координат, яка отримала назву ITRF (ITRF – International Terrestrial Reference Frame), а метод VLBI дозволяє також визначати координати позагалактичних радіоджерел, тобто встановлювати інерційну (зоряну або небесну) систему координат ICRF – International Celestial Reference Frame.

Розглянемо дещо детальніше принцип побудови сучасної земної системи координат. За результатами спостережень на постійно діючих (перманентних) станціях Міжнародної служби GPS для геодинаміки (IGS), координати яких спочатку отримані у системі WGS-84, визначалися ефемериди супутників GPS. Під час довготривалих (багаторічних) спостережень з використанням радіоінтерферометрії з наддовгими базами (VLBI), лазерної локації супутників (SLR) та системи DORIS координати перманентних станцій IGS постійно уточнювалися. Періодично ці уточнення приймаються за точніші реалізації земної системи координат ITRF89, ..., ITRF97, ITRF2000. Отже, і поточні ефемериди супутників GPS визначаються також у відповідних реалізаціях системи координат ITRF. Параметри переходу від системи координат WGS-84 до точних реалізацій ITRF мають досить малі величини і визначені з високою точністю. Для новіших версій реалізації системи WGS-84 (G730 або G873) різниця між координатами ITRF та WGS-84 знаходиться в межах 10 см.

Координує дослідження, пов'язані із встановленням земної і інерційної систем координат, а також дослідження в галузі вивчення обертання Землі Міжнародна служба обертання Землі (IERS). Серед значної кількості станцій, що входять у мережу служби IERS, є і українські станції.

Залежно від географічного розташування станцій та умов спостережень на них розрізняють також регіональні (наприклад, ETRF) та національні референцні системи відліку. Всі вони є загальноземними за своєю природою.

У досупутникову епоху встановлення загальноземних систем відліку мало суто теоретичний характер, а практичні спроби стосувалися хіба що визначення розмірів загального земного еліпсоїда. Класичні наземні геодезичні мережі, що створювалися на обмежених регіонах Землі (переважно в межах окремої держави), дозволяли поширювати систему координат в локальних масштабах. Такі системи координат називали референцними, а відлікову поверхню для цих координат – референц-еліпсоїдом. Отже, в теперішній час фактично існують два різних тлумачення поняття “референцна система координат”: як практична реалізація загальноземної системи відліку методами космічної геодезії і як реалізація локальної системи координат традиційними геодезичними методами. Щодо першого тлумачення, то будемо розуміти під ним Міжнародну, Регіональну (Європейську), Національну референцну систему відліку, а щодо другого – геодезичну (локальну) референцну систему координат. Відзначимо, що геодезичні референцні системи координат розповсюджені не тільки через їх традиційність, але і тому, що є кращими, ніж загальноземні системи, при представленні реальної фігури Землі в межах обмежених територій. Це має значні переваги при практичній обробці масових геодезичних вимірювань на таких територіях.

2. Шляхи впровадження національної референцної системи відліку

Сучасні підходи до створення систем відліку базуються на використанні даних космічної геодезії з врахуванням формул, що узгоджують параметри земного еліпсоїда (його лінійні розміри та стиснення) – основної координатної поверхні з фундаментальними параметрами Землі.

Найвідомішою координатною поверхнею Землі є загальний земний сфероїд, точніше рівневий еліпсоїд обертання, який ще називають Нормальна Земля. Під цим терміном розуміється узагальнена модель Землі як планети загалом, яка з однієї сторони відтворює її основні властивості в усередненому вигляді, а з іншої – найпростіше представляє її для математичного опису.

Оскільки параметри загального земного еліпсоїда на теперішній час досить впевнено визначені (прикладом таких еліпсоїдів є WGS-84 та GRS-80), то задача визначення параметрів референц-еліпсоїда вже не є актуальною, хоча останні мають важливе практичне значення в геодезичних роботах. Теоретично можна прийняти будь-який з відомих земних еліпсоїдів для опрацювання геодезичних вимірювань чи розв’язування інших задач (наприклад, навігації) з визначення місцезонашування. Необхідно знати лише відступи (як по висоті, так і по нахилу) згладженої поверхні Землі – геоїда від прийнятого еліпсоїда.

