

ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ СУПУТНИКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ

© Савчук С.Г., 2007

Розглянуто аспекти використання сучасних супутникових технологій під час топографо-геодезичних робіт з координування точок місцевості. Особлива увага звернута на питання технології виконання польових вимірювань і процесів оброблення GPS-спостережень та використання референціальних систем координат і додаткової інформації.

Aspects of use of modern satellite technologies are considered at carrying out of land works after co-ordination of points of district. The especial attention is directed on questions of technology of performance of GPS-observations and their processings, use of reference systems of coordinates and the additional information.

Вступ. З часу появи першої глобальної позиційної системи – GPS пройшло вже більше ніж двадцять років. Протягом достатньо тривалого часу з цього періоду практично єдиним способом визначення координат пунктів у геодезії був відносний метод, або метод DGPS (диференційний GPS), який характеризувався надзвичайно довгими сеансами (сесіями) спостережень та значним у часі процесом постобробки, тобто результати можна було отримати не відразу, а через певний проміжок часу. Якщо до цього додати ще технічну недосконалість приймачів GPS-сигналів (складну технологію підготовки, виконання і отримання даних, велику енергоємність, малу внутрішню пам'ять) та антенного пристрою (значні і непостійні значення положення фазового центру, малодосліджені величини перевідбиття від різних перешкод сигналів супутників), практично експериментальну частину космічного сегменту системи (конструктивні особливості перших GPS супутників, пов'язані з неточним знанням положення фазового центру випромінювальної антени, низьку точність ефемерид, режим вибіркового доступу (SA – Selective Availability)) та доступність лише незначній частині фахівців (через складність використання) програмних засобів для оброблення GPS-спостережень, то стає зрозумілим певний скепсис щодо широкого використання супутникової технології для визначення місцеположення “геодезичної” точності. До цього треба додати ще один важливий аспект: отримані під час оброблення GPS-спостережень координати за природою були загальноземними геоцентричними і стосувалися референційної системи WGS-84, перша версія якої оцінювалася на рівні 2 м. Використовувати такі координати у практичних роботах для більшості задач було неможливим.

За останні роки сталися істотні зміни у підходах до використання технологій глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). Перераховані вище аспекти визначення координат з використанням супутникової технології в умовах сьогодення та наших реалій і розглядаються в цій статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з цієї проблеми. Різноманітним аспектам використання GNSS методів приділено достатньо багато уваги не тільки у закордонних виданнях, але й в Україні.

Принципова різниця у вітчизняних публікаціях з цієї тематики полягає у тому, що в більшості з них наводяться результати досліджень, які ґрунтуються на технологіях початкового етапу розвитку GNSS. Продовжуються аматорські дослідження з визначення фазових центрів GPS-антен, вивчення багатопрохідності GPS-сигналів [2,3], визначення тривалості виконання спостережень [1,6], на предмет використання точних ефемерид супутників тощо. Не припиняються дослідження, пов'язані із урахуванням атмосферного впливу через уточнення модельних формул [5,9],

трансформуванням координат [8]. І хоча всі зазначені питання мають важливе значення, проте більшість із них практично вирішені на технологічному рівні.

Разом з тим, у вітчизняних публікаціях геодезичного спрямування мало уваги звертається на сучасні GNSS технології, особливо це стосується методу RTK [4,7], питань ефективного виконання та оброблення GPS-спостережень тощо.

Постановка проблеми. У цій статті розглядаються окремі проблемні питання використання технологій GNSS на сучасному етапі їхнього розвитку.

Виклад матеріалу досліджень.

1. GNSS інфраструктура.

Період розвитку технологій GNSS, що характеризувався використанням розрізних диференційних і, як правило, статичних GPS-спостережень, практично закінчився. Основними причинами, що вплинули на це, були проблеми, пов'язані з обробленням виконаних спостережень. Спостереження виконувались з різним інтервалом часу, різними типами приймачів і від різних вихідних пунктів, часто від пунктів класичних геодезичних мереж. Внаслідок цього порушувався принцип отримання однорідності та єдиносистемності координат. Якщо виконання спостережень було практично автоматизоване і суб'єктивний фактор мало на нього впливав, то отримання координат був майже повністю залежним від кваліфікації виконавців і технічних можливостей його забезпечення. Треба підкреслити, що значна увага до технічного вдосконалення GNSS-апаратури привела до достатньо відчутного її покращення: збільшення каналів приймання супутникових сигналів, зменшення енергоємності роботи приймача, істотного розширення можливості накопичення даних спостережень у пам'яті приймача, зменшення до 1–2 мм коливання фазового центру антени, урахування багатошляховості тощо.

Зазначимо, що з часу появи GNSS технології використання методу супутникового визначення координат постійно вдосконалювалися. Для тих задач, де вимагалася точність 1 м і вище, GPS-метод можна було використовувати лише у диференційному режимі. Для забезпечення цього режиму необхідно було передати поправки, що визначалися як різниця відомих координат базової станції з вимірними їхніми значеннями, на станцію, координати якої треба знайти. Передавати поправки безпосередньо у координати виявилось неефективним і їх почали вводити у вимірні параметри – псевдовідстані. Диференційний режим GPS-методу почали називати DGPS, а відтак DGNSS. Оскільки обчислювати псевдовідстані можна було на основі кодових і фазових вимірювань, то і технології DGPS поділяли на кодові і псевдофазові.

Диференційний режим за кодовими вимірюваннями ґрунтується на вимірюванні та обробленні псевдовідстаней, має, загалом, необмежену область дії і характеризується похибками визначення координат від часток метра до декількох метрів. Системи диференційної навігації, побудовані за кодовими вимірюваннями, поділяють на локальні (Local Area Differential GPS), широкодіапазонні (Wide Area Differential GPS, WADGPS) та глобальні (Global Differential GPS, GDGPS).

Локальних систем диференційної навігації є достатньо багато, вони мають область дії до 200 км і застосовуються, як правило, для морської навігації. Сьогодні у світі найвідомішими є тільки дві широкодіапазонні системи диференційної навігації. Система WAAS (Wide Area Augmentation System) належить уряду США і зорієнтована на територію Північної Америки та система EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Services), що керується Європейським космічним агентством (ESA) і фінансується Євросоюзом.

