

УДК 625.7

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-20

Федосов С. А., Захарчук Д. А., Глушпенко А.

Луцький національний технічний університет

ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ GPS

У даній роботі проведено критичний аналіз останніх досліджень і публікацій, пов'язаних з системою глобального позиціонування (GPS), розглянуто і описано основні принципи функціонування GPS. Детальний аналіз найвідоміших (найцитованіших) публікацій авторитетних світових науковців демонструє широкий спектр прикладного застосування GPS, а також способи можливого використання для розв'язку проблем в недалекому майбутньому. Приладобудування фізичного світу через великі мережі бездротових сенсорних вузлів, особливо для програм, таких як моніторинг навколишнього середовища, вимагає, щоб ці вузли були дуже малими, легкими, неприв'язаними і непомітними. Проблема локалізації, де даний вузол фізично розташований у мережі, є складною, але надзвичайно важливою для багатьох із цих програм. Високі витрати на збір даних для багатьох застосувань у науках про Землю посилюються віддаленістю та недоступністю багатьох польових об'єктів, що робить недоцільними дешевші, більш портативні геодезичні платформи (наприклад, наземне лазерне сканування або GPS).

Ключові слова: система глобального позиціонування, публікації, застосування, приладобудування.

Постановка проблеми. Протягом усієї історії існування людей, визначення поточного місцезнаходження, було справою не з простих. Особливо, якщо знаходишся в незнайомому місті, чи навіть країні. Сьогодні з цим набагато легше, адже появились системи глобального супутникового позиціонування – від англ. *Global Position System* (GPS).

Глобальна система позиціонування GPS є невід'ємною частиною нашого сучасного світу, використовується в найрізноманітніших галузях, починаючи від навігації транспортних засобів і закінчуючи геодезією та науковими дослідженнями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прибережна зона південно-східного Техасу завдяки своєму унікальному географічному розташуванню та геологічним характеристикам стикається з низкою геологічних проблем, таких як осідання ґрунту, затоплення та берегова ерозія. У дослідженні [1] намагаються оцінити останні випадки осідання ґрунту і пов'язану з ними швидкість, зосереджуючись на розумінні їх наслідків для затоплення. Використовуючи Persistence Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR), у цьому дослідженні використовуються дані супутника Sentinel-1 SAR із спостереженнями на низхідній орбіті з січня 2020 року по березень 2023 року. Результати показують, що як північно-західні, так і східні регіони Х'юстона були досліджені з розрахованою швидкістю до 2 см/рік. Ця тенденція узгоджується з даними, отриманими за допомогою GPS і вимірювань рівня ґрунтових вод. Пропагуючи інтеграцію вимірювань InSAR, GPS і підземних вод, дослідження [1] прагнуло зробити цінний внесок у зм'якшення небезпеки, пов'язаної з просіданням і повеннями, у зоні південно-східного Техасу.

Дослідження [2] підкреслило цінність дрібномасштабних досліджень пересування таких видів, як морські черепахи, які рідко спливають на поверхню, завдяки здатності GPS-міток зберігати і повторно завантажувати дані. Автори використали GPS-мітки, здатні заповнювати дрібномасштабні локації, щоб задокументувати моделі пересування черепах-головарів у прибережній бухті на північному заході Флориди, США. Пов'язані з іридієм GPS-мітки були розміщені на черепахах у нерітичному місці пошуку їжі на північному заході Флориди. Після фільтрації телеметричних даних розташування точок було перетворено на лінії руху, а потім об'єднано з вихідним файлом точок, щоб визначити маршрути та оцінити швидкість руху. Майбутнє використання цих тегів може стати потужним інструментом для кращого розуміння дрібномасштабних моделей пересування морських черепах.

Супутникове навігаційне визначення місця розташування стало незамінним компонентом повсякденного життя, де точне визначення та швидка конвергенція мають вирішальне значення для надання своєчасної та точної інформації про місцезнаходження. Однак через демпфування цілочисельної неоднозначності та системних залишкових помилок швидка конвергенція впровадження точного позиціонування точки (*Precise Point Positioning* (PPP)) є серйозною проблемою. Щоб вирішити цю проблему, у документі [3] пропонується новий метод точного

позиціонування точки з нульовою базовою фазою несучої фази (CZS-PPP) і його модель синтезу без іоносфери. Застосовуючи запропонований підхід CZS-PPP в окремих сценаріях, що включають BDS-3, GPS і налаштування подвійної системи, систематично перевірялась ефективність методу. Представлена методика CZS-PPP демонструє усунення цілочисельних неоднозначностей і ефективне придушення системних залишків у порівнянні зі звичайним методом. Запропонований підхід продемонстрував чудову продуктивність у різних системах, пропонуючи багатообіцяючий новий шлях для досягнення швидкої конвергенції PPP у BDS/GNSS.

