

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕКОНОМІКИ,
УПРАВЛІННЯ, ПРАВА ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти магістр

на тему: **«Система високоточної навігації безпечних платформ
екосистеми інтернет речей»**

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
Інформаційні управляючі системи та
технології спеціальності
126 Інформаційні системи та
технології ступеня вищої освіти
магістр
групи 126ІСТмд_22
Бурлака В. В.
Керівник: Слюсарь І. І.
Рецензент: Муравльов В. В.

Полтава – 2023 року

ВСТУП

Актуальність теми кваліфікаційної роботи підтверджується розвитком технологій високоточної навігації як важливого елемента концепції Інтернет речей (IoT) в контексті аграрного сектора, геодезії, картографії; будівництва, безекіпажних платформ і робототехнічних систем. При цьому зростаючий попит на вищу точність та надійність засобів геолокації призводить до застосування схемотехнічних рішень, що спираються на використання багаточастотних навігаційних модулів, які здатні одночасно обробляти інформацію від кількох глобальних навігаційних систем (GNSS). Стандартні GNSS-сигнали для загальних потреб забезпечують точність розташування в рамках кількох метрів, що може бути неприйнятним для певних застосувань. За таких обставин використовують додаткові технології та методи, що дозволяють здійснити високоточну навігацію. Однак питання розробки системи високоточної навігації безекіпажних платформ на основі багаточастотних модулів навігації потребують додаткових досліджень. Все це свідчить про актуальність теми роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Робота відповідає дослідженням в рамках науково-дослідної роботи «Управління стратегією інноваційного розвитку підприємств в контексті підвищення їх конкурентоспроможності на аграрному ринку, сталого розвитку та забезпечення продовольчої безпеки держави» (2021 р.), що фінансувалась господарськими договорами із замовниками, Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні (розпорядження Кабінету Міністрів України № 1787-р від 29.12.2021), тематиці досліджень навчально-дослідної лабораторії інтелектуальних систем, комп'ютерних мереж та інтернет речей кафедри інформаційних систем та технологій Полтавського державного аграрного університету.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення точності навігації безекіпажних платформ екосистеми інтернет речей.

Завданнями кваліфікаційної роботи є:

- аналіз технологій та методів, що дозволяють здійснити високоточну навігацію при використанні стандартних сигналів GNSS для загальних потреб;
- аналіз особливостей реалізації DGNSS на основі виміру псевдовідстаней;
- розроблення системи високоточної навігації безекіпажних платформ екосистеми інтернет речей;
- формування методики контролю точності системи високоточної навігації безекіпажних платформ екосистеми інтернет речей;
- обґрунтування пропозицій щодо інтеграції безекіпажних платформ і екосистеми інтернет речей.

Об'єктом дослідження є процес функціонування системи навігації.

Предметом дослідження є залежність точності навігації від зовнішніх чинників.

Методами дослідження в рамках визначення інструментарію для створення системи високоточної навігації безекіпажних платформ екосистеми інтернет речей, і техніко-економічного обґрунтування прийнятих рішень використовувався аналітичний метод досліджень, а для розробки зазначеної системи – моделювання.

Інформаційна база кваліфікаційної роботи сформована з ресурсів, що містять інформацію про GNSS, DGNSS, RTK та компоненти, що їх реалізують, а також інструментарій для розробки та дослідження високоточної навігації.

Елементи наукової новизни роботи полягають в розробці системи високоточної навігації безекіпажних платформ та методики контролю її точності.

Практична значущість роботи полягає у формуванні пропозицій щодо інтеграції безекіпажних платформ і екосистеми інтернет речей, які можуть

бути використані для подальших досліджень за даною тематикою та при реалізації концепції інтернет речей.

Апробація результатів відбувалася в рамках V-ої Міжнародної студентської конференції «Теоретичне та практичне застосування результатів сучасної науки» (жовтень 2023 р., м. Рівне), III-ої Міжнародної студентської конференції «Міждисциплінарні наукові дослідження та перспективи їх розвитку» (листопад 2023 р., м. Дніпро).

За результатами досліджень здійснено 2 публікації тез доповідей.

Структура кваліфікаційної роботи логічно пов'язана з завданнями досліджень і містить вступ, три розділи основної частини, висновки, список використаних джерел, додатки. Загальний обсяг пояснювальної записки кваліфікаційної роботи складає 74 сторінки формату А4. Вона містить 33 рисунки.