Компанія OmniSTAR є світовим лідером у галузі глобальної системи DGPS. Глобальний сервіс OmniSTAR XP, а також регіональні сервіси VBS (Virtual Base Station) та HP (High Performance) забезпечують точність визначення координат від 1 м до 10 см при використанні тільки одного приймача. OmniSTAR, яка має в активі 100 наземних базових станцій, три центри завантаження даних на супутники і два контрольні центри глобальної мережі, надає надійний сервіс у галузі координатного забезпечення у безперервному режимі на всю територію Землі. Всі перелічені сервіси DGPS є, як правило, платними. Так, наприклад, стандартні ціни у Північній Америці для GIS/картографії застосувань: OmniSTAR VBS – \$800.00 1 рік/1 приймач; OmniSTAR XP – \$1500 1 рік/1 приймач; OmniSTAR HP – \$2500 1 рік/1 приймач [16] і, відповідно, в Україні: OmniSTAR VBS – 5580 грн 1 рік/1 приймач; OmniSTAR HP – 15 000 грн. 1 рік/1 приймач [15].

Диференційний режим за псевдофазовими вимірюваннями характеризується, з одного боку, доволі високою точністю (до часток сантиметра), проте у реалізації мав істотні обмеження щодо області дії (~10–12 км). Специфічною особливістю цього виду диференційного режиму була неоднозначність псевдофазових вимірювань на більших відстанях, що обмежувала його використання. Крім обмеження у відстані, серйозною перешкодою на шляху широкого впровадження цієї технології було передавання диференційних поправок каналами зв'язку у режимі реального часу. Основним засобом для передавання диференційних поправок був радіоканал, а деякі GPS-приймачі ще досі обладнуються радіомодемом.

Поява у середині 90-х XX ст. технології RTK (Real Time Kinematic) GPS стала знаковою подією у розвитку систем точного спутникового позиціонування. Розроблення алгоритмів для надійної фіксації неоднозначностей привело до істотного вдосконалення приймачів GPS-сигналів (вони стали мультичастотними RTK, GPS, ГЛОНАСС і WAAS/EGNOS приймачами з можливістю приймання нових сигналів модернізованої GPS L2C та L5), а використання нових телекомунікаційних можливостей забезпечило широке впровадження диференційного режиму за псевдофазовими вимірюваннями, який почали називати технологією RTK. Щоб розширити область дії RTK-технології, почали використовувати не одну базову станцію, а мережу таких станцій. Загалом можна говорити про те, що сьогодні технології RTK для задач точного визначення координат вийшли на рівень виробничих робіт.

Отже, запровадження RTK-технології особливо проявило себе у двох напрямках: 1) фактично стало можливим отримувати сантиметровий рівень визначення координат безпосередньо під час виконання спостережень, тобто оброблення звелось до мінімуму і мало почало залежати від суб'єктивних факторів; 2) значно розширилися області застосування систем GNSS, адже, крім геодезії (створення опорних мереж, кадастрові роботи, землеустрій) і деяких фундаментальних застосувань (визначення деформацій земної кори, параметрів орієнтації Землі тощо), тепер стало можливим її ефективно використання і у системах управління рухом транспорту, службах безпеки, гідрографії, лазерному скануванні місцевості і аерозніманні, дослідженнях клімату та багатьох інших.

Враховуючи сучасний стан розвитку GNSS інфраструктури в Україні, можна запропонувати таку схему GPS-спостережень з метою координатного забезпечення у геодезії, кадастрі, землеустрої тощо.

А) Використання наявних перманентних GNSS станцій. Оскільки кількість перманентних станцій є порівняно невеликою (8 станцій мережі EPN та ще декілька, що працюють в автономному режимі), то ефективно їх можна використовувати лише у радіусі до 30 км для одночастотних і 50 км для двочастотних приймачів з порівняно невеликою тривалістю спостережень (5–45 хв). Збільшити відстані від перманентної станції до 100 і більше км можливо лише для двочастотного приймача, але за умови істотного, іноді і до однієї доби, збільшення тривалості спостережень. Як показали наші дослідження, координати будь-якого пункту на території України із спостережень двочастотним приймачем тривалістю від декількох годин і до однієї доби можна визначити із сантиметровою точністю, використовуючи три найближчі перманентні станції EPN (не обов'язково українські). Зауважимо лише, що оброблення таких спостережень найкраще здійснювати з використанням програмних пакетів Bernese або GAMIT. Точність розв'язку з використанням програмного пакета TGO чи аналогічного може бути гіршою на 2–3 см.

Б) Використання базової станції. Якщо в організації є хоча би один двочастотний GPS приймач і відповідна високоточна антена, то можна створити на офісній будівлі стаціонарну базову станцію. Залежно від типу приймача необхідно підібрати відповідне програмне забезпечення для управління роботою базової станції. Управління повинно забезпечувати автоматизоване накопичення даних спостережень у заданому режимі на робочому комп'ютері. Особливу увагу треба звернути на наявність такого програмного забезпечення і фінансову можливість його придбання.

В) Використання мережі базових станцій. Для збільшення площі покриття GPS-даними замість однієї базової станції розгортають мережу таких станцій. Так, наприклад, для території Закарпатської обл. (12.8 тис. км²) достатньо встановити мережу із шести базових станцій [7]. Для ефективного управління декількома стаціонарними базовими станціями необхідне вже спеціальне мережеве програмне забезпечення, яке б керувало роботою всіх станцій через Інтернет.

Відзначимо, що найоптимальнішим варіантом використання базових станцій є їх забезпечення можливістю управляти передаванням стандартних RTK поправок на приймачі користувачів через канали

стільникового зв'язку і/чи зберігання даних для передавання по Інтернету для постобробки. В ідеалі, для використання повних RTK можливостей мережевої технології (networking) повинні бути встановлені додаткові системи для зв'язку з робочими GPS приймачами, тим більше, що майже всі сучасні приймачі мають влаштований GSM/GPRS модем і зовнішній мобільний телефон більше не потрібний.

2. Оброблення GPS-спостережень.

