

ОГЛЯД GALILEO HAS, ПОРІВНЯННЯ З АНАЛОГАМИ ТА ОЦІНКА ПЕРСПЕКТИВ

У 2022 р. Galileo, європейська ГНСС, запустила перший етап своєї ініціативи HAS (High Accuracy Service). Надаючи безкоштовні та глобальні поправки на затримки годинників та орбіти супутників, Galileo HAS забезпечує дециметрову точність позиціонування без необхідності використання додаткових наземних мереж. Це дослідження має на меті оцінити досягнення у технологіях точного позиціонування, з акцентом на службі Galileo HAS. Підкреслено важливість методів точного позиціонування, урахуваючи одноточкове позиціонування (SPP), кінематичне позиціонування у реальному часі (RTK) і високоточне позиціонування точки (PPP), а також оцінено продуктивність Galileo HAS порівняно з іншими глобальними службами доповнення PPP, такими як QZSS CLAS і BeiDou PPP-B2b. Методологія передбачає комплексний аналіз технічних можливостей, точності та експлуатаційних обмежень HAS на основі огляду літератури та порівняльного аналізу даних про ефективність позиціонування. Результати підтверджують, що Galileo HAS досягає дециметрової точності по всьому світу, з горизонтальною точністю нижче ніж 20 см і вертикальною точністю нижче ніж 40 см, але має недолік – велику тривалість збіжності через відсутність поправок на атмосферні та фазові зсуви на початковому етапі. Наукова новизна полягає у визначенні потенціалу HAS як першої глобальної безкоштовної служби коригування PPP через Signal-in-Space (SIS), виокремленні її практичних переваг у напівзакритих середовищах порівняно із традиційними системами покращення PPP. Дослідження також підкреслює унікальні проблеми інтеграції, пов’язані із коригуванням за допомогою HAS через особливі формати шифрування. На практиці результати дослідження підкреслюють корисність HAS у геодезії, картографії в разі застосування в реальному часі, особливо в умовах обмежених ресурсів. Однак у дослідженні висвітлено критичні недоліки, що потребують вдосконалення, такі як упровадження атмосферних поправок і коригування фазового зсуву, щоб задовольнити вимоги точного позиціонування у реальному часі. У висновках відзначено безперечну корисність такого сервісу, як Galileo HAS, розглянуто його недоліки та методи їх подолання.

Ключові слова: GNSS, Galileo High Accuracy Service, PPP, RT-PPP, точне позиціонування, навігація.

Вступ

Для досягнення необхідного рівня точності та надійності позиціонування найкращим способом є поєднання інформації з декількох взаємодоповнених джерел. Серед них глобальні навігаційні супутникові системи займають центральне місце завдяки здатності забезпечувати глобальне місцезнаходження практично в будь-якій точці відкритого простору. Природно, що вимоги до точності та надійності GNSS-позиціонування також зростають. Для досягнення цієї мети розроблено кілька технологій, таких як точне точкове позиціонування (PPP), кінематика в реальному часі (RTK), а останнім часом – гібридизація обох технологій, PPP-RTK. Серед відомих методів позиціонування на основі GNSS, RTK все ще залишається найточнішим. Однак через технологічну склад-

ність і пов’язану із цим вартість RTK, як правило, обмежується вузьким колом спеціалістів, переважно в галузі геодезії. “Стандартну” технологію PPP нині використовують для широкого спектра застосувань, але її точність все ще недостатня, а час збіжності тривалий.

Зростання попиту на позиціонування у реальному часі спонукало Міжнародну службу GNSS (IGS) запустити пілотний проект у реальному часі в 2007 р. й офіційно запустити службу в реальному часі (RTS) в 2013 р. [Elsobeiey & Al-Harbi, 2016]. Існує багато факторів, що впливають на точність PPP у реальному часі (RT PPP). Успішне подолання невизначеності є ефективним підходом до підвищення точності позиціонування у реальних умовах [Liu et al., 2020; Gao et al., 2023]. Однак RT-PPP потребує високоточних орбітальних і часових продуктів у реальному часі. Щоб

вирішити цю проблему, постачальники супутникових навігаційних систем розробляють власні космічні системи доповнення PPP. Наприклад, Китай запустив службу доповнення PPP-B2b для навігаційної супутникової системи BeiDou (BDS), а Японія представила службу доповнення сантиметрового рівня (CLAS) для супутникової системи Quasi-Zenith (QZSS). Доповнення CLAS для QZSS в Японії дає змогу досягти похибки позиціонування менше ніж 6,4 см [Takahashi et al., 2018], тоді як BDS PPP-B2b може забезпечити точність позиціонування на рівні дециметрів у кінематиці реального часу [Yang et al., 2022].

Щоб підтримати цю тенденцію, Європейська комісія та проєкт Galileo оголосили про запуск високоточної служби (HAS) 24 січня 2023 року. Ця послуга має стати першою глобально доступною службою коригування PPP, що використовує Signal-In-Space (SIS) як метод поширення [Galileo HAS ICD, 2022]. Galileo HAS працює, переважно, як будь-який комерційний сервіс PPP, але із деякими істотними відмінностями. По-перше, сигнал доступний безкоштовно через інтернет або безпосередньо через сигнал Galileo E6-B. Оскільки поправки передають із супутника Galileo, а не з геостационарного супутника зв'язку, набагато легше отримувати поправки в напівзакритій місцевості, такій як каньйони, паркові зони тощо. Важлива технічна проблема – обмежена кількість приймачів, які можуть реалізувати Galileo HAS.