РОЗДІЛ 1

ВИСОКОТОЧНА НАВІГАЦІЯ НА ОСНОВІ GNSS

1.1 Аналіз напрямів застосування високоточної навігації

За даними дослідницької компанії QYR [1], супутники є поширеним засобом надання послуг, орієнтованих на визначення місця розташування (LBS), тому світовий ринок чіпів GNSS має на шляху до зростання з 2,7 мільярда доларів США у 2019 р. до майже 3,8 мільярда доларів США до 2026 р. Розробляючи рішення на основі навігаційних систем (Global Navigation Satellite System, GNSS) [2], OEM-виробники пристроїв, постачальники послуг IoT [3-5] і системні розробники повинні ретельно розглянути, як їхній діапазон спектру та вибір сузір'я безпосередньо впливають на точність, послідовність та ін. Лише за останнє десятиліття вибір сузір'їв значно розширився, коли китайська BeiDou [6] та GALILEO [7] Європейського космічного агентства приєдналися до глобальних систем GPS США [8]. У 2018 р. також повністю запрацювали дві регіональні системи: японська супутникова система Quasi-Zenith (QZSS) [9] та індійська IRNSS/NavIC [10].

Кожне сузір'я має кілька сигналів, кожен з яких працює на своїй частоті. Ця конструкція максимізує точність, оскільки приймачі можуть використовувати дві частоти, щоб мінімізувати помилки, створювані іоносферою. Дві частоти також збільшують ймовірність того, що сигнали будуть доступні, коли вони будуть потрібні приймачу. Деякі системи використовують другу або третю частоту для надання даних корекції для подальшого підвищення точності. Для більшої точності приймач повинен приймати сигнали від якомога більшої кількості супутників.

Як відомо, високоточна навігація відіграє ключову роль в багатьох сучасних технологіях і допомагає в оптимізації робочих процесів у різних індустріях [3-5]. Під нею розуміють технологію, яка дозволяє отримувати

дані про місцезнаходження об'єкта з точністю до кількох сантиметрів або навіть міліметрів. Зазвичай, стандартні GNSS, такі як Global Positioning System (GPS), GLONASS, Galileo, і BeiDou, забезпечують точність визначення позиції в межах кількох метрів. В якості конкретних прикладів доцільності використання високоточної навігації можна вказати такі:

- визначення смуги, якою рухається автомобіль;
- навігація рою дронів;
- автоматичні системи управління посадкою літаків на аеродроми;
- різноманітні варіанти безпілотного керування рухом чимось (наприклад газонокосаркою або зернозбиральним комбайном) – цим займаються компанії Trimble (США) та FJ-Dynamics (КНР);
- уточнення габаритів кораблів, будівель, карт та ін.;
- реалізація одноосьового гіроскопу за допомогою двох GNSS приймачів – використовуючи 2 GNSS антени і обчислювати за допомогою станції корекції сигналів в реальному часі (Real-Time Kinematics, RTK) [11, 12] орієнтацію (3-ій ступінь свободи на площині);
- системи автоматичного навантаження (розвантаження) морських контейнеровозів;
- системи сповіщення про наявність небезпечних зон, наприклад, при будівництві для повідомлення робітників на землі про небезпечні зони, де над людьми можуть бути підвішені на кранах важкі деталі.

Таким чином, до найбільш поширених напрямів де застосування високоточної навігації може бути корисним слід віднести наступні.

1. Землеробство – автоматизація сільськогосподарської техніки, ведення полів, моніторинг урожаю.
2. Геодезія та картографія – створення точних карт і земельних вимірювань.
3. Будівництво – контроль та автоматизація машин і транспортних засобів на будівельних майданчиках.

4. Безпілотні транспортні засоби – точне керування безпілотниками для збору даних, нагляду та інших завдань.

5. Робототехніка – керування рухом роботів в промисловості та наукових дослідженнях.

В цілому, додаткові деталі та специфікації можуть залежати від конкретної системи або області застосування.

1.2 Методи підвищення точності використання GNSS

Стандартні сигнали GNSS для загального застосування забезпечують точність позиціонування в межах кількох метрів. Тому, для деяких застосувань це є непридатним. Наприклад, така низька точність може привести до дорожньо-транспортної пригоди (рис. 1.1) [13]. Як наслідок, спільно зі стандартною навігацією використовують додаткові методи.