Аналіз даних для оптимізації спортивних результатів і запобігання травмам становить величезний інтерес для спортивних команд і наукової спільноти. Однак спортивні дані часто рідкісні, і їх важко отримати через законодавчі обмеження, небажання ділитися та брак кадрових ресурсів, призначених для процесу обробки даних. Ці обмеження ускладнюють розробку автоматизованих систем для аналізу, які потребують великих наборів даних для навчання. Тому в [4] представлено SoccerMon, найбільший доступний сьогодні набір даних про футболістів, який містить як суб'єктивні, так і об'єктивні показники. SoccerMon може не тільки відіграти важливу роль у розробці кращих систем аналізу та прогнозування для футболу, але й надихнути подібні дії зі збору даних в інших сферах, які можуть отримати користь від суб'єктивних звітів спортсменів, інформації про місцезнаходження GPS та/або даних часових рядів загалом.

Мета роботи полягає в описі основних принципів функціонування GPS, аналізі ефективності і проблем використання, а також перспектив його подальшого ефективного і практичного застосування.

Викладення основного матеріалу. Розпочнемо з основних принципів функціонування системи глобального супутникового позиціонування. GPS складається з трьох основних сегментів. Супутниковий сегмент включає 24 супутники, які обертаються навколо Землі на орбіті. Точніше, вони розташовані саме на високій орбіті, приблизно на висоті 20 000 км. І це дозволяє їм охоплювати велику площу поверхні Землі. Управлінський сегмент включає наземні станції, котрі відомі як контрольно-коригувальні станції. Вони відповідають за керування та коригування супутників, а також за поширення точного часу. І останній, сегмент користувача. Він включає всі GPS-приймачі, які можуть отримувати сигнали від супутників, щоб визначати своє місцезнаходження.

Принцип роботи GPS базується на математичній концепції триангуляції. Приймачі, наприклад навігатори, отримують сигнали мінімум від трьох супутників, а потім використовують дані часових затримок для розрахунків, результати яких дають визначити відстані до кожного супутника. Супутники постійно надсилають нові сигнали, котрі містять інформацію про час відправки, тобто завжди оновлюють ці дані. Приймачі GPS фіксують час, коли отримують сигнал, і розраховують часову затримку між моментом відправки та моментом отримання сигналу. Кожна сигнальна хвиля, яка приходить від супутника, може бути розглянута як сферична хвиля, що поширюється у всіх напрямках від супутника. Таким чином, коли приймач отримує сигнал від трьох супутників, він може визначити своє місцезнаходження там, де сфери перетинаються. Так як сигнали потребують певного часу для того, щоб подолати відстань між супутником і приймачем, будь-які затримки у відправленні або прийманні сигналу можуть призвести до неточності у визначенні місцезнаходження. Для цього GPS-приймачі також можуть корегувати ці затримки, для досягнення більшої точності.

Застосовувати GPS можна в дуже широкому переліку сфер. Від простого особистого користування, застосування в наукових дослідженнях, і до над важливого військового. Далше буде саме про застосування навігаційних систем у різних сферах життя людей.

Станом на червень 2024 року у наукометричній базі Scopus відображено понад 160 тис. документів за період з 1944 до 2024 рр., пов'язаних з системою глобального позиціонування (рис. 1). Різке зростання публікацій з 90-их років XX ст., швидше за все, пов'язане з стрімким розвитком інформаційних технологій і широким застосуванням цифрових систем і у глобальному позиціонуванні.