Очікується, що HAS стане базовим сервісом позиціонування для багатьох галузей, таких як авіація, точне землеробство, навігація БПЛА, морські перевезення тощо. Однак адаптація такого нового сервісу часто залежить від його доступності та зручності використання. Крім того, треба пам'ятати, що на ринку вже є інші подібні сервіси, тому підвищення доступності HAS та визначення її реальної точності позиціонування – нагальні завдання.

Огляд сучасних методів позиціонування

Визначення абсолютного положення точки – фундаментальне завдання GNSS позиціонування. Найпоширенішим методом абсолютного позиціонування GNSS є позиціонування однієї точки (SPP). Це фундаментальний метод позиціонування GNSS, який визначає місцезнаходження користувача на підставі вимірювання псевдодальності супутникових сигналів. Він працює на одному приймачі й використовує ефемериди і дані годинника, надані супутниками, для обчислення положення, швидкості й часу. Рівняння псевдодальності для SPP можна записати як:

$$p_r^S = \rho_r^S(t) + c\Delta\delta_r^S(t), \quad (1)$$

де p_r^S – виміряна псевдовідстань між приймачем r та супутником S ; $\rho_r^S(t)$ геометрична відстань між супутником і приймачем; c – швидкість світла; $\Delta\delta_r^S$ – комбіноване зміщення годинника приймача і супутника відносно системного часу.

SPP широко використовується для загальної навігації та низькоточних застосувань завдяки його простоті та глобальній доступності [Teunissen & Montenbruck, pp. 612–613]. Однак він обмежений похибками, спричиненими атмосферними затримками, неточностями орбіти супутника і годинника, а також багатопроменевими ефектами, що призводить до помилок позиціонування, які зазвичай становлять від декількох метрів до десятків метрів, залежно від якості приймача і середовища поширення сигналу.

Протягом трьох десятиліть, з 1990 р. до 2020 р., відносно або диференціальне позиціонування було провідним методом точного позиціонування та опрацювання GNSS-даних. У цьому методі координати невідомої точки визначаються відносно іншої опорної точки із відомими координатами. Такий підхід дає змогу усунути або значно зменшити більшість похибок GNSS-спостережень, які є просторово корельованими в обох точках, забезпечуючи високу точність позиціонування [Teunissen & Montenbruck, с. 623].

На початкових етапах реалізація цього методу потребувала однієї базової станції та одного або кількох роверів, які працюють у ло-

кальній зоні в режимі реального часу. За такого підходу можна було досягти точності позиціонування від субметрового до сантиметрового рівня. Точність залежала передусім від того, чи використовували вимірювання псевдодальності, фази несучої або їх комбінацію, а також від успішності вирішення неоднозначностей із застосуванням фази несучої.

Опрацювання несучої фази забезпечує найвищу точність позиціонування у реальному часі, відому як кінематичне позиціонування у реальному часі (RTK). З роками RTK стало стандартною процедурою для високоточного позиціонування і навігації в таких галузях, як геодезія, інженерія та керування БПЛА [Martínez-Carricondo et al., 2023; Manandhar et al., 1999]. Ця технологія дає змогу досягти сантиметрової точності, що критично важливо для застосувань, які потребують високої точності.

З метою розширення зони покриття та підвищення надійності сервісу технологія RTK згодом перейшла на мережевий рівень, сформувавши так звані RTK-мережі або network-RTK [Rizos, 2009]. Це уможливилось завдяки створенню регіональних мереж референсних станцій, які спільно передають поправки користувачам на великій території. У цьому контексті застосовують підхід, відомий як Observation State Representation (OSR), коли користувачам передається агрегована поправка. Ця поправка відповідає сумі індивідуальних поправок, застосованих до спостережень, що дає змогу досягти високої точності без необхідності індивідуального коригування для кожного користувача.

Розвиток мережевих RTK і впровадження OSR істотно розширили можливості GNSS-технологій, оскільки дають змогу здійснювати високоточне позиціонування у режимі реального часу на великих територіях. Це відкриває нові перспективи для застосування в автономних транспортних засобах, управлінні автопарком, моніторингу інфраструктури та інших галузях, де точне позиціонування є ключовим фактором успіху.

У традиційному підході PPP, як і в інших методах позиціонування, таких як DGNSS (наприклад, SBAS на основі коду) або вимірювання різниці фаз (наприклад, RTK), необхідні поправки, отримані від референсних станцій.

Однак PPP використовує інший підхід до досягнення високої точності. Замість того, щоб безпосередньо обчислювати або передавати поправки, як це роблять у RTK або SBAS, PPP використовує дані про точні орбіти і часові поправки.