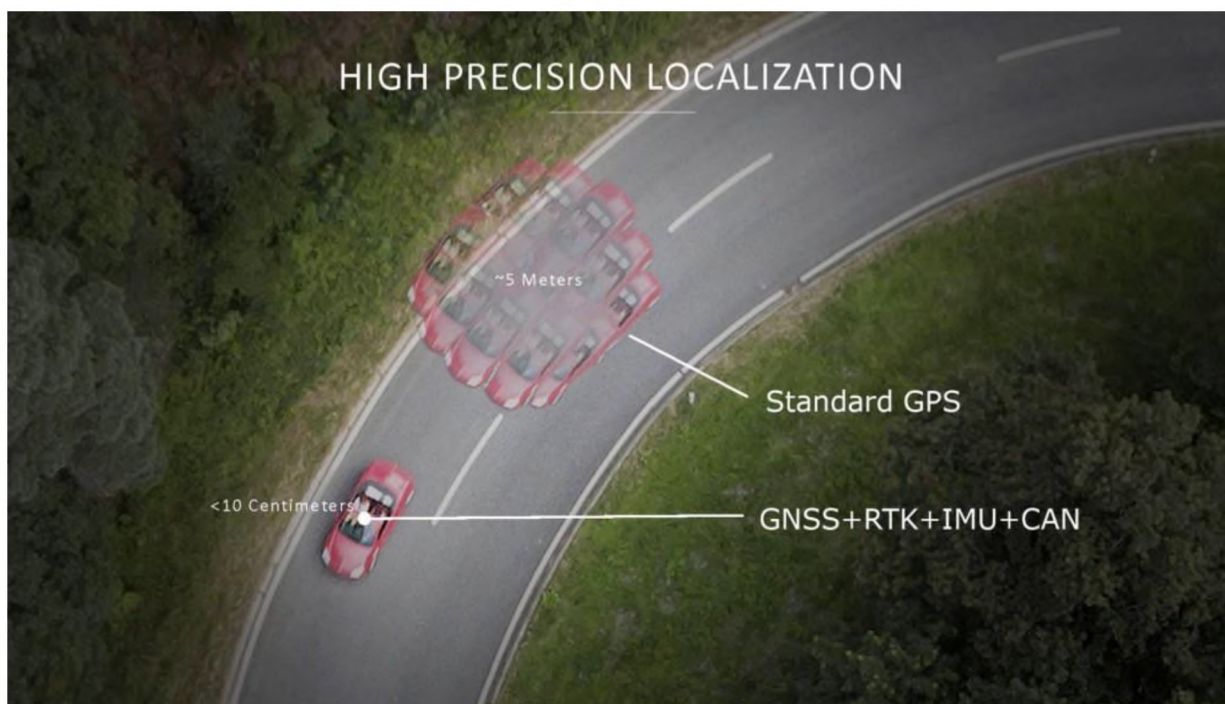


Рисунок 1.1 – Високоточна навігація на дорозі

1. Диференційна корекція – Differential GNSS (DGNSS) [14, 15]. Окремі моделі супутникових приймачів дозволяють проводити «диференціальний вимір» відстаней між двома точками з великою точністю (сантиметри). Для цього вимірюється положення приймача у двох точках з невеликим проміжком часу. При цьому (хоча кожен такий вимір має похибку, рівну 10-15 метрів без наземної системи коригування і 10-50 см з такою системою) вимірювана відстань має похибку набагато меншу, оскільки фактори, що заважають виміру (похибка орбіт супутників, неоднорідність атмосфери місці Землі та ін.) у цьому випадку взаємно віднімаються. Крім того, є кілька систем, які надсилають приймачу уточнюючу інформацію («диференціальну поправку до координат»), що дозволяє підвищити точність вимірювання координат приймача до десятків сантиметрів. Диференціальна поправка пересилається або з геостационарних супутників, або з наземних базових станцій. Така поправка може бути платною (розшифрування сигналу можливе лише одним визначеним приймачем після оплати «підписки на послугу») або безкоштовною. На даний час, відомі такі системи надання поправок: американська система WAAS (GPS), європейська система EGNOS (Galileo), японська система MSAS (QZSS). Вони засновані на кількох передавальних поправках від геостационарних супутників, що дозволяють отримати точність до 30 см.

2. RTK-поправки [16]. Вони суттєво підвищують точність позиціонування до 1-2 сантиметрів у реальному часі. Суть проста – по всій земній кулі розташовані так звані базові станції (Base Stations). Конкретна базова станція знає похибки у своїй зоні розташування та повідомляє їх приймачу, а останній, у свою чергу, враховує ці коригування у реальному часі та видає більш точне значення.

3. Комбінують дані з кількох GNSS або частотних діапазонів для підвищення точності та надійності.

4. Застосування протоколу Precise Point Positioning (PPP). Метод, який використовує різні коригувальні дані, включаючи прецизійні ефемериди супутників та корекції по годинниках, з глобальної мережі приймальних станцій для підвищення точності позиціонування без потреби в локальній базовій станції.

Однак, якщо йде мова про зони нестійкого прийому сигналів GNSS (рис. 1.2), то обов'язковим є використання модулю інерційних вимірювань (Inertial Measurement Unit, IMU). Це набір акселерометрів і гіроскопів, що забезпечують 3D-вимірювання.