Враховуючи сучасні тенденції в цьому питанні, можна сформулювати такі вимоги до Національної референцної системи відліку:

- геометричні параметри Національного еліпсоїда повинні збігатися з параметрами вибраного еліпсоїда (загальноземного чи референцного);
- геометричний центр еліпсоїда повинен бути суміщений з початком координат загальноземної системи з точністю визначення;
- орієнтація осей систем координат – національної і загальноземної – повинні бути суміщені з точністю визначення;

– фізичні параметри Національної системи відліку повинні узгоджуватися з прийнятими геометричними параметрами Національного еліпсоїда та головними параметрами поля сили ваги.

Для практичного встановлення Національної системи відліку повинні бути забезпечені такі дії:

- функціонування ряду постійно діючих станцій супутникових радіонавігаційних систем, які би були складовими IGS -мережі;
- періодичні визначення координат пунктів фундаментальної геодезичної мережі та окремих пунктів існуючої астрономо-геодезичної мережі першого класу;
- спостереження на перманентних станціях, пунктах фундаментальної і астрономо-геодезичної мережі об'єднуються в єдиний розв'язок, а остаточні координати видаються на вибрану епоху спостережень.

Встановлена Національна референсна система відліку і загальноземна система ITRF (ETRF) матимуть суттєві відмінності. Причинами цих відмінностей будуть:

- різні підходи до розв'язку результатів спостережень;
- неоднакова кількість пунктів;
- різна тривалість спостережень;
- різниця в умовах спостережень;
- наявність конкретного програмного забезпечення,
- різниця в геометричних розмірах еліпсоїдів,
- динаміка власних рухів пунктів.

Оскільки Національна і загальноземна системи є ідентичними за своєю природою (побудовані на одних принципах спостережень і умовах функціонування), то положення Національної референсної системи в системі загальноземних координат досить точно характеризується параметрами перетворення Гельмерта.

3. Шляхи впровадження геодезичних референсних систем координат

Основною вимогою математичного опрацювання геодезичних вимірювань, які виконуються на земній поверхні, є заміна поверхні геоїда поверхнею референц-еліпсоїда, який найкраще підходить до неї.

Традиційно, побудову геодезичної референсної системи координат можна виконувати через встановлення вихідних геодезичних дат. Альтернативою цьому може бути суто математичний перехід до локальної референсної системи через встановлення параметрів перетворення між двома системами координат: геодезичною референсною і Національною референсною чи геодезичною референсною і загальноземною.

Впровадження геодезичної референсної системи координат шляхом встановлення вихідних геодезичних дат виконувалося в межах градусних вимірювань. Класичне градусне вимірювання полягало у вимірюванні методом тріангуляції лінійної відстані між деякими пунктами, розташованими, по можливості, вздовж земного меридіана або паралелі, та астрономічних визначень на цих пунктах.

Вибирався деякий початковий референц-еліпсоїд з екваторіальною піввіссю a_0 та стисненням α_0 і переносилися на нього геодезичні вимірювання в межах окремої дуги меридіана чи паралелі, на кінцях якої виконані астрономічні визначення широти φ_i (у випадку меридіональної дуги) або довготи λ_i (у випадку дуги вздовж паралелі), а також

виміряні базиси s_{ij} і астрономічні азимуты a_{ij} . Віднесення виконаних геодезичних вимірювань (лінійних і кутових) проводилось, фактично, до “рівня моря”, тобто до поверхні геоїда. Із опрацювання триангуляції визначались відстані між паралелями або меридіанами пунктів градусного вимірювання, тобто відрізки дуг меридіана або паралелі, як деякі окремі дуги, які при геодезичному зв'язку між собою становили загальну дугу градусного вимірювання по меридіану або по паралелі.

Один з пунктів цього градусного вимірювання приймався за початковий або вихідний пункт. Астрономічні координати цього пункту φ_0 і λ_0 , так приймалося, дорівнювали геодезичним координатам B_0 і L_0 . На поверхні прийнятого еліпсоїда з параметрами a_0 і α_0 при вказаному його орієнтуванні в тілі Землі ($B_0 = \varphi_0$, $L_0 = \lambda_0$, $A_{1k} = a_{1k}$) обчислювались геодезичні координати B_k, L_k всіх решта пунктів градусного вимірювання з астрономічними широтами φ_k і довготами λ_k , використовуючи при цьому відстані між цими пунктами, які були віднесені тільки на поверхню геоїда, та передачі астрономічного азимута a_{1k} через виміряні горизонтальні напрями. Після чого визначали розміри земного еліпсоїда $a = a_0 + \delta a$ і $\alpha = \alpha_0 + \delta \alpha$ на основі рівнянь градусних вимірювань та встановлювалась відповідна система координат з початком у прийнятому за вихідний пункті геодезичної мережі. Якщо розміри земного еліпсоїда могли бути відомими або заданими, то тоді, зрозуміло, виникала задача тільки про встановлення вихідних геодезичних дат.