У документі [5] представлено новий набір даних, отриманий з універсалу VW, для використання в дослідженнях мобільної робототехніки та автономного водіння. Автори записали сценарії дорожнього руху з частотою 10–100 Гц за допомогою різноманітних датчиків, таких як кольорові та сірі стереокамери з високою роздільною здатністю, лазерний сканер Velodyne 3D і високоточна інерціальна навігаційна система GPS/IMU. Різноманітні сценарії відображають реальні дорожні ситуації та варіюються від автомагістралей у сільській місцевості до міських сцен із багатьма статичними та динамічними об'єктами. Усі дані були відкалібровані,

синхронізовані та з мітками часу. Набір даних також містить мітки об'єктів у формі тривимірних треклетів, і надано онлайн-тести для стерео, оптичного потоку, виявлення об'єктів та інших завдань. Загалом, у документі [5] описано платформу запису, формат даних і утиліти, які надають автори.

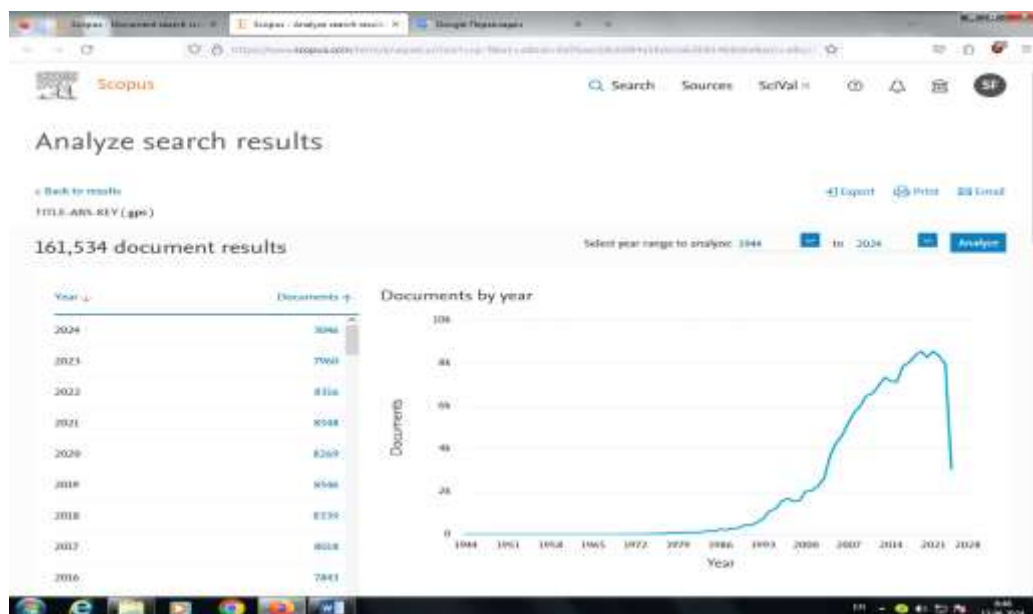


Рисунок 1 – Кількість публікацій за роками, пов'язаних з системою глобального позиціонування

Приладобудування фізичного світу через великі мережі бездротових сенсорних вузлів, особливо для програм, таких як моніторинг навколишнього середовища, вимагає, щоб ці вузли були дуже малими, легкими, неприв'язаними та непомітними. Проблема визначення того, де даний вузол фізично розташований у мережі, є складною, але надзвичайно важливою для багатьох із цих програм. Такі практичні міркування, як невеликий розмір, обмеження факторів, вартості та потужності вузлів, перешкоджають покладанню на GPS усіх вузлів у цих мережах. У статті [6] розглянуто методи локалізації та оцінки ефективності дуже простого методу вимірювання зв'язку для локалізації у зовнішньому середовищі, який використовує властиві цим пристроям можливості радіочастотного зв'язку. Фіксована кількість опорних точок у мережі з областями покриття, що перекриваються, передають періодичні сигнали маяків. Вузли використовують просту метрику зв'язності, яка більш стійка до примх навколишнього середовища, щоб зробити висновок про близькість до даної підмножини цих контрольних точок. Вузли локалізуються до центроїда своїх найближчих опорних точок. Тоді точність локалізації залежить від відстані між двома сусідніми контрольними точками та діапазону передачі цих контрольних точок. Початкові експериментальні результати показують, що точність для 90 % точок даних знаходиться в межах однієї третини відстані поділу.