Для PPP зазвичай комбінують двочастотні дані, щоб усунути майже всі затримки поширення в іоносфері. Комбінації безіоносферного (IF) двочастотного псевдодіапазону GNSS (ρ_{IF}) і фази несучої (φ_{IF}), пов'язані із положенням користувача, годинником, тропосферою і параметрами невизначеності, визначають відповідно до таких спрощених рівнянь спостереження (2) [Teunissen & Montenbruck, с. 724]:

$$\begin{aligned} p_{r,IF}^S &= \rho_r^S + c(dt_r - dt^S) + T_r^S + e_{IF} \\ \varphi_{r,IF}^S &= \rho_r^S + c(dt_r - dt^S) + \lambda_{IF}A_{IF} + \epsilon_{IF} \end{aligned} \quad (2)$$

де p_{sr}^{IF} – безіоносферна комбінація $\frac{f_A^2 p_A - f_B^2 p_B}{f_A^2 - f_B^2}$ псевдовідстаней p_A та p_B , що спостерігається на двох різних частотах сигналу f_A і f_B ; φ_{sr}^{IF} – безіоносферна комбінація $\frac{f_A^2 \varphi_A - f_B^2 \varphi_B}{f_A^2 - f_B^2}$ відповідних несучих фаз φ_A і φ_B ; ρ_r^S – геометрична відстань $\|x^S - x_r\|$ від позиції супутника $x^S = (x^S, y^S, z^S)^T$ в епоху випромінювання сигналу t_E до положення приймача $x_r = (x_r, y_r, z_r)^T$ в епоху його приймання $t_A \approx t_E + \frac{\rho_r^S}{c}$; dt_r – зміщення годинника приймача від часу GNSS (з урахуванням зміщення коду приймача та затримок); dt_s – зміщення супутникового годинника відносно системного часу GNSS (ураховуючи зміщення та затримки супутникового коду); c – швидкість світла у вакуумі; T_r^S – затримка сигналу в нейтральних шарах атмосфери (переважно в тропосфері); A_{IF} – неціла невизначеність безіоносферної фазової комбінації, власне, безіоносферна комбінація із цілими невизначеностями φ_A і φ_B ; та нецілими початковими фазовими затримками; λ_{IF} – безіоносферна комбінація довжин фазових хвиль λ_A і λ_B А і В сигналів (наприклад, 10,7 см для GPS L1 і L2); ϵ_{IF}, e_{IF} – відповідні компоненти вимірювального шуму, зокрема багатоприменеві комбінації іоносферної псевдосмуги і несучої фази.

Оскільки параметри глобальної орбіти/годинника GNSS фіксовані, координати супутника (x^s, y^s, z^s) і годинник супутника dt^s вважають відомими.

Референц-станції в PPP діють як станції моніторингу, які визначають високоточні ефемериди та часові поправки в режимі, близькому до реального часу. Ці ефемериди, набагато точніші за прогнозовані ефемериди, що передаються супутниками, транслюють кінцевим користувачам різними каналами. Такий підхід має кілька переваг: потребує лише невеликої кількості референцих станцій, розташованих по всьому світу, а передані поправки універсальні й застосовні до будь-якого приймача. Крім того, використання супутників дає змогу передавати поправки безпосередньо, без необхідності стільникового зв'язку, що особливо корисно в регіонах з обмеженою комунікаційною інфраструктурою. PPP ідеально підходить для застосувань, що потребують точності в сантиметровому діапазоні, таких як геодезичне знімання і відстеження рухомих об'єктів.

Однак PPP має певні обмеження. Оскільки метод ґрунтується на опрацюванні даних з одного приймача, а розв'язання неоднозначності потребує часу, збіжність PPP може тривати від 20 до 40 хв для досягнення горизонтальної точності менше ніж 10 см. Цей час – істотний недолік для багатьох реальних застосувань, які потребують миттєвого доступу до високоточних даних.

Ефемериди для PPP можна отримати за допомогою або завантаження з глобальної мережі (зазвичай із затримкою для постобробки), або трансляції із супутників зв'язку. Однак для глобальних застосувань у реальному часі тривалий час були доступні лише комерційні сервіси. Наприклад, винятком є QZSS CLAS, яка надає локальні поправки над Азією. Безкоштовні сервіси існують, але зазвичай вони призначені для постоброблення або роботи із низькою затримкою, що обмежує їх використання в оперативних завданнях. У табл. 1 наведено порівняння Galileo HAS з іншими сервісами доповнення PPP.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз послуг із доповнення PPP

Параметри	Galileo HAS	QZSS CLAS	BeiDou PPP-B2b
Назва	High Accuracy Service	Centimeter-Level Accuracy Service	Сервіс точного точкового позиціонування – B2b
Операційна системи	Galileo, GPS	Супутникова система Quasi-Zenith (Японія)	Навігаційна супутникова система BeiDou (Китай)
Заявлена точність	По горизонталі: <20 см, по вертикалі: <40 см	Сантиметрова (1–5 см в ідеальних умовах)	Сантиметрова (1–5 см в ідеальних умовах)
Формат поправок	Compact-SSR	Compact-SSR	SSR
Діапазон сигналу	E6B	L6	B2b
Покриття	Глобальне	Регіональне	Регіональне
Тип позиціонування	RT-PPP	RT-PPP/RTK	RT-PPP
Шифрування сигналу	Відкритий сигнал, потребує сумісності із приймачем	Зашифрований для RTK поправок; відкритий сигнал для PPP	Відкритий сигнал, потребує сумісності із приймачем
Дата запуску	2022	2018	2019
Вимоги до приймача	Сумісність із Galileo; Можливість приймання сигналу на частоті E6	Сумісність з QZSS	Сумісність із BeiDou