Подальші дослідження в галузі використання градусних вимірювань (замість методу “дуг” стали використовувати метод “площ”, замість перенесення результатів геодезичних вимірювань на поверхню геоїда (розгортання) почали використовувати метод проектування – перенесення вимірів на поверхню референц-еліпсоїда, замість астрономо-геодезичного методу визначення висот геоїда та складових відхилення прямовисної лінії почали використовувати астрономо-гравіметричний метод) для встановлення геодезичних референцних систем координат призвели до цілком однозначного розв'язку поставленої задачі [2].

Вказаним шляхом створювались в основному більшість класичних геодезичних систем координат. Характеристики деяких з них наведені в таблиці.

В [1] розглянута методика визначення поправок у існуючі геодезичні координати пунктів при зміні вихідних геодезичних дат для астрономо-геодезичної мережі України. При реалізації ідеї зміни вихідних геодезичних дат система координат буде кращою, в розумінні “геодезична референцна система”, ніж система координат 1942 р., проте всі недоліки побудови класичними методами геодезичних мереж будуть існувати і суттєвою буде також відмінність у значеннях координат “нової” системи та існуючої. Останнє є дуже важливим чинником і не може вважатися прийнятним, особливо, у виробничій сфері.

Технологія введення геодезичної референцної системи координат шляхом встановлення параметрів перетворення координат полягає в наступному. Нехай деякий еліпсоїд заданих розмірів (a, α) встановлений відносно земної поверхні так, що вісь обертання його паралельна до осі обертання Землі, а центр еліпсоїда незначно віддалений від центра інерції Землі O . Якщо тепер змінимо форму і розміри еліпсоїда: велику (екваторіальну) піввісь на величину da , а стиснення на величину $d\alpha$, то, відповідно, зміняться при цьому і геодезичні координати B, L, H всіх точок простору, проте прямокутні координати X, Y, Z цих точок залишаться попередніми, оскільки не змінилося положення осей координат.

Геодезичні референсні системи країн Європи

Країна	Назва системи	Вихідний пункт	Еліпсоїд
Національні системи			
Німеччина	Potsdam	Rauenberg	Бесселя
	SK-42/83	Пулково	Красовського
Австрія	MGI	Hermannskogel	Бесселя
Нідерланди	RD/NAP	Amersfoort	Бесселя
Бельгія	DG 1972	Ukkel	Хейфорда
Швейцарія	CH1903	Стара обсерваторія Bern	Бесселя
Швеція	RR92/RT90	Lovo	Бесселя
Фінляндія	KKJ		Хейфорда
Франція	NTF	Pantheon, Paris	Кларка, 1880
Угорщина	HD-72 WGS72	Szolohegy	IUGG-67 WGS72
Італія	Rome 1940	Monte Mario	Хейфорда
Росія	СК-95	Пулково	Красовського
Україна	—	—	—
Регіональні системи			
Австрія, Хорватія, Словенія, Словаччина, Чехія	MGI	Hermannskogel	Бесселя
Німеччина, Польща, Словаччина, Чехія, Угорщина	SK-42/83	Пулково	Красовського
Бельгія, Данія, Німеччина, Франція, Греція, Італія, Люксембург, Нідерланди, НАТО, Норвегія, Іспанія, Швеція, Туреччина	ED50	—	Хейфорда

Здійснивши паралельне зміщення еліпсоїда в просторі разом з осями координат $OXYZ$, отримаємо додаткові зміни геодезичних координат. Зміняться на цей раз і прямокутні координати всіх точок (внаслідок переносу початку координат) на величини Dx , Dy , Dz . Вказані зміни координат можна обчислити через параметри перетворення для геодезичної мережі, у якій частина пунктів є з відомими координатами B , L , H в системі двох еліпсоїдів і, відповідно, у двох системах референсних координат. Для визначення параметрів перетворення координат використовують: формули Гельмерта; стандартні формули Молоденського; рівняння множинної регресії.