При обробленні виконаних GPS-спостережень може скластися така ситуація, коли незалежний від виконавця процес вимірювань, внаслідок суб'єктивних дій оператора, зазнає істотних “виправлень”, що загалом позначиться на точності отримуваних результатів. Якщо зважити на те, що сучасні програмні пакети “середнього класу” для оброблення GPS-спостережень мають у своєму арсеналі достатньо можливостей для контролю за якістю даних вимірювань і цей процес є практично автоматизований, то часто джерелами помилок є недотримання правил введення допоміжних даних (висот та типу GPS-антени) і використання параметрів, що забезпечують трансформування координат. Саме через вказані джерела помилок і виникають найбільші проблеми під час оброблення спостережень.

Помилки при введенні висоти антени (чи безпосередньо у файл з даними спостережень, чи у програму обробки) позначаються, передовсім, на точності визначення висоти і тому побутує думка, якщо потрібні лише планові координати, то на це можна і не зважати. З цим можна би було погодитись лише у тому разі, коли йдеться про окреме передавання координат (окремий вектор). У разі вимірювань навіть на декількох пунктах локальної мережі з подальшим її урівнюванням отримана оцінка точності буде дуже заниженою. Це саме стосується вже правильного введення висоти антени, але невідповідного її типу. Що ж розуміють під висотою антени? Якщо зважити на багатозначність цього терміна у минулому: вертикальна висота, похила висота, висота до нижнього краю антени, висота до верхнього краю, висота до фазового центру, висота до фіксованої точки на антені, то зрозуміло всю неоднозначність в цьому питанні. Це саме стосується і поняття щодо типу антени. Адже той тип антени, що вказаний фірмою-виробником, часто не збігається з тією класифікацією, яка введена різними міжнародними структурами, такими, наприклад, як IGS (International GNSS Service) чи NGS (National Geodetic Survey). Більшість програмних засобів використовують таблиці значень фазових центрів антени саме останніх. І оскільки вони регулярно оновлюються, то їх потрібно відстежувати і враховувати при обробці. Зважаючи на сьогоdnішній стан у питанні класифікації та визначення фазових центрів антен, необхідно чітко дотримуватися принципу: введення відповідника типу антени за NGS та виміряної до нижньої основи антени (Bottom of antenna mount) висоти.

Істотна відмінність використання національної системи плоских координат, що пов'язана з традиційною геодезичною референчною системою, в Україні від країн Європи полягає у тому, що у нас, як правило, використовуються координати пунктів традиційної геодезичної мережі як вихідні при обробці GPS-спостережень. Навіть більше, вже і координати перманентних станцій наші спеціалісти перевели у ранг пунктів класичної мережі. Тому для отримання координат пунктів із GPS спостережень у тій самій системі, що і вихідні пункти, потрібно перейти із невідомо якої супутникової системи до традиційної. Щоб не утруднювати оброблення додатковими обчисленнями, часто параметри трансформації, що бралися із різних джерел (від фірм, що продають GPS-обладнання до окремих фахівців-аматорів), вводять безпосередньо у програму для обробки. Не зупиняючись тут на технологічних особливостях поєднання різних референцних систем координат (детальніше це питання розглядається у п.3), зауважимо лише таке. Оскільки для виробничих завдань ще продовжує використовуватися система СК-63, то для отримання координат пунктів саме у цій системі знаходять параметри зв'язку між “супутниковою” системою базової чи найближчої перманентної станції і системою СК-63, використовуючи їх як вихідні. Знаючи зсув координатних осей системи СК-63 щодо системи СК-42 на район робіт та параметри трансформації WGS-84-СК-42, закладені у програмне забезпечення фірмою-продавцем або окремими аматорами, теж можна отримувати координати пунктів GPS-спостережень у системі СК-63. Кожен із вказаних способів отримання координат дає якісь певні результати, хоча теоретично вони мали б збігатися. Як показує практика такого застосування параметрів трансформування координат, різниці між обома підходами можуть досягти навіть 1 м! Причина саме за такого результату є наперед передбачуваною і полягає вона у тому, що параметри трансформування між вказаними системами визначалися з різним набором вихідних пунктів у різних місцях і непрофесійно.

Отже, оперативність спостережень і потенційно висока точність отримання даних ще зовсім не гарантує задовільного результату.

3. Використання референціальних систем координат.

Сьогодні є два практичні наближення до визначення просторових координат у загальноземних референціальних системах – WGS84 та ITRFXX (International Terrestrial Reference Frame, XX – епоха реалізації, наприклад, 88, 89, ..., 05). Із порівняння двох загальноземних референціальних систем можна сказати таке. Система ITRFXX знаходить застосування в точних геодезичних роботах і координати цієї системи, визначені у будь-яку епоху, можуть бути прийняті, як у системі WGS84. Система WGS84 може бути використана для подання просторової інформації тоді, коли точність не є строго регламентованою (картографія, навігація, ГІС тощо). Проте ставити задачу навпаки, тобто використовувати координати пунктів системи WGS84 замість координат відповідних пунктів у системі ITRF не можна.

За оцінками спеціалістів, узгодження WGS84 із системою ITRFXX до середини 90-х років XX ст. склалося на рівні 10-20 см. У 1996 р. було виконано подальшу модифікацію системи WGS84 (версія G873). Тут, для більшого узгодження із системою ITRF, було прийнято до уваги рухи плит, на яких розміщувалися станції спостережень. Ці зміни більшістю користувачів навіть не були виявлені, оскільки їхні задачі не вимагали такої точності. Контрольні станції, що задіяні у реалізації системи WGS84, тепер визначені відносно системи ITRF на 5 см рівні точності і забезпечують точне визначення ефемерид супутників для диференціальних GPS-спостережень. Фактично, коли йдеться про дециметрову точність, то різницю між референціальними системами WGS84 та ITRS не роблять, а самі координати відносять до системи WGS84.

Оскільки точні ефемериди супутників сьогодні визначаються у системі ITRFXX, то і отримані на перманентних станціях координати теж виражаються саме у цій системі. Кількість станцій GPS-спостережень щораз зростає, а їхню роботу та орбіти супутників координує служба глобальних навігаційних систем IGS (International GNSS Service (колишня: International GPS Service)). Основним завданням цієї служби є обчислення орбіт супутників через координати станцій, визначених із GPS-розв'язків, суміщаючи визначення орбіт з системою ITRF.