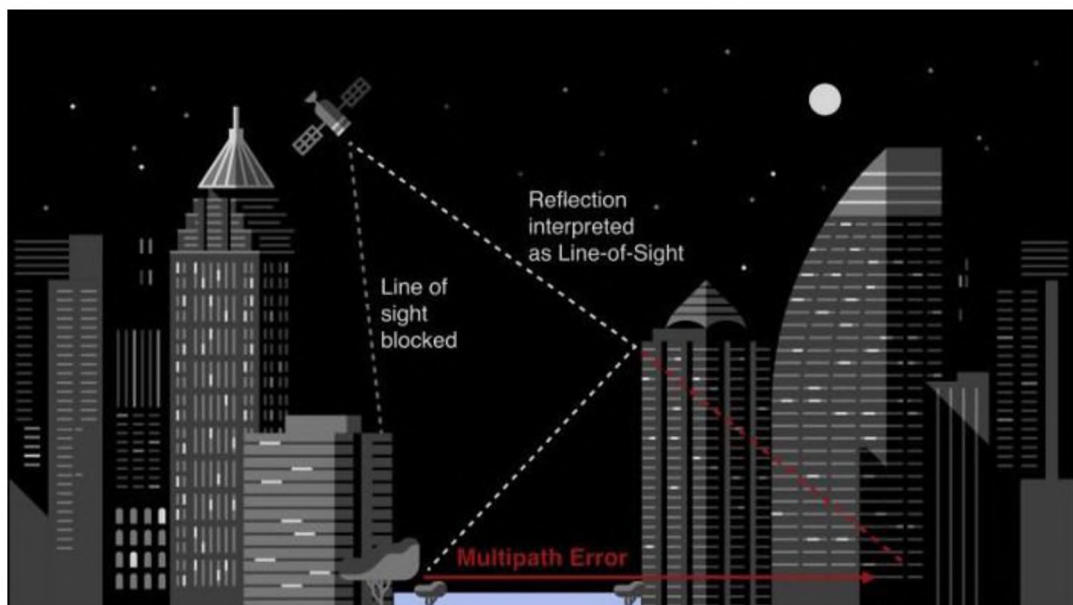


Рисунок 1.2 – Перевідбиття супутникового сигналу у місті

Сам по собі IMU не видає дані про місцезнаходження (позицію, висоту, швидкість), але видає корисну інформацію для обчислення розташування в місцях, де GNSS не «ловить».

До таких випадків слід віднести міські умови прийому (помилка може бути 50 метрів і більше): високі будівлі, дроти, мости, тунелі, паркінги та інші об'єкти.

В цілому, сутність використання GNSS полягає в наступному [17]. Візьмемо для прикладу звичайний приймач GPS у телефоні. У зоні видимості

з Землі потрібно є як мінімум чотири GPS-супутники. Кожен із цих GPS-супутників відправляє інформацію про свою позицію та поточний час на GPS-приймачі з фіксованим інтервалом. Відстань між GPS-приймачем та супутником обчислюється шляхом знаходження різниці між часом відправки сигналу з GPS-супутника та часом отримання сигналу GPS-приймачем.

Як тільки приймач (наприклад, ваш смартфон) отримує сигнал хоча б з трьох супутників, обчислюється ваше місцезнаходження (а точніше за ваш телефон) за допомогою трилатерації. GPS необхідно хоча б три супутники для обчислення 2D-позиції (довгота та широта) та чотири супутники для 3D-позиції (довгота, широта, висота).

1.3 Мережі RTK

Як відомо, мережа RTK станцій – це система, що складається з кількох фіксованих станцій GNSS, розташованих на відомих геодезично точних координатах [12]. Ця мережа забезпечує покриття певної географічної зони (рис. 1.3) і використовується для підвищення точності місцезнаходження мобільних приймачів GNSS, що використовують технологію RTK.