Мережі з десятків до сотень постійно працюючих точних приймачів GPS виникають у просторових масштабах від 100 до 103 км. Щоб обчислювальне навантаження, пов'язане з аналізом таких даних, було економічно доцільним, один із підходів полягає в тому, щоб спочатку визначити точні позиції супутника GPS і поправки годинника з глобально розподіленої мережі приймачів GPS [7]. Потім дані з локальної мережі аналізуються шляхом оцінки параметрів, специфічних для приймача, за допомогою даних, специфічних для приймача; параметри супутника утримуються фіксованими на своїх значеннях, визначених у глобальному рішенні. Це «точне позиціонування точки» дозволяє щодня аналізувати дані від сотень до тисяч сайтів за допомогою комп'ютерів із продуктивністю 40 Мфлопс, одержуючи результати, порівняні за якістю з одночасним аналізом усіх даних. Системи відліку для глобальних і мережевих рішень можуть бути вільними від спотворень, накладених помилковими довірчими обмеженнями на будь-які сайти.

Топографічна зйомка високої роздільної здатності традиційно пов'язана з високими матеріально-технічними витратами, тому збір даних часто передається спеціалізованим стороннім організаціям. Високі витрати на збір даних для багатьох застосувань у науках про Землю посилюються віддаленістю та недоступністю багатьох польових об'єктів, що робить

недоцільними дешевші, більш портативні геодезичні платформи (наприклад, наземне лазерне сканування або GPS). У документі [8] описано революційну, недорогу, зручну для користувача фотограмметричну техніку для отримання наборів даних високої роздільної здатності в діапазоні масштабів, яка називається «Structure-from-Motion» (SfM). Традиційні фотограмметричні методи електронного копіювання вимагають відомості про тривимірне розташування та положення камер або тривимірне розташування наземних контрольних точок, щоб полегшити триангуляцію та реконструкцію сцени. Навпаки, метод SfM вирішує позицію камери та геометрію сцени одночасно та автоматично, використовуючи дуже надлишкове коригування групи на основі відповідних функцій у кількох зміщених зображеннях, що перекриваються. Техніка SfM є значним прогресом у галузі фотограмметрії для застосування в геонауках. Результати та досвід показують, що SfM є недорогим, ефективним і гнучким підходом до зйомки складної топографії.

Авторами [9] розглянуто різні останні підходи до створення цифрових карт ґрунту на основі шарів даних географічних інформаційних систем (ГІС), відзначено деякі спільні риси і запропоновано загальну структуру для майбутнього. Обговорюються різні методи, які використовувалися або могли бути використані для встановлення кількісних зв'язків між властивостями або класами ґрунтів та їхнім «середовищем». Атрибути рельєфу, отримані з цифрових моделей рельєфу, та спектральні смуги відбиття із супутникових зображень використовувалися найчастіше, але є великий потенціал для нових шарів даних. Загальна структура, яку автори [9] називають методом *scorpan-SSPFe* (функція просторового прогнозування ґрунту з просторово автокорельованими помилками), є особливо актуальною для тих місць, де інформація про ґрунтові ресурси обмежена. Він базується на семи прогнозних факторах скорпану, узагальненні п'яти факторів Дженні. Нарешті обговорюються можливі застосування, проблеми та вдосконалення.

Однак, перше що спадає на думку при згадці про GPS, це навігатор в машині. Знаходити оптимальний шлях пункту призначення, отримувати інструкції з руху, уникати трафіку та інших перешкод на дорозі. Всі ці можливості нам дає система супутникового позиціонування. Також GPS використовують і в сфері логістики. Зокрема, для відстеження руху вантажних чи пасажирських засобів. Моніторингу поставок, планування маршрутів, та загальної оптимізації роботи транспортної системи.

Ще одна сфера вміщає в собі повітряну та морську навігацію. Точне визначення місцезнаходження суден і літаків, також є важливою та відповідальною задачею. Адже від цього залежить не тільки ефективність тих чи інших маршрутів цих транспортів, а і їхня безпека. І в геодезії з картографією GPS відіграє значну роль. Він банально спрощує дослідження в цих науках. Адже може визначити географічні точки, і робити це доволі точно. У свою чергу, це вже дозволяє картографам створювати точні карти, котрі потім будуть використовуватись в багатьох галузях.