Ще однією проблемою комерційних послуг PPP є їхня залежність від постачальників. Кожен постачальник використовує власний формат для виправлень, що створює труднощі із сумісністю, оскільки приймачі різних виробників зазвичай підтримують лише один або два конкретні формати. Це істотно обмежує гнучкість у виборі сервісу та узалежнює користувачів від конкретного постачальника. Розвиток відкритих стандартів для коригування PPP, а також поява безкоштовних глобальних сервісів у режимі реального часу істотно розширюють використання цієї технології та підвищують її доступність.

Galileo HAS: поточний стан та огляд досліджень

Європейська комісія оголосила про запуск початкової операційної фази HAS 24 січня 2023 р. Цей сервіс надає поправки, що транслюються по всьому світу за допомогою сигналу E6 і протоколу Ntrip 2s через інтернет, забезпечуючи в реальному часі зміщення орбіти, часу, коду і фази для чотирьох частот Galileo (E1, E5a, E5b, E6) і трьох частот GPS (L1, L2C і L5). Сьогодні всі перераховані вище поправки (крім фазових зсувів) вже можна отримати за допомогою приймача, здатного приймати сигнал E6B [Galileo HAS ICD, 2022]. <https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-HAS-Quarterly-Performance-Report-Q1-2023.pdf>

Запуск послуги HAS розділено на три етапи: Етап 0 (тестування та експерименти з HAS); етап 1 (початковий сервіс HAS) та етап 2 (повноцінний сервіс) [Galileo HAS ICD, 2022]. Під час фази тестування [Hauschild et al., 2022] було оцінено ефективність HAS. Результати показують, що значення SISRE для GPS і Galileo становили 12–16 см і 7–9 см відповідно. Використовуючи дані за травень 2021 р. [Fernandez-Hernandez et al., 2022], повідомили про значення SISRE 16 см і 9,5 см для GPS і Galileo. На основі аналізу точності ефемерид HAS [Naciri et al., 2023] протестували ефективність позиціонування PPP-HAS влітку 2022 р. Результати показали, що стандартне відхилення горизонтального і вертикального позиціонування менше ніж 20 см, що відповідає очікуваним критеріям продуктивності сервісу.

У листопаді 2024 р. HAS залишається на ранній стадії розвитку. На цьому етапі HAS пропонує глобальне покриття, що робить її першою системою, яка надає послуги високо-точного позиціонування по всьому світу. На цьому етапі офіційні документи Galileo вказують, що позиціонування HAS на глобальних станціях здійснюється із горизонтальною точністю менше ніж 20 см (95 %), вертикальною менше за 40 см (95 %) і часом збіжності менше ніж 300 с.

З моменту запуску першої фази Galileo HAS опубліковано велику кількість робіт, які стосуються оцінювання продукту, дослідження точності позиціонування і часу збіжності за різних умов використання HAS. Автори роботи [Nadas et al., 2024] підтверджують, що Galileo HAS забезпечує точність коригування орбіти і часу в реальному часі, порівнянну із потоками корекції з інтернету, що робить її перспективною альтернативою для геонаукових застосувань на основі GNSS, навіть незважаючи на те, що продуктивність дещо знижується за межами зони обслуговування. Наприклад, у роботі [Pintor et al., 2023] автори отримали дані корекції HAS на борту буєукладального судна з липня 2023 р. до серпня 2023 р., досягнувши точності по горизонталі 0,22 м після усунення морських збурень. У роботі [Cucchi et al., 2024] поправки HAS використали для опрацювання PPP на відкритій місцевості та в умовах щільної забудови, відповідно, довівши, що точність позиціонування можна підвищити, скориставшись поправками HAS. У роботі [Yi et al., 2024] запропоновано алгоритм позиціонування мобільного телефону на основі комбінації HAS-поправки та ефемерних PPP і доведено, що цей алгоритм може істотно зменшити помилки позиціонування у разі використання у міській навігації. Автори роботи [Timote et al., 2024] продемонстрували, що вимоги Galileo HAS досягаються в системі іоносферної корекції в реальному часі на основі PPP, забезпечуючи точність позиціонування з похибками по горизонталі й вертикалі 10–30 см і 20–50 см відповідно.

У табл. 2 наведено огляд результатів досліджень точності позиціонування PPP за допомогою Galileo HAS.