Сучасна хронологія ITRF починається з 1988 року, коли вперше було встановлено об'єднаний розв'язок ITRF88. Пізніше з'явилися нові реалізації ITRF89, ITRF91, ITRF93, ITRF94, ITRF96, ITRF97, ITRF00, і сучасна – ITRF05. Відзначимо, що у реалізацію ITRF00, епохи 1997.0 входить лише одна українська перманентна станція – GLSV (Голосієво, м. Київ), а у реалізацію ITRF05, епохи 2000.0 – три українські перманентні станції, вже зазначена станція GLSV та станції UZHL (м. Ужгород) та POLV (м. Полтава). Решта українських перманентних станцій теж брали участь у встановленні системи ITRF05 (станції SULP, MIKL), чи сьогодні у її підтримці (станції CNIV, EVPA, KHAR), проте у фінальний розв'язок не потрапили: одні – через близькість розташування одна до одної, та окремі фактори точності, особливо швидкості зміни координат, інші – через нетривалі періоди спостережень, але треба відзначити, що координати всіх наявних сьогодні 8 перманентних станцій України, що входять організаційно у Європейську перманентну мережу (EPN), регулярно (кожен тиждень) визначаються Європейськими центрами аналізу і публікуються на сайті [17] у системі ITRF05, епохи спостереження.

Під час виконання геодезичних робіт важливим фактором є стабільність системи координат у часі. З цієї позиції референціальна система ITRFXX не належить до статичних систем, а є кінематичною, тобто такою, положення пунктів якої узгоджені через координати, які підлягають малим змінам у часі, спричиненим геофізичними ефектами (рухами тектонічних плит, припливними деформаціями тощо). Отже, кінематичні референціальні системи визначаються через координати пунктів, що реалізують систему разом із зміною у часі координат тих пунктів (швидкістю їхньої зміни). Визначення швидкості змін координат пов'язане з тривалим моніторингом їхнього положення на певному проміжку часу, тому їхні значення відомі лише для перманентних станцій.

Основні принципи роботи із кінематичними референціальними системами можуть бути отримані так:

1. Наприклад, реалізація ITRF05 складається із списку пунктів (перманентних станцій) разом з:

- положеннями на деяку задану епоху t_0 , $(X, Y, Z)_{t_0}$;
 - швидкостями V_X, V_Y, V_Z .
2. Положення пункту (перманентної станції) на середню епоху спостережень t_c буде:

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_{t_c}^{ITRF05} = \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_{t_0}^{ITRF05} + \begin{Bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{Bmatrix}^{ITRF05} \times (t_c - t_0). \quad (1)$$

Зауважимо, що замість наведеної процедури можна використовувати готові координати тих самих перманентних станцій на моменти спостережень, а саме їхні тижневі значення, що визначаються європейськими центрами аналізу. Як показали наші дослідження, точність останніх є нижчою (десь близько 1 см) ніж координат, що отримуються за (1).

До статичних земних референцних систем належать системи, у яких не виявлено змін у часі взаємного положення станцій спостережень, тобто “вільні” від тектонічних рухів. Загалом статичними земними референцними системами є системи, визначення яких ґрунтуються на узгодженні напрямів осей тих систем. До статичних загальноземних референцних систем належить Європейська земна референцна система координат – ETRS89. Принцип встановлення такої системи ґрунтувався на такому. Відомо, що Європейська континентальна плита зміщується достатньо однорідно (близько 2 см/рік) відносно інших тектонічних плит, а, отже, і відносно системи ITRS, практичною реалізацією якої є ITRFXX. З урахуванням цього Підкомісія Міжнародної асоціації геодезії (IAG) для Європи – EUREF вирішила визначити систему, яка б була фіксованою щодо Європейської плити і тим самим мала стійкі координати, тобто була статичною. За аналогією з ITRS система отримала назву ETRS, а її реалізація ETRFYU або ETRS89, оскільки координати пунктів у цій системі є ідентичними координатам системи ITRS для 1989 року. Ключовим інструментом у підтримці ETRS89 є мережа перманентних станцій EUREF – EPN, яка охоплює європейський континент порівняно рівномірним покриттям. Станції EPN ведуть безперервні супутникові спостереження за допомогою високоточних GPS/GLONASS приймачів, які працюють під чіткими стандартами і керівними принципами, що гарантують ефективність EPN і надійність її результатів. З 2003 р. ETRS89, як уніфікована земна референцна система Європи, є офіційною системою у переважній більшості європейських країнах і слугує основою для геодезичних референцних даних як складових європейської інфраструктури просторових даних.

У табл. 1 наведено перелік загальноєвропейських систем координат, прийнятих EUREF разом з іншими європейськими структурами, для практичного використання геопросторових даних.

Таблиця 1

Загальноприйняті у Європі референцні системи координат

Європейські референцні системи координат	
Ідентифікатор системи	Опис
ETRS89 / (X, Y, Z)	Система ETRS89 з просторовими прямокутними координатами.
ETRS89 / (B, L, H)	Система ETRS89 з еліпсоїдними (геодезичними) координатами (еліпсоїд GRS80).
ETRS-TMzn / (x, y)	Система ETRS89 у поперечній проекції Меркатора (подібно до UTM для північної півкулі). Використовується для топографічних карт

масштабу більше за 1: 500 000.

Становлення та розвиток класичних геодезичних референцних систем ґрунтувався на принципі встановлення вихідних геодезичних дат та виборі конкретного референц-еліпсоїда за результатами астрономо-геодезичних, а пізніше і гравіметричних робіт у межах окремих держав. Формування єдиного координатного простору держави, тобто встановлення геодезичної референцної системи координат було довготривалим процесом і мало певні аспекти. Не зупиняючись тут на деталях створення класичних геодезичних референцних систем, зауважимо лише таке. Як показали подальші дослідження цього питання, подібно встановлені геодезичні референцні системи забезпечують точність визначення положення будь-якого пункту мережі відносно початкового пункту близько 1 м і більше (Великобританія – близько 5 м, Німеччина – до 3 м, Італія – 3–4 м, Австрія – 1,5 м тощо). Такі дані було отримано з використанням методу трансформування координат. Не є винятком і геодезична мережа України. За результатами перевірки, виконаної нами на значній частині пунктів ДГМ України різного класу, було виявлено істотні відхилення трансформованих координат. Статистичні дані цієї перевірки наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Статистика планових зміщень координат пунктів ДГМ України