Наступна сфера, не надто очевидна, однак, чи щодня користуємося результатами її дослідницької роботи. Метеорологія, саме системи супутникового позиціонування використовують у вимірюванні змін рельєфу, і моніторингу клімату та природних явищ. Крім цього, GPS використовують і для моніторингу землетрусів, та інших геологічних явищ, допомагаючи вченим розуміти природу цих явищ та передбачати їхні наслідки для людей і природи.

GPS також є важливою складовою системи навігації для військових цілей. Військові використовують GPS для розвідки, визначення місцезнаходження ворогів, навігації та координації військових дій.

Завершую це список найбільш побутове, загальноповиване використання. Наприклад, в смартфонах, спортивних годинниках, та інших електронних засобах, для трекінгу активності, місцезнаходження, геотування фотографій і в багатьох інших цілях.

Однією з можливостей навігаційних технологій, є розвиток інтерактивних систем навігації, що відкриють нові форми туризму. Це, наприклад, може включати в створення персоналізованих маршрутів, які враховують індивідуальні вподобання користувача та його історію маршрутів. Чому б нею не скористатися? Також можливі створення аудіо-гідів і віртуальних екскурсій, які би використовували GPS для автоматичного надання інформації про місцевість, прямо під час подорожі.

Висновки. Глобальна система позиціонування є одним із ключових інструментів у нашому житті, вона змінила спосіб, яким ми взаємодіємо зі світом. Від навігації транспортних засобів до наукових досліджень, GPS має безліч застосувань і продовжує розвиватися. І з кожним роком дає нам все більш точні та ефективні інструменти, які роблять наше життя все зручнішим.

Інформаційні джерела

1. Nur A., Nam B., Choi S., Kim Y. Monitoring of ground subsidence using PS-InSAR technique in the Southeast Texas (SETX) Region. *International Journal of Geo-Engineering*. 2024. Vol. 15, № 1. 13.
2. Lamont M., Slone D., Reid J., Butler S., Alday J. Deep vs shallow: GPS tags reveal a dichotomy in movement patterns of loggerhead turtles foraging in a coastal bay. *Movement Ecology*. 2024. Vol. 12, № 1. 40.
3. Cai C., Lv K., Cai Y., Wu M., Cheng L. A static precise single-point positioning method based on carrier phase zero-baseline self-differencing. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, № 1. 12590.
4. Midoglu C., Kjæreng Winther A., Boeker M., Riegler M.A., Halvorsen P. A large-scale multivariate soccer athlete health, performance, and position monitoring dataset. *Scientific Data*. 2024. Vol. 11, № 1. 553.
5. Geiger A., Lenz P., Stiller C., Urtasun R. Vision meets robotics: The KITTI dataset. *International Journal of Robotics Research*. 2013. Vol. 32, № 11. P. 1231-1237.
6. Bulusu N., Heidemann J., Estrin D. GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications*. 2000. Vol. 7, № 5. P. 28-34.
7. Zumberge J., Heflin M., Jefferson D., Watkins M., Webb F. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1997. Vol. 102, № B3. P. 5005-5017.
8. Westoby M., Brasington J., Glasser N., Hambrey M., Reynolds J. Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*. 2012. № 179. P. 300-314.
9. McBratney A., Mendonça Santos M., Minasny B. On digital soil mapping. *Geoderma*. 2003. Vol. 117, № 1-2. P. 3-52.

Fedosov S., Zakharchuk D., Glushpenko A.
Lutsk National Technical University

PRINCIPLES OF OPERATION AND APPLICATION OF GPS

This paper critically analyzes recent research and publications related to the Global Positioning System (GPS), and discusses and describes the basic principles of GPS operation. A detailed analysis of the most famous (most cited) publications by reputable world scientists demonstrates a wide range of applications of GPS, as well as possible ways to use it to solve problems in the near future. Instrumentation of the physical and technical world through huge networks of wireless sensor nodes, in particular for problems such as environmental monitoring, requires that these nodes be very small, light, untethered, and unobtrusive. The problem of localization, where a given node is physically located in the network, is complex but extremely important for many of these applications. The high cost of data collection for many applications in Earth sciences is exacerbated by the remoteness and inaccessibility of many field sites, which makes cheaper, more portable geodetic platforms (e.g., terrestrial laser scanning or GPS) impractical.

Keywords: *Global Position System, publications, applications, instrument making.*