Результати досліджень точності позиціонування та часу збіжності HAS

Дослідження	Стратегія позиціонування	Точність по горизонталі	Точність по вертикалі	Час збіжності
Naciri et al., 2023	RT-PPP у кінематичному режимі. Окремо досліджено результати з використанням лише GPS, Galileo та обох	GPS: >40 см GAL: 15,6 см GPS+GAL: 13,1 см	GPS: >40 см GAL: 22,4 см GPS+GAL: 17,6 см	GPS: >40 хв GAL: 10 хв GPS+GAL: 7,5 хв
Hadas et al., 2024	RT-PPP в кінематичному режимі на рухомому судні	GPS+GAL: 29 см	GPS+GAL: 42 см	Не проаналізовано
Cucchi et al., 2024	RT-PPP у статичному режимі в щільній забудові	GPS+GAL: 19 см	GPS+GAL: 17 см	43 хв
Savchuk et al., 2024	RT-PPP у кінематичному режимі на відкритому просторі	GPS+GAL: 17 см	GPS+GAL: 39 см	18 хв
Фернандес-Ернандес та ін., 2022	RTPPP у статичному режимі	GPS+GAL: 8 см	GPS+GAL: 8 см	Не проаналізовано

З наведених вище даних випливає, що абсолютна точність визначення координат з використанням поправок Galileo HAS відповідає заявленій у [Galileo HAS ICD, 2022]. Однак час збіжності залишається недостатнім для застосування PPP у реальному часі. Це пов'язано передусім з відсутністю поправок на фазовий зсув та атмосферні ефекти на цьому етапі HAS.

Розроблено кілька програмних продуктів для інтеграції HAS для вимірювань у реальному часі. Наприклад, пакет декодування корекції HAS з відкритим вихідним кодом на C/C++, HASPPP розроблено в [Zhang et al., 2024]. HASPPP можна

легко вбудувати в поширене програмне забезпечення на основі C/C++, таке як RTKLIB. Подібне програмне забезпечення запропонували автори [Horst et al., 2022]. У праці [Borio et al., 2023] розроблено програмний пакет Python для зчитування даних HAS із необроблених файлів спостережень різних приймачів і перетворення їх у зручніший і читабельніший формат для подальшого аналізу або порівняння із іншими продуктами. На рис. 1 відображено отримання координат у реальному часі за допомогою методу PPP із поправками HAS, використаними в роботах [Horst et al., 2023; Savchuk et al., 2024].

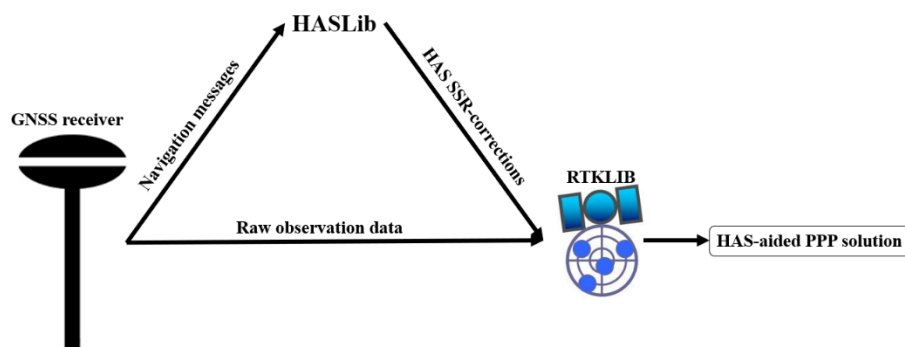


Рис. 1. Схема робочого процесу з RTKLib та HASLib для отримання рішення для PPP за допомогою HAS

Хоча такий підхід зручний, оскільки не вимагає від користувача редагування наявного програмного забезпечення або створення нового, він має певні недоліки. Один із цих недоліків – RTKLib не підтримує SSR-виправлення зсуву коду, що призводить до недовикористання ресурсів, наданих HAS. Також незрозуміло, наскільки коректно в RTKLib інтерпретуються поправки HAS і як їх інтерполюють у період відсутності. Ще одним негативним фактором такого підходу є те, що наявність додаткового програмного забезпечення у вигляді HASLib для декодування та форматування поправок може спричинити затримки в їх передаванні та застосуванні, що може істотно вплинути на час збіжності.

Обговорення. Проблеми, пов'язані з HAS

Високоточний сервіс Galileo HAS має на меті забезпечити точне позиціонування з дециметровою точністю, використовуючи поправки, що передаються через сигнал Galileo та інтернет. Хоча це вагомий прогрес у технології GNSS, її поточна реалізація пов'язана з низкою проблем.

Найважливішою проблемою нині є відсутність атмосферних поправок та поправок на фазовий зсув. Galileo HAS поки що на першій стадії впровадження (рис. 2), тому не має атмосферних поправок (іоносферних та тропосферних) та поправок на фазовий зсув.