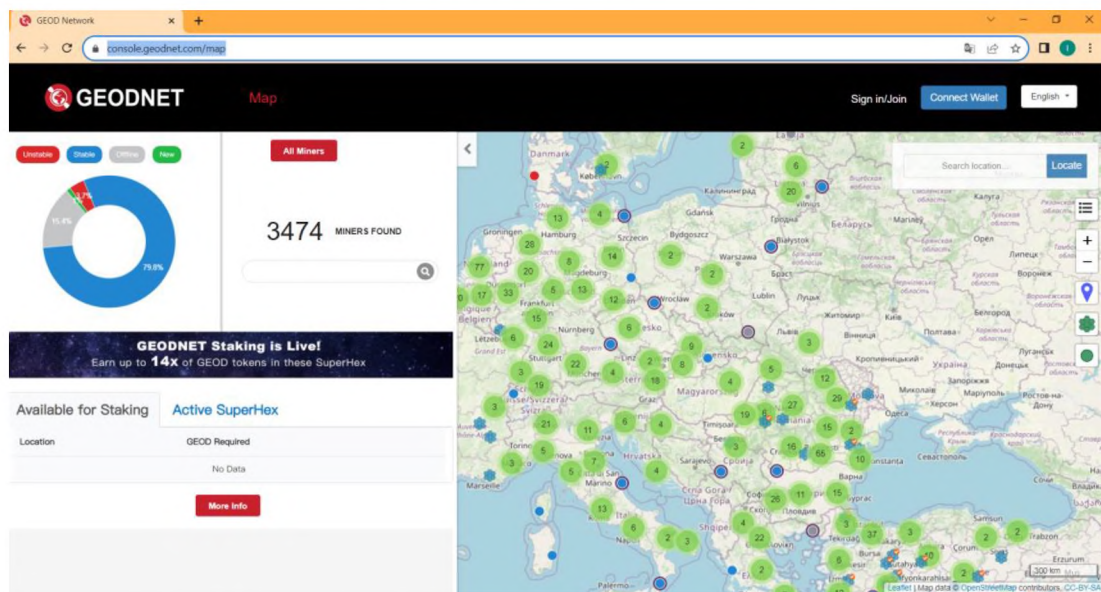


Рисунок 1.3 – Приклад мережі RTK – Geodnet [18]

Мережа RTK включає базові станції, сервер обробки даних і мобільні приймачі. Сутність її роботи полягає в наступному. Стаціонарні базові станції постійно одержують сигнали від GNSS-супутників і обчислюють поправки, що ґрунтуються на відомих своїх координатах. Вони об'єднують отриманий з супутника сигнал з локальними даними корекції, отриманими з базової станції, в ідеалі, що знаходиться не далі 10 км від їхнього розташування (рис. 1.4).

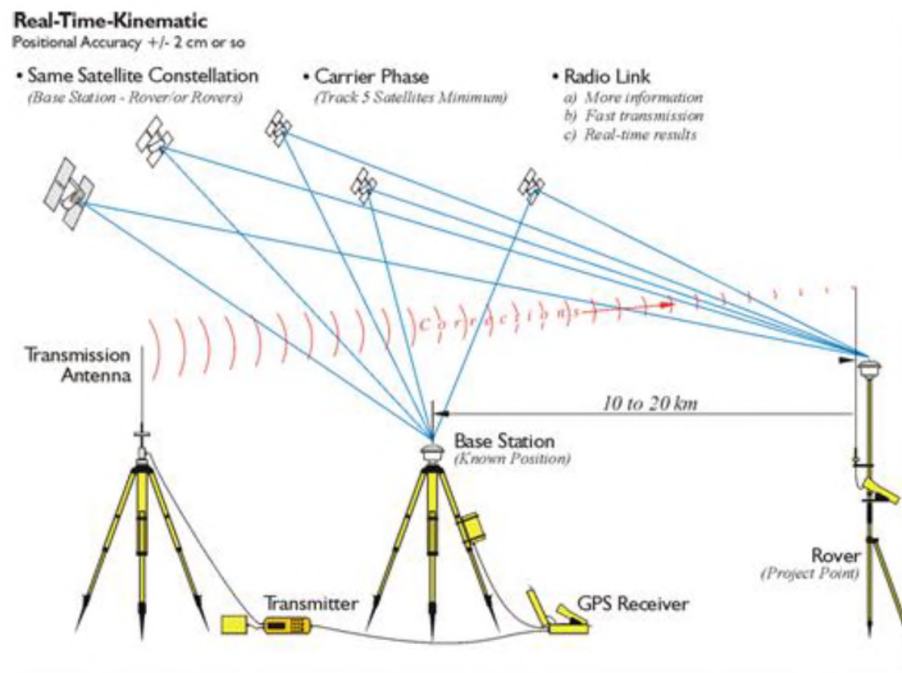


Рисунок 1.4 – RTK працює, додаючи локальні дані корекції, що отримані з базової станції

Ці дані можуть надходити через інтернет або по радіозв'язку LoRa [19], і дозволяти модулю видавати місцезнаходження з точністю до сантиметра, в ідеальних умовах. Деякі оператори надають публічний доступ до своїх станцій, проте можна придбати власне обладнання та підняти станцію для особистих потреб. Багато модулів вищого класу можуть працювати як базова станція для інших модулів, що працюють поблизу. Визначені поправки передаються через сервер обробки даних мобільним приймачам, які використовують ці поправки підвищення точності визначення

свої геолокації. Мобільні приймачі, які можуть знаходитися, наприклад, на безпілотних літальних апаратах, сільськогосподарській техніці або геодезичному обладнанні, використовують дані з мережі RTK-станцій, щоб уточнити свої координати.

Проведена оцінка номенклатури мереж RTK в Україні дозволяє виділити кілька наявних сервісів, що можуть використовуватись, наприклад, для сільського господарства.

1. Геодезична NRTK мережа від к. System.NET [20]. На даній мережі також базується сервіс AGRORTK від ПрАТ «Систем Солюшнс» [21].
2. Мережа mAgri.RTK від к. Kyivstar [22].
3. RTK Network HUB (рис. 1.5) [23], яка пропонує похвилинні пакети доступу до RTK, подинні пакети доступу до RAW та підписки RTK від одного дня до одного року.