Параметри	Значення планових зміщень, м
Максимальне значення	2.48
Мінімальне значення	0.21
Середнє значення	1.22
Стандартне відхилення	1.39

Щоб підвищити точність трансформування координат, використовувалися різноманітні технологічні прийоми: розроблення та вдосконалення математичної бази трансформування, визначення локальних параметрів для окремих регіонів тощо. Проте у межах перерахованих заходів, що розроблялися для вдосконалення класичної координатної основи, не усувалася головна перепона, а саме *точність вихідних даних була набагато нижчою за точність безпосередніх результатів супутникових вимірювань*. Це значно утруднювало ефективне використання наявної державної геодезичної мережі (ДГМ). Основною причиною такого стану ДГМ є загальні деформації (негомогенність) геодезичної мережі (глобального, регіонального та локального характеру), спричинені класичними технологіями її побудови. Саме вони не дають змоги ефективно поєднувати наявні координатні системи і новітні супутникові технології з визначення місцеположення.

Виходячи із фактичної точності трансформування координат у країнах з різними за площею територіями, можна, у загальному, подати точність трансформування класичних геодезичних мереж залежно від масштабу аркуша топографічної карти (табл. 3).

Таблиця 3

Усереднена точність трансформування класичних геодезичних мереж

Розміри лінійні, км	Розміри кутові,	Масштаб	Точність, м
445×456	4 ⁰ × 6 ⁰	1: 1 000 000	1.5
37×38	20' × 30'	1: 100 000	0.8
18×19	10' × 15'	1: 50 000	0.3
10×10	5' × 7.5'	1:25 000	0.1
5×5	2.5' × 3.45"	1:10 000	0.05

З початком 90-х років ХХ ст. більшість розвинутих країн вже перейшли або перебували на етапі переходу до нових геодезичних референцних систем координат. Спочатку ця проблема розв'язувалася традиційним трансформуванням координатних систем, а потім, коли стала

зрозумілою безперспективність прямого трансформування, пропонувалося повністю перейти на загальноземні референційні системи.

Проти такого кроку почали виступати спеціалісти, що займалися практичними питаннями у галузі топографо-геодезичного виробництва, картографування, земельного кадастру, ГІС тощо. Для них важливими були питання використання сучасних вимірювальних технологій без істотних змін координатної основи, адже втрачався взаємозв'язок з раніше напрацьованим матеріалом. Що ж робили у такому разі?

З часу виникнення супутникових технологій GPS-спостереження почали інтенсивно застосовуватися для визначення координат пунктів геодезичної мережі у загальноземній референційній системі. Характерною особливістю того періоду було те, що паралельно з розвитком та розширенням географії супутникових спостережень проходило становлення земної референційної системи ITRS з її реалізаціями ITRFXX та ETRS89. Запровадження цілого ряду EUREF GPS-кампаній у період з 1989 р. і до 1999 р. мало за мету фактично згущення європейської супутникової мережі, що приводило до все нових реалізацій референційної системи ETRS89. Національні етапи у становленні референційної системи ETRS89 закінчилися переважно до 2000 р. Реалізатором цієї референційної системи стали перманентні GPS-станції, кількість яких щороку збільшувалася і на кінець 2007 р. досягла >200.

Отже, десь на кінець 2000 р. більше не було потреби долучати дані GPS-спостережень, виконаних на пунктах національних геодезичних мережах, до реалізації системи ETRS89. Методика виконання і програма спостережень та результати оброблення у межах окремих GPS-кампаній лише погоджувалися з адміністративними органами EUREF і використовувалися вже у національних програмах. Це стосувалося переважно тих країн, де подібні кампанії відбувалися раніше. Проведення GPS-кампаній у тих країнах, що раніше не долучалися до цього процесу, проходило під прискіпливим контролем і мало за мету адаптувати геодезичну мережу цієї країни до референційної системи ETRS89. Після всебічного аналізу результатам GPS-кампанії надавався стандартизований клас *B* (точність близько 1 см на епоху спостережень). Повторне здійснення GPS-кампаній давало змогу оцінити зміни координат пунктів у геодезичній мережі і, після порівняння їх з даними геокінематичних моделей руху тектонічних плит для цього регіону, надавало право на присвоєння мережі класу *A* (точність ≤ 1 см для будь-якої епохи). Вказаним шляхом вже пройшла більшість європейських країн.

Отже, у більшості провідних країн Європи сформувалася така схема координатного забезпечення: національна референційна система координат, адаптована до загальноєвропейських систем ETRS89 (див. табл.1) + національна система плоских координат, пов'язана з традиційною геодезичною референційною системою і яка отримана за допомогою вибору деякої проекції еліпсоїда на площину та відповідним трансформуванням систем координат через у належний спосіб встановлені параметри трансформації.

Зазначимо, що деякі країни, такі, наприклад, як Литва, Латвія, Естонія, Молдова повністю відмовилися від класичної геодезичної референційної системи СК-42, а перейшли на системи, що є сумісними із загальноземними. У тих прикладних застосуваннях національного масштабу, де не вимагається збереження абсолютних значень координат і у всіх загальноєвропейських проектах, де використовується геопросторова інформація у вигляді координатної основи (більшість ГІС-застосувань), рекомендується повністю перейти на референційну систему ETRS89. До цього переліку треба зарахувати і всі фундаментальні дослідження у галузі наук про Землю (рух земної кори і полюсів, варіації гравітаційного поля і швидкість обертання Землі, дрейф континентів і зміни їхніх берегових ліній тощо). Якщо зважити, що мотивація у всіх була різною, то треба підкреслити і визначальний фактор, а саме однорідність системи координат та її безпосереднє поєднання із засобами отримання числових характеристик.

Проте більшість країн залишилися на позиції поєднання референційних систем: нові вимірювальні технології + модифікація національної геодезичної референційної системи на базі референційної системи WGS84/ITRFXX/ETRS89. І оскільки загальної технології поєднання референційних систем немає, то шляхи і підходи до її реалізації є предметом досліджень і мають рекомендаційний характер.

Як все-таки здійснювалося поєднання референційних систем? Початкова схема майже у всіх країнах була однаковою. Передовсім створювалися станції GPS-спостережень, які брали участь у реалізаціях ITRFXX/ETRS89 і, отже, адаптували ці системи координат на територіях конкретних країн.