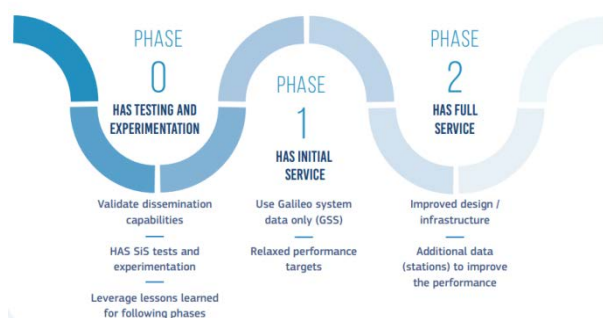


Рис. 2. Етапи впровадження сервісу Galileo HAS [Galileo HAS Info Note, 2020]

Цей недолік обмежує його корисність для забезпечення повномасштабного точного позиціонування PPP. Користувачі повинні покладатися на зовнішні моделі атмосферних поправок, такі як глобальні іоносферні карти,

готові моделі іоносфери і тропосфери (наприклад, модель тропосферної затримки Саастамоїнена), або оцінювати вплив атмосферних ефектів під час спостереження. Поправки на фазовий зсув критично важливі для усунення невизначеності, що необхідно для отримання високоточних рішень. Без них користувачі стикаються із довшим часом збіжності або не можуть досягти обіцяної точності [Savchuk et al., 2024]. Упровадження другої черги HAS вирішить ці проблеми, але, згідно із [Galileo HAS Info Note, 2020], запуск заплановано після 2024 р.

Іншим недоліком є складна структура поправок. Galileo HAS кодує поправки за вертикальною схемою Ріда – Соломона і надає їх як поправки до представлення простору станів (SSR) [Galileo HAS ICD]. Кодування Ріда – Соломона забезпечує оптимальну архівацію даних для швидкого передавання, але його реалізація ускладнює його використання для розробників і користувачів, особливо під час декодування та верифікації [Fernandez-Hernandez et al., 2022].

SSR (State-Space Representation – представлення стану простору) – порівняно нова концепція надання даних про поправки в кінематичних системах точного позиціонування в реальному часі (PPP – RTK). Замість надання комбінованих поправок у спостережуваному просторі, як в OSR, підхід SSR використовує декомпоновані поправки для усунення окремих джерел помилок GNSS [Schmitz, 2012]. До них належать поправки положення супутника (у трьох вимірах) і поправки годинника супутника, а також зсуви коду. Підтримуються різні типи повідомлень для окремих або комбінованих орбітальних і годинникових поправок. Крім того, доступні окремі високошвидкісні повідомлення про коригування годинника для забезпечення точного визначення місцезнаходження супутників з атомним годинником, що швидко змінюється. Концепція SSR також передбачає надання інформації про VTEC для одночастотних користувачів. Поправки SSR є загальними, що робить їх великою мірою незалежними від місцезнаходження користувача і забезпечує основу для глобальних застосувань PPP [Teunissen & Montenbruck, p. 1216].

Поправки SSR ще не мають широкої підтримки в популярному програмному забез-

печенні для опрацювання GNSS і не повністю інтегровані в стандартні робочі процеси через відсутність загальноприйнятого стандарту. Значимо, що поправки HAS надаються у пропрієтарному форматі, схожому на Compact-SSR. Звідси випливає, що безпосередньо застосувати поправки формату Compact SSR в такому програмному забезпеченні, як RTKLib [Takasu, 2013], неможливо, оскільки воно підтримує лише повноцінний формат RTCM SSR.

Вирішивши ці питання, Galileo HAS зможе краще позиціонувати себе як конкуренто-спроможне, доступне рішення на світовому ринку високоточних GNSS-рішень.

Використання HAS у геодезії

Високоточний сервіс Galileo HAS пропонує великий потенціал для геодезії, топографічного знімання та картографування, хоча і зі значними обмеженнями через його поточну дециметрову точність. Ці галузі потребують різного ступеня точності, й хоча HAS ще не є достатнім для застосувань, де необхідна сантиметрова точність, він забезпечує основу для виконання певних завдань і відкриває можливості для ширшого впровадження.

Для геодезії потенціал HAS полягає насамперед у некритичних операціях. Виконання таких завдань, як загальне картографування землекористування, попередні обстеження ділянок або планування інфраструктури, може бути покращене завдяки доступності та економічній ефективності коригувань HAS. Хоча високоточне визначення кадастрових меж або встановлення осей будівель залишається недосяжним, HAS може зменшити залежність від дорогого обладнання або послуг на основі підписки для виконання завдань з меншою точністю. Доступ до неї через сигнали E6 та інтернет забезпечує широку доступність, що робить її особливо привабливою для ринків, які формуються, або регіонів, що розвиваються, із обмеженими геодезичними ресурсами.

У картографії HAS є перспективним інструментом для створення й оновлення карт, які не потребують субметрової точності. Такі програми, як моніторинг навколишнього середовища, міське планування і топографічне

картографування загального призначення, можуть використовувати його поправки для підвищення точності позиціонування порівняно зі стандартними GNSS. Можливість досягнення дециметрової точності в режимі реального часу особливо корисна для динамічних картографічних застосувань, таких як мобільні картографічні системи або безпілотні літальні апарати (БПЛА), використовувані для знімання великих територій.

Важливий сектор застосування HAS – цивільна авіація та судноплавство. Очікується, що авіаційна галузь продовжить впроваджувати високоточні навігаційні послуги для подальшого підвищення безпеки та ефективності своїх служб управління повітряним рухом [Savchuk et al., 2024]. Вищезазначене стосується широкого спектра морських застосувань, таких як навігація, картографування морського дна, підводна розвідка, пошуково-рятувальні операції, морське буріння та прокладання трубопроводів. Сервіс HAS стане незамінним інструментом для досягнення високої точності в цих галузях.