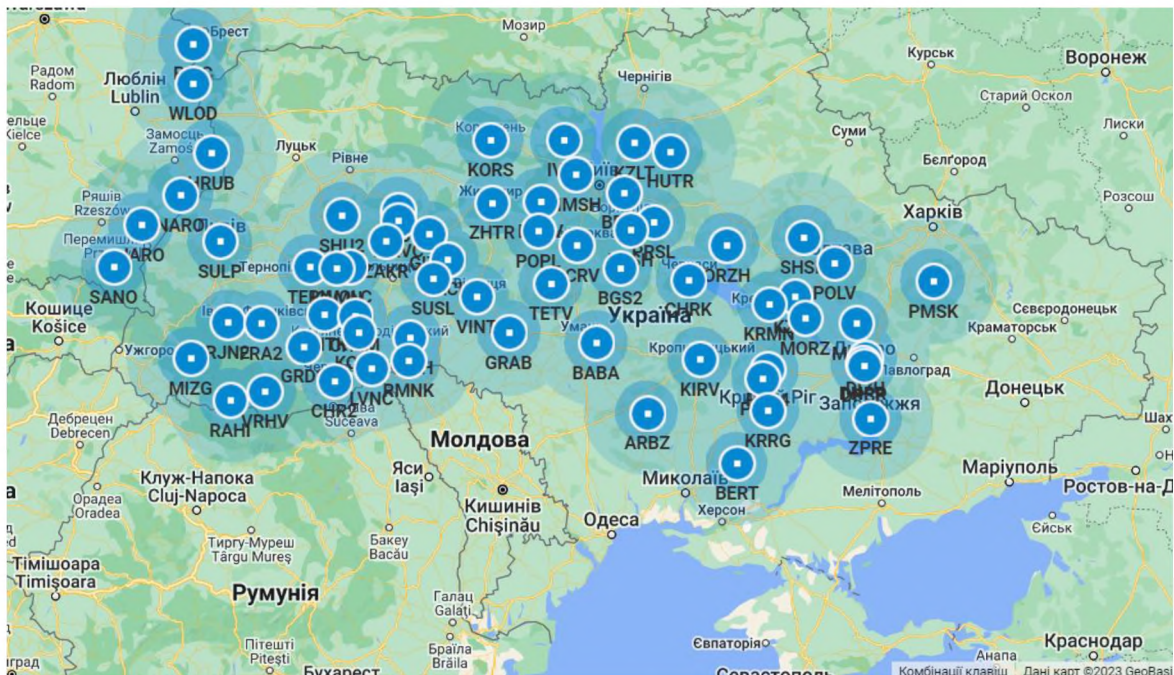


Рисунок 1.5 – Мережа RTK Network HUB

4. Мережа RTK від к. Open Agribusiness [24].
5. Мережа RTK від ресурсу Frenedt.ua, що використовує ПЗ Hexagon Geosystems Leica GNSS Spider [25].

На основі проведеного аналізу тарифних планів, зон покриття існуючих мереж RTK можливо зробити висновок, що в умовах сьогодення використання їх функціоналу не представляється можливим.

Варто мати на увазі, що для загального призначення не має можливості використовувати спеціалізований сигнал GNSS, наприклад, військового призначення, який дозволив би визначати геолокацію з високою точністю. Тому доцільно реалізувати високоточну навігацію використовуючи на основі власної розробки.

1.4 Особливості реалізації GNSS

Для високоточної навігації необхідно використовувати одну з існуючих GNSS, наприклад:

- GPS (США) – 32 супутники [8];
- Beidou (Китай), 43 супутники за цільовим призначенням [6];
- Galileo (Євросоюз), 26 супутників [7];
- NAVIC (Індія), 7 супутників [10];
- QZSS (Японія), 4 супутники [9].

Реалізацію GNSS доцільно розглянути на прикладі GPS. 32 супутника (рис. 1.6) забезпечують повну працездатність системи у будь-якій точці земної кулі.

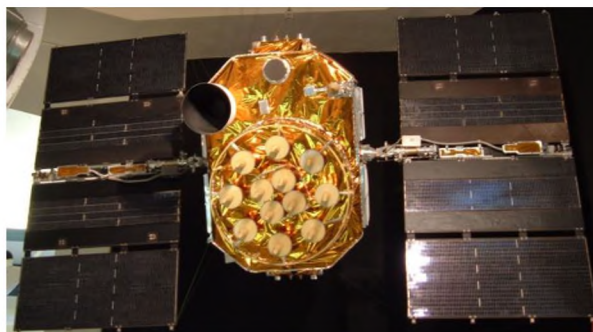


Рисунок 1.6 – Незапущений супутник (вид з боку антен)
у музеї авіації та космонавтики м. Сан-Дієго – 2005 р. [26]

Основний принцип використання системи – визначення місця розташування шляхом вимірювання моментів часу прийому синхронізованого сигналу від навігаційних супутників антеною споживача.