Кількість таких станцій коливалася у межах від 5 до 15 по країнах. Згодом вони перетворилися на повноцінні перманентні станції і утворили кістяк EPN. Як правило, такі станції розміщувалися у тих установах і відомствах, що займалися питаннями впровадження супутникових технологій, мали достатньо надійно закріплені зовнішні знаки і не були суміщені з пунктами класичних геодезичних мереж.

Наступним кроком було згущення цієї рідкої за побудовою GPS-мережі. Такими пунктами згущення вже слугували пункти геодезичної мережі. Цей процес, залежно від організаційних і фінансових можливостей, поширювався практично на всю (для малих країн, за винятком Німеччини) геодезичну мережу країни або на значну її частину.

Кінцевим кроком поєднання референсних систем було здійснення процедури трансформування. На цьому етапі вже якоїсь загальноприйнятої методики не пропонувалося. Це пояснювалося тим, що використання результатів супутникових визначень у національному масштабі було виключно внутрішньою проблемою окремої країни і рекомендації зводилися до такого. Використовувати координати пунктів класичної геодезичної мережі, що були визначені у національній референсній системі, наприклад, СК-42 (СРСР та країни соцтабору), NTF (Франція), DHDN (Німеччина), OSGB36 (Великобританія), ROMA40 (Італія) тощо за вихідні при виконанні супутникових спостережень вважати некоректним і рішуче від цього відмовитися. Для того, щоб отримувати координати пунктів із GPS-спостережень, у класичній національній референсній системі потрібно подати її у вигляді певної моделі, тобто знайти таку відповідність між референсними системами, яка б з певною точністю давала змогу наблизити їх між собою. Такою відповідністю слугували різноманітні математичні прийоми трансформування координат. Проте не варто забувати, що ми пробуємо визначити функцію, яка моделює фактичне спотворення геометрії у невідомій нам системі. Виникає спокуса вибрати якомога більше спільних для обох систем пунктів і використати трансформацію найвищого порядку, вважаючи, що деформації мережі у наших вихідних даних є результатом дії такої регулярної функції. Якщо ж вона не є регулярною, то виникає проблема “неякісних” пунктів або емпіричне знаходження “правильних” спільних пунктів. І оскільки традиційні референсні системи є *негомогенними*, то трансформація квазігомогенної системи, наприклад, ETRS89 з традиційною типу 7-параметричного Гельмерта є лише деяким наближенням для національного використання. Прикладів такого твердження є багато. Так, у 1995 р. на основі декількох внутрішніх GPS-кампаній на пунктах класичної геодезичної мережі німецькими фахівцями було встановлено безпосередній зв'язок між референсними системами DHDN та ETRS89. Точність трансформування координат у межах всієї Німеччини (357 тис. км²) становила близько 5 м. Розширення мережі спільних пунктів (протягом наступних 5 років) дало змогу дещо підвищити точність трансформування і довести її до 3 м (2001 р.), а для окремих земель і до 1 м, але не більше. Аналогічна ситуація була і у Великобританії (245 тис. км²). Фундаментальна GPS-мережа складалася із 22 пунктів на відстанях 100–150 км, а національна GPS-мережа згущення була побудована із розрахунку у відстанях між пунктами до 25 км для приміських територій і до 50 км – для сільських районів. Точність трансформування координат забезпечувалася на рівні 5 м. З подальшим розширенням мережі згущення до декількох тисяч пунктів вдалося дещо зменшити похибку трансформування: вона склалася на рівні 2 м. В інших, менших за площею країнах, трансформування координат дало кращі результати і при доведенні мережі GPS-згущення до тисячі і більше пунктів точність коливалася від 5–10 см і більше.

Наведені вище дані дають змогу зробити такі висновки. Точність звичного трансформування координат регламентується ступенем негомогенності класичної геодезичної мережі (деформаціями різних масштабів) і значною мірою залежить від її протяжності, тобто від площі покриття. Це можна пояснити якоюсь мірою і тими технологіями створення і оброблення великих геодезичних мереж. Тому для невеликих геодезичних мереж разове згущення GPS-мережі дає змогу отримати з достатньою для практики ведення топографо-геодезичних робіт надійні параметри трансформування координат, що надалі уможливує використання всього сучасного арсеналу супутникових технологій для повноцінного координатного забезпечення. Пункти згущення GPS-мережі можуть використовуватися лише для метрологічного контролю GNSS-технологій, оскільки роль вихідних переходить до базових і перманентних станцій.

Для великих за площею країн немає змісту у детальному згущенні мережі GPS-технологіями: ні точність трансформування координат істотно не підвищується, ні використання таких пунктів у майбутньому як вихідних сучасними технологіями з використанням базових станцій і технологій RTK не передбачено. Так, створена ще у кінці 90-х років XX ст. у Німеччині служба точного

позиціонування SAPOS, що базується на мережі базових станцій, дає змогу користувачам визначати своє тривимірне положення з сантиметровою точністю не більше ніж за 2–3 хв у системі координат ETRS89. З часом практика використання цієї технології визначення координат показала, що для частини користувачів таке поєднання сучасних технологій спостережень і отримання кінцевих результатів у єдиній однорідній статичній референційній системі є оптимальним, а для іншої, переважно геодезистів-виробничників, створює певні проблеми. І якщо сантиметрова точність для одних є більше ніж фактична необхідність, то для других не більше ніж формальність. Річ у тім, що часто необхідно знати координати у тих системах, які використовувалися раніше, тобто класичній національній чи місцевій. Ще неоднозначніша ситуація з висотами.

Як показали подальші дослідження, вирішення цієї проблеми полягало у тому, щоб отримати параметри трансформування координат для якомога меншого за розмірами елемента земної поверхні, а потім поєднувати їх на всю необхідну територію. Тобто створити певне трансформаційне поле. Не вдаючись у деталі цього процесу і не аналізуючи тут позитивний досвід багатьох країн, зауважимо таке. Для успішного вирішення поставленої вище проблеми необхідно створити базу даних з координатами пунктів у класичній (місцевій) системі координат та референційній системі ITRFXX/ETRS89, а також і з нормальними висотами цих пунктів. Кількість таких пунктів повинна бути не меншою за 40 на 1000 км². Це приблизно площа одного адміністративного району в Україні. Звичайно, досягти такого показника, використовуючи традиційні супутникові спостереження у вигляді довготривалих сесій, ще довго не вдасться, переважно через організаційні і фінансові питання.