Якщо параметри перетворення відомі, то можна було би обчислити геодезичні координати в новій геодезичній референсній системі за координатами відомої референсної

системи, наприклад, системи ITRF (ETRF) чи Національної системи, визначеними із супутникових спостережень B^c, L^c, H^c . Це було би справедливо тоді, коли б параметри перетворення були визначені безпомилково. Для того, щоб підкреслити факт отримання координат у новій геодезичній референційній системі через параметри перетворення, позначимо їх через B^+, L^+, H^+

$$B^+ - B^c = f_1(a, \alpha, Dx, Dy, Dz, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \mu),$$

$$L^+ - L^c = f_2(Dx, Dy, Dz, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \mu),$$

$$H^+ - H^c = f_3(a, \alpha, Dx, Dy, Dz, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \mu)$$

Якщо вважати, і справедливо, що параметри перетворення отримані з певними похибками, то, очевидно, що

$$B_i^+ \neq B_i,$$

$$L_i^+ \neq L_i,$$

$$H_i^+ \neq H_i.$$

Представимо B^+, L^+, H^+ у вигляді

$$B_i^+ = B_i + \Delta B_i,$$

$$L_i^+ = L_i + \Delta L_i,$$

$$H_i^+ = H_i + \Delta H_i.$$

де різниці $\Delta B_i, \Delta L_i, \Delta H_i$ є відхиленнями перетворених координат від існуючих референційних координат B_i, L_i, H_i .

Сформулюємо головну вимогу до створюваної супутниковими радіонавігаційними системами геодезичної мережі: *пункти мережі, координати яких визначали із супутникових спостережень, повинні бути віднесені до нової геодезичної референційної системи координат, яка б була оптимально найближчою до існуючої референційної системи, створеної класичними геодезичними технологіями.* Вказана вимога зобов'язує нову геодезичну референційну систему координат до тієї ж метрики, що і система геоцентричних координат, тобто вектори, виміряні за допомогою супутникового методу, повинні зберігати свою довжину в новій системі. Це буде можливим тоді, коли масштабний множник $\mu = 1$.

Існуючі "класичні" системи координат (наприклад, система координат 1942 року) не можуть забезпечити однозначного переходу до загальноземних (національних) референційних систем через різні технології їх отримання. Безпосереднє визначення параметрів перетворення значно ускладнюється обставиною невідповідності точнісних можливостей супутникових вимірювань і якістю існуючих геодезичних мереж. Якщо вважати, що точність визначення взаємного положення пунктів за супутниковими вимірюваннями становить 1:10 000 000 – 1:1000 000, то точність існуючої геодезичної мережі не краща за 1:500 000. Отже, при перетворенні координат, отриманих із супутникових спостережень, в геодезичну референційну систему точність визначення координат пунктів зменшується, як мінімум, у два рази. Такий стан не задовольняє ще одну важливу умову, що ставиться до реконструкції існуючих геодезичних мереж, а саме: *координати в геодезичній референційній системі повинні бути такої ж точності, як і точність визначення взаємного положення*

пунктів супутниковими технологіями. Необхідну точність можна досягти тільки при впровадженні сучасної геодезичної референцної системи координат, що однозначно пов'язана з загальноземними системами [3].

Вимоги до геодезичної референцної системи координат тепер можна сформулювати так:

- геометричні параметри повинні збігатися з параметрами раніше прийнятого референц-еліпсоїда;

- система координат повинна бути оптимально найближчою до існуючої “класичної” системи;

- метрика геодезичної референцної системи повинна відповідати метриці загальноземної системи (масштабний множник повинен дорівнювати 1;

- координати референцної системи повинні бути такої ж точності, як і точність визначення взаємного положення пунктів супутниковими технологіями.

Отже, поняття “референцна система координат” в сучасній геодезії означає:

- загальноземна референцна система координат (ITRF чи ETRF);

- Національна референцна система координат (загальноземна за принципом і локальна за природою);

- геодезична референцна система координат (класична);

- геодезична референцна система координат (супутникова).

1. Бондар А.Л., Островський А.Л., Філіпов А.Є. Про зміни просторових координат пунктів при переході України на національний референц-еліпсоїд та нові геодезичні дати // *Вісник геодезії та картографії*. – 1994. – № 2. – С. 19 – 27. 2. Изотов А.А. Новые исходные геодезические даты СССР // *Сборник научно-технических и производственных статей*. – 1948. – Вып. XVII. – С. 22 – 36. 3. Савчук С.Г. До питання про створення національної системи відліку // *Вісник геодезії та картографії*. – 2001. – № 4. – С. 11 – 13.