Незважаючи на ці перспективи, дециметрова точність HAS ставить її в невідне становище для високоточних застосувань, які залишаються залежними від сервісів, що пропонують сантиметрові поправки, таких як RTK або PPP з корекцією фазового зсуву. Для геодезистів і фахівців з геодезії HAS поки що може слугувати додатковою системою, а не основним рішенням. Однак із розвитком сервісу та інтеграцією додаткових поправок, таких як атмосферні та фазові поправки, його актуальність для цих дисциплін зростатиме, потенційно долаючи розрив між дециметровими та високоточними потребами. Для картографічних застосувань, де поріг точності часто гнучкіший, HAS вже є вагомим перевагою, особливо в обмежених ресурсах або великомасштабних проектах.

Висновки

Високоточний сервіс Galileo HAS – важливий крок у розвитку GNSS, оскільки пропонує користувачам у всьому світі у вільному доступі дані дециметрового рівня точності. Його впровадження відкриває нові можливості для широкого спектра застосувань, від геопросто-

рового картографування та моніторингу навколишнього середовища до точного землеробства та автономної навігації. Передаючи поправки безпосередньо через сигнал ЕБВ та інтернет, HAS зменшує залежність від наземної інфраструктури та комерційних служб коригування, демократизуючи доступ до підвищеної точності позиціонування.

Незважаючи на поточні обмеження, такі як відсутність поправок на атмосферні й фазові зсуви і залежність від поправок SSR, які ще не мають широкої підтримки, HAS забезпечує міцну основу для подальшого технологічного розвитку та інтеграції. Її потенціал для покращення доступу до високоточного позиціонування, особливо у віддалених або недостатньо обслуговуваних регіонах, підкреслює її цінність для глобальних ініціатив у сфері сталого розвитку, управління ресурсами і транспорту.

Майбутні досягнення, зокрема із додаванням складних поправок і покращенням інтеграції програмного забезпечення, ймовірно, подолають розрив між HAS і наявними високоточними GNSS-рішеннями. У міру розвитку ця послуга може трансформувати робочі процеси в таких професійних сферах, як геодезія, топографія і картографія, сприяючи інноваціям і розширюючи сферу застосування GNSS.

Список літератури

- Borio, D., Susi, M., & Gioia, C. (2023). GHASP: A Galileo HAS parser. *GPS Solutions*, 27(4), 197. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01529-y>
- Cucchi, L., Dany, S., Gioia, C., Motella, B., & Paonni, M. (2024). Galileo High Accuracy Service: Tests in Different Operational Conditions. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 71(4). <https://doi.org/10.33012/navi.665>
- Elsobeiey, M., & Al-Harbi, S. (2016). Performance of real-time Precise Point Positioning using IGS real-time service. *GPS solutions*, 20, 565–571. <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0467-z>
- Fernandez-Hernandez, I., Chamorro-Moreno, A., Cancela-Diaz, S., Calle-Calle, J. D., Zoccarato, P., Blonski, D., ... & Mozo, A. (2022). Galileo high accuracy service: initial definition and performance. *GPS solutions*, 26(3), 65. <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01247-x>
- Galileo HAS Info Note. gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_HAS_Info_Note.pdf
- Galileo High Accuracy Service Signal-In-Space Interface Control Document (HAS SIS ICD). Retrieved from: gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_HAS_SIS_ICD_v1.0.pdf
- Gao, M., Meng, Z., Zhu, H., Xu, A., Cao, Z., & Tan, C. (2023). Research on the Real-Time Ambiguity Resolution Algorithm of GPS/Galileo/BDS Based on CNES Real-Time Products. *Remote Sensing*, 15(21), 5159. <https://doi.org/10.3390/rs15215159>
- Hadas, T., Kazmierski, K., Kudłacik, I., Marut, G., & Madraszek, S. (2024). Galileo High Accuracy Service in real-time PNT, geoscience and monitoring applications. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2024.3354293>
- Hauschild, A., Montenbruck, O., Steigenberger, P., Martini, I., & Fernandez-Hernandez, I. (2022). Orbit determination of Sentinel-6A using the Galileo high accuracy service test signal. *GPS solutions*, 26(4), 120. <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01312-5>
- Horst, O., Kirkko-Jaakkola, M., Malkamäki, T., Kaasalainen, S., Fernández-Hernández, I., Moreno, A. C., & Díaz, S. C. (2022, September). HASlib: an open-source decoder for the Galileo high accuracy service. In *Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022)* (pp. 2625–2633). <https://doi.org/10.33012/2022.18508>
- Liu, T., Jiang, W., Laurichesse, D., Chen, H., Liu, X., & Wang, J. (2020). Assessing GPS/Galileo real-time precise point positioning with ambiguity resolution based on phase biases from CNES. *Advances in Space Research*, 66(4), 810–825. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.054>
- Manandhar, D., Honda, K., & Murai, S. (1999, June). Accuracy assessment and improvement for level survey using real time kinematic (RTK) GPS. In *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No. 99CH36293)* (Vol. 2, pp. 882–884). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.774473>
- Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., & Carvajal-Ramírez, F. (2023). Accuracy assessment of RTK/PPK UAV-photogrammetry projects using differential corrections from multiple GNSS fixed base stations. *Geocarto International*, 38(1), 2197507. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2197507>
- Naciri, N., Yi, D., Bisnath, S., de Blas, F. J., & Capua, R. (2023). Assessment of Galileo High Accuracy Service (HAS) test signals and preliminary positioning performance. *GPS solutions*, 27(2), 73. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01410-y>
- Pintor, P., Lopez-Martinez, M., Gonzalez, E., Safar, J., & Boyle, R. (2023). Testing Galileo High-Accuracy Service (HAS) in Marine Operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12), 2375. <https://doi.org/10.3390/jmse11122375>