Тому оптимальним є не виконання спостережень на всій мережі, яка може складатися із декількох десятків тисяч пунктів, а загальне урівнювання геодезичної мережі. При такому урівнюванні приймається, що координати декількох сотень пунктів, на яких виконані GPS-спостереження, є вихідними, а між вихідними та рештою пунктів виконано традиційні лінійно-кутові вимірювання. Таким шляхом пройшли вже багато країн. Винятком з цього є Німеччина, яка, завдяки створенню мережі активних супутникових станцій SAPOS, змогла за короткий період виконати масові GPS-спостереження практично на всіх наявних пунктах класичної геодезичної мережі.

В Україні тільки завершується загальне урівнювання державної геодезичної мережі, і водночас, робляться спроби створення активної супутникової мережі базових станцій на регіональному рівні.

4. Використання додаткової інформації.

Як правило, серед додаткової інформації, що вимагається для оброблення GPS-спостережень, фігурують ефемериди супутників та координати базових або перманентних станцій.

Відомо, що ефемериди GPS-супутників поділяють на два типи щодо точності: **Broadcast** – бортові, що передаються безпосередньо від GPS-супутників під час виконання спостережень у вигляді навігаційного файла (файл *****.nav** формату даних RINEX) та **Final** – точні, що отримуються у центрі оброблення IGS (файл **igswwwwd.sp3**, де **www** – порядковий номер GPS-тижня, **d** – порядковий номер дня тижня (0 – неділя, 1 – понеділок, ..., 6 – субота)). Отримати точні ефемериди можна орієнтовно через три тижні після виконання спостережень на сайті [12]. Треба відзначити, що точні ефемериди, своєю чергою, поділяють на **Ultrarapid** (дуже швидкі) та **Rapid** (швидкі). **Ultrarapid** ефемериди відрізняються від **Broadcast** ефемерид тим, що їх регулярно оновлюють (тепер що три години), а **Rapid** ефемериди через 17 год. Отримати їх можна практично у той самий день, коли велися спостереження або на наступний день на сервері IGS [14]. Якщо сучасна точність **Broadcast** ефемерид близько 2 м, то точність **Final** та **Rapid** ефемерид приблизно однакова і становить < 5 см, а точність **Ultrarapid** ефемерид – близько 10 см.

Перед будь-яким фахівцем, що займається обробленням GPS-спостережень, постійно виникає питання: чи потрібно йому враховувати точні ефемериди? Для відповіді на це питання, передовсім, необхідно знати, як впливає точність ефемерид на кінцевий результат, тобто на координати пункту. У першому наближенні похибку обчислення довжини базової лінії S можна підрахувати за такою формулою

$$m_S = \frac{S}{\rho} \times m_{efm.},$$

де: ρ – відстань від пункту на земній поверхні до супутника (близько 20 000 км), $m_{efm.}$ – похибка ефемерид супутника. Якщо зважити на точність ефемерид на початку 90-х років минулого століття близько 20 м, то відповідна похибка на відстані 20 км становила 2 см. З сучасною точністю визначення ефемерид супутників [10] отримаємо оцінки, що наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Похибки визначення довжин базових ліній ($S \approx 20$ км) за даними IGS

Ефемериди	$m_{efm.}$, см	m_S , мм
Broadcast	160	1.6
Ultrarapid	□ 10	0.1
Rapid	5	0.05
Final	<5	0.05

Ці усереднені дані, що наведені у табл. 4, вказують на те, що при обробленні коротких баз, навіть до 100 км, можна не враховувати точні ефемериди при сучасному розвитку GPS-технологій. Що стосується виконаних у минулі роки спостережень чи спостережень високої точності сьогодення, то, безсумнівно, використання точних ефемерид ϵ , на наш погляд, обов'язковим. Підтвердженням цього є дані табл. 5, отримані нами із [11] порівнянням бортових ефемерид із точними ефемеридами IGS.

Таблиця 5

Похибки Broadcast ефемерид (Final IGS – Broadcast)

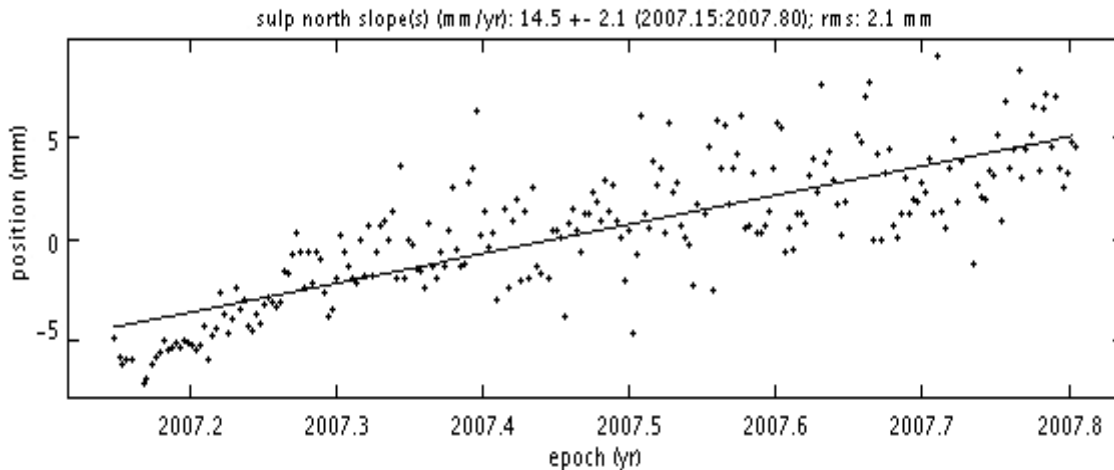
Дата	$m_{efm.}$, м	
	Середнє	Максимальне
1.01.1999 р.	5.0	20
1.01.2000 р.	4.3	17
1.01.2001 р.	4.1	16
1.01.2002 р.	5.2	31
1.01.2003 р.	4.6	33
1.01.2004 р.	2.7	9
1.01.2005 р.	3.1	14
1.01.2006 р.	2.0	10
1.01.2007 р.	1.9	7

Дані табл. 5 підтверджують той факт, що **Broadcast** ефемериди є всього лише продуктом передбачення (прогнозу) і не можуть замінити їхніх справжніх значень. Особливо це може стосуватися визначення геодезичної висоти, яка, на відміну від планових координат, визначається з меншою точністю. Тому при обробці GPS-спостережень, у яких вимагається високоточне визначення висотної складової врахування точних ефемерид, хоча б **Rapid** є обов'язковим. У табл. 6 наведені зміни координат супутників за конкретний день спостереження.