Для визначення 3-вимірних координат GPS-приймачу потрібно мати чотири рівняння: «відстань дорівнює добутку швидкості світла на різницю моментів прийому сигналу споживачем та моменту його синхронного випромінювання від супутників» [17]:

$$|r - a_j| = c \cdot (t_j - \tau), \quad (1.1)$$

де a_j – радіус-вектор j -го супутника;

t_j – момент часу прийому сигналу від j -го супутника по годинниках споживача;

τ – невідомий момент часу синхронного випромінювання сигналу всіма супутниками по годинниках споживача;

c – швидкість світла;

r – невідомий радіус-вектор споживача.

GPS складається з 3-ох основних сегментів: космічного, керуючого та користувальницького. Супутники GPS транслують сигнал із космосу, і всі приймачі GPS використовують цей сигнал для обчислення свого положення у просторі за 3-ма координатами в режимі реального часу. Спостереження за орбітальними апаратами здійснюється за допомогою головної контрольної станції та 10 станцій спостереження.

Супутники випромінюють відкриті для використання сигнали в діапазонах $L1=1575,42$ МГц і $L2=1227,60$ МГц (починаючи з Блоку IIR-M), а моделі IIF випромінюють також на частоті $L5=1176,45$ МГц (рис. 1.7) [1]. Ці частоти є відповідно 154-ою, 120-ою і 115-ою гармоніками фундаментальної частоти 10,23 МГц, що генерується бортовим атомним годинником супутника з добовою нестабільністю не гірше 10^{-13} . При цьому

частота атомного годинника зсунута до значення 10,229 999 995 43 МГц, щоб компенсувати релятивістський зсув, обумовлений рухом супутника щодо наземного спостерігача і різницею гравітаційних потенціалів супутника і спостерігача на поверхні Землі.

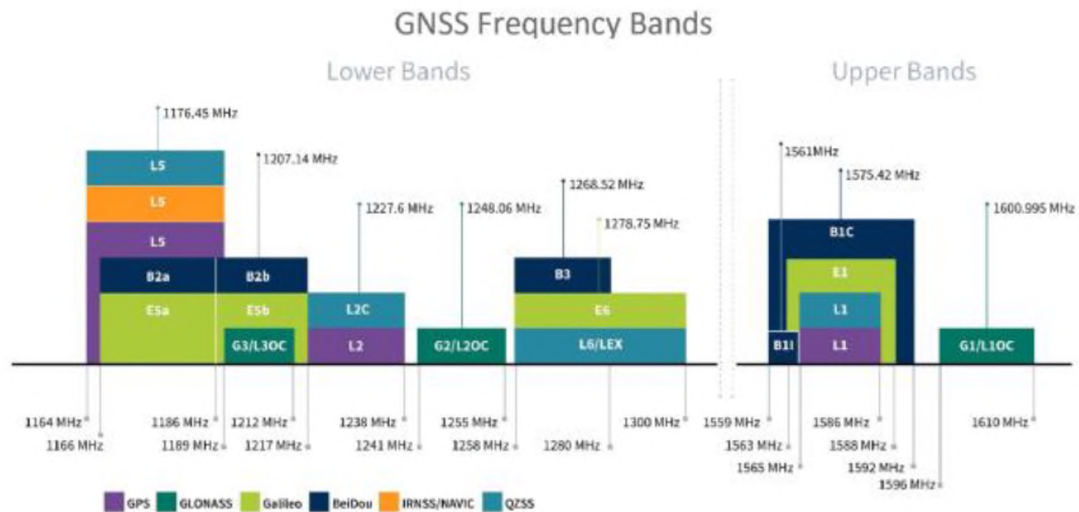


Рисунок 1.7 – Робочі діапазони частот GPS

Навігаційна інформація може бути прийнята антеною (зазвичай, в умовах прямої видимості супутників) та оброблена за допомогою GPS-приймача. Сигнал із кодом стандартної точності (C/A-код – модуляція BPSK (1)), що передається в діапазоні L1 (і сигнал L2C (модуляція BPSK) у діапазоні L2, починаючи з апаратів IIR-M), поширюється без обмежень на використання. Починаючи з експлуатації Блоку III введено сигнал L1C (модуляція BOC (1,1)) у діапазоні L1. Він має покращену можливість простежування шляху та більшою мірою сумісний із сигналами L1 європейської системи супутникового позиціонування Galileo (див. рис. 1.7). Для військових користувачів додатково доступні сигнали в діапазонах L1/L2, модульовані перешкодостійким криптостійким P(Y)-кодом (модуляція BPSK (10)). Починаючи з апаратів IIR-M введено в експлуатацію