- Rizos, C. (2009). Network RTK research and implementation—a geodetic perspective. *Positioning*, 1(02). <https://doi.org/10.5081/jgps.1.2.144>
- Savchuk, S., Grzegorzewski, M., Gołda, P., & Kerker, V. POSITIONING USING THE PRECISION GALILEO HAS SERVICE. <https://doi.org/10.36163/aon-2024-0007>
- Schmitz, M. (2012, March). RTCM state space representation of messages, status and plans. In *PPP-RTK & Open Standards Symposium* (Vol. 12).
- Takahashi, S., Zhang, H., & Kubo, N. Performance Evaluation of CLAS and PPP Using Correction Data via QZSS. “The 16th IAIN World Congress 2018 in Makuhari Messe, Chiba, Japan”, 2018.
- Takasu, T. (2013). Rtklib. Retrieved from: <http://www.rtklib.com>.
- Teunissen, P. J., & Montenbruck, O. (Eds.). (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems* (Vol. 10, pp. 978–3). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>
- Timote, C. C., Juan, J. M., Sanz, J., Rovira-Garcia, A., González-Casado, G., Orús-Pérez, R., ... & Blonski, D. (2024). Ionospheric corrections tailored to Galileo HAS: validation with single-epoch navigation. *GPS Solutions*, 28(2), 93. <https://doi.org/10.1007/s10291-024-01630-w>
- Yang, Y., Ding, Q., Gao, W., Li, J., Xu, Y., & Sun, B. (2022). Principle and performance of BDSBAS and PPP-B2b of BDS-3. *Satellite navigation*, 3(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00066-2>
- Yi, D., Naciri, N., & Bisnath, S. (2024). Precise positioning using smartphone GNSS/IMU integration with the combination of Galileo high accuracy service (HAS) corrections and broadcast ephemerides. *GPS Solutions*, 28(3), 140. <https://doi.org/10.1007/s10291-024-01689-5>
- Zhang, R., Tu, R., & Lu, X. (2024). HASPPP: An open-source Galileo HAS embeddable RTKLIB decoding package. *GPS Solutions*, 28(4), 169. <https://doi.org/10.1007/s10291-024-01706-7>

Vladyslav KERKER

Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: vladyslav.v.kerker@lpnu.ua, <https://orcid.org/0009-0007-3756-8125>

GALILEO HAS OVERVIEW, COMPARISON WITH ANALOGUES AND ASSESSMENT OF PERSPECTIVE

In 2022, Galileo, the European GNSS, launched the first phase of its HAS (High Accuracy Service) initiative. By providing free and global corrections for clock delays and satellite orbits, Galileo HAS provides decimeter positioning accuracy the need for additional ground networks. This research aims to evaluate the advancements in precise positioning technologies, with a focus on the Galileo High Accuracy Service (HAS). The study highlights the importance of precision positioning methods, including Standard Point Positioning (SPP), Real-Time Kinematic (RTK), and Precise Point Positioning (PPP), and assesses the performance of Galileo HAS in comparison with other global augmentation services like QZSS CLAS and BeiDou PPP-B2b. The methodology involves a comprehensive analysis of technical capabilities, accuracy, and operational limitations of HAS through literature review and comparative analysis of positioning performance data. The results confirm that Galileo HAS achieves decimeter-level accuracy globally, with horizontal accuracy below 20 cm and vertical accuracy below 40 cm, but suffers from prolonged convergence times due to the absence of atmospheric and phase bias corrections in its initial phase. The scientific novelty lies in identifying HAS's potential as the first global free PPP correction service via Signal-in-Space (SIS), distinguishing its practical advantages in semi-enclosed environments compared to traditional PPP augmentation systems. The study also emphasizes the unique integration challenges posed by HAS corrections due to proprietary encoding formats. Practically, the findings underscore HAS's utility in geodesy, mapping, and real-time applications, particularly in resource-constrained settings. However, the research highlights critical areas for improvement, such as implementing atmospheric corrections and phase bias adjustments, to meet real-time precise positioning demands. The conclusions note the undoubted usefulness of such a service as Galileo HAS, review its shortcomings and methods of solving them.

Key words: GNSS, Galileo High Accuracy Service, PPP, RT-PPP, precise positioning, navigation

Надійшла 03.10.2024 р.