Як видно із табл. 6, зміни координат окремих супутників досягають майже 6 м, а їхні розходження – до 10 м. Тому при спостереженні конкретного набору супутників і невеликих інтервалах часу їхнього використання можливі достатньо істотні похибки за неточне знання ефемерид супутників.

Що стосується використання координат базових чи перманентних станцій, то ще раз наголосимо: йдеться не про координати цих станцій або пунктів державної геодезичної мережі у системах СК-42 чи СК-63. Їхня точність може задовольняти вимоги виконання робіт лише на окремих ділянках (районах) і то за умови правильного знаходження параметрів трансформування координат саме для цих ділянок. Проте навіть і за дотримання цієї умови нам апріорі невідомо границі наших ділянок, де знайдені параметри трансформування вже “не діють”. Тому, щоб з часом не треба було здійснювати нові спостереження, на нашу думку, необхідно обов'язково виконувати обробку у “супутникових” координатах, а вже потім переходити до певної референцної системи.

Постає закономірне запитання: чи необхідно чекати щоразу мінімум три тижні (у разі використання перманентних станцій як вихідних) і чи потрібно щоразу, коли виконуються GPS-спостереження, заново визначати координати базової станції (у разі використання її як вихідної). Відповідь на це питання лежить у самій природі референцної системи ITRS: реалізації цієї системи, наприклад, ITRF2005 є кінематичними. Це означає, що координати цієї системи змінюються з часом. Зміна координат становить близько 2 см/рік для території України. Як приклад, на рисунку наведено графік зміни однієї з координат за період спостережень 2007.15 – 2007.80 для перманентної станції SULP. Аналогічними є графіки зміни і з інших перманентних станцій.



*Приклад зміни координати X [мм] на станції SULP
за 8-місячний період спостережень у 2007 р.*

Якщо поставити умову, щоб похибка за кінематичність системи координат не перевищувала 1 см, то зрозуміло, з яким інтервалом часу можна вважати вихідні координати статичними – до півроку максимально. Використання координат перманентних станцій як вихідних при обробленні GPS-спостережень тепер не викликає застережень, проте для базових станцій їхні координати необхідно визначати щопівроку. Зрозуміло, що така постановка питання не дуже приваблює користувачів. Оптимальним шляхом залишається використання процедури переведення з епохи отриманих при встановленні координат базової станції на епоху виконання поточних спостережень. Наприклад, координати базової станції були визначені у системі ITRF2005 на епоху 1401 GPS тижня. Спостереження на поточному об'єкті виконують у 1440 GPS тижні. Тоді

$$X_{1440} = X_{1401} + V_x(39/52),$$

$$Y_{1440} = Y_{1401} + V_y(39/52),$$

$$Z_{1440} = Z_{1401} + V_z(39/52).$$

У разі реалізації цього підходу необхідно знати ще швидкості зміни координат базової станції. Як правило, ці швидкості визначаються лише на перманентних станціях. Для інших станцій їх можна взяти або близькими за значеннями до сусідніх перманентних станцій, або обчислити самостійно за геофізичними моделями рухів тектонічної плити, або скористатися готовим програмним пакетом, розробленим на кафедрі вищої геодезії і астрономії Національного університету “Львівська політехніка”. Аналогічно можна зробити із координатами перманентних станцій.

1. Баран П.І., Чорнокінь В.Я. Визначення тривалості GPS-спостережень в геодезичних мережах // *Вісник геодезії та картографії* . – Київ, 2004, №2. – С.12–15. 2. Глозов В.М., Третяк К.Р. Оцінка впливу додаткового відбиття GPS сигналів на точність визначення місцеположення // *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. – 2004. – № 65. – С. 72–76. 3. Глозов В., Третяк К., Полець О. Оцінка впливу багатопрошаровості поширення GPS-сигналів на точність визначення

координат об'єктів // Зб. наук. пр. "Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва". – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2007. – В.І (13). – С.103–108. 4. Горб А., Прокопов А., Нежальський Р. Использование метода анализа иерархий для оптимального выбора канала информационного обмена в локальной сети GPS станций // Зб. наук. пр. "Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва". – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2007. – В.ІІ (14). – С.118-122. 5. Костецька Я., Торопа І. Про врахування впливу тропосфери на результати GPS спостережень // Зб. наукових праць "Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва". – Вид-во "Ліга-прес", Львів. – 2002. – С. 89-93. 6. Костецька Я., Торопа І., Фок О. До питання тривалості GPS-спостережень // Зб. наук. пр. "Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва". – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2005. – С.60–65. 7. Савчук С., Калинич І., Третьяк К. Супутникова система спостережень – елемент ефективного управління земельними ресурсами // Землепорядний вісник. – Київ, 2007. – №1. – С.37–43. 8. Цюпак І., Савчук С., Бойчук Я. Про точність двовимірного перетворення координат пунктів // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2007. – № 68. – С. 132–142. 9. Янчук Р.М. Уведення поправок за тропосферну затримку у файли спостережень на GPS станціях // Вісник геодезії та картографії. – Київ, 2006, №1. – С.21–24. 10. <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>. 11. <http://gge.unb.ca/gauss/htdocs/grads/orbit/>. 12. <ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs.cb/product/>. 13. <ftp://igs.eng.ign.fr/pub/igs/data/>. 14. http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/dcnav/igs.cb_product_www.html. 15. <http://www.eps.com.ua/index.php>. 16. <http://www.omnistar.com/> 17. <ftp://epncb.oma.be/pub/product/combin/> 18. <ftp://igs.eng.ign.fr/pub/igs/data>