новий М-код (використовується модуляція BOC (10, 5)). Використання М-коду дозволяє забезпечити функціонування системи у рамках концепції Navwar (навігаційна війна). М-код передається на частотах L1 і L2. Даний сигнал має підвищену стійкість до перешкод, і його достатньо для визначення точних координат (у випадку з Р-кодом було необхідне отримання і коду C/A). Ще однією особливістю М-коду є можливість його передачі для конкретної області діаметром кілька сотень кілометрів, де потужність сигналу буде вищою на 20 дБ. Звичайний сигнал М доступний у супутниках IIR-M, а вузькоспрямований доступний за допомогою GPS-III.

1.5 Варіанти використання сигналів GPS L1 та L2

Як відомо [1], BeiDou B1 знаходиться поблизу L1, з центром на 1561,098 МГц. Другий сигнал планується безпосередньо над L1 на частоті 1589,742 МГц. Останні супутники BeiDou також включають сигнал на частоті 1575,42 МГц, який практично ідентичний L1C GPS.

Нижня частота BeiDou B2, для його 2-частотної роботи становить 1207,14 МГц. Подібно до модернізованого сигналу GPS L2, більш вузький сигнал доступний відкрито, тоді як ширший і точніший сигнал доступний лише авторизованим користувачам. Подібно до GALILEO, BeiDou має третій сигнал, B3, розташований вище B2, на частоті 1268,52 МГц. Він доступний у відкритій версії та версії лише для авторизованих користувачів.

Супутники GALILEO передають сигнал E1 на тій же частоті 1575,42 МГц, що і L1 GPS. E1 розроблено для співіснування з цим та іншими сусідніми сигналами. Він також дуже схожий на L1C GPS.

Хоча GALILEO є суто цивільною системою, вона також має набір сигналів, який називається Public Regulated Service (PRS), виключно для авторизованих користувачів. Один з центром на E1, а інший на E6. Ці сигнали

мають ширшу смугу пропускання, ніж сигнали Open Service. Сигнал E5 GALILEO розділений на E5a та E5b, кожен з яких має ширину 20,46 МГц. E5a знаходиться на частоті 1176 МГц, яка розташована разом із L5 GPS, тоді як E5b знаходиться на частоті 1207 МГц. Їх можна використовувати окремо або разом. Як і L5 від GPS, E5 розроблено для забезпечення вищої точності та високої доступності. Сигнал E6 GALILEO зосереджений на частоті 1278,75 МГц. Розташований разом із сигналом QZSS L6 і подібний до нього за використанням, E6 передає дані корекції для високоточних послуг, як правило, для забезпечення PPP. E6 також забезпечує більш високу швидкість передачі даних, що робить його ідеальним для додатків, які потребують глобального високоточного позиціонування.

IRNSS/NavIC має два сигнали: один з GPS L5 на частоті 1176,75 МГц, а інший – на 2492,028 МГц. Цей останній сигнал (у S-діапазоні) наразі є унікальним серед систем позиціонування. Приймачі можуть використовувати сигнал L5 разом із сигналами GPS, GALILEO, BDS або GLONASS у діапазоні L1, щоб забезпечити переваги 2-астотної роботи. Обидва сигнали можна використовувати незалежно для забезпечення одночастотної позиції. Система NavIC також планує передавати дані корекції іоносфери для регіону покриття, забезпечуючи підвищену точність.

QZSS має чотири сигнали. Три майже ідентичні GPS на L1, L2 і L5, тоді як четвертий є новим сигналом на L6 (розташований разом з E6) на 1278,75 МГц. Подібно до GALILEO E6, сигнал L6 (також відомий як LEX) надає дані з більшою швидкістю, дозволяючи розповсюджувати нові типи даних. Зараз це використовується для надання безкоштовних відкритих даних коригування, що дозволяє безкоштовно використовувати PPP у регіоні, що раніше було доступно лише за підпискою на послуги L-діапазону.

У відповідь на попит про більшу точність і більш надійну продуктивність визначення місцезнаходження справжні багатодіапазонні приймачі стають все більш поширеними. Вони включають принаймні одну іншу частоту, яка «значно відрізняється» від набору діапазонів L1/B1/E1. У

минулому це часто означало сувору підтримку GPS L1, GPS L2P(Y) (без коду чи ні). Сучасні багатодіапазонні приймачі мають вищі очікування, і, зазвичай, поділяються на кілька груп.

Комерційна/промислова:

- GPS L1C/A, L1C, L2C;
- GLONASS L1, L2OF;
- BDS B1 (possibly also B2);
- GALILEO E1, E5b.

Споживча/комерційна:

- GPS L1C/A, L1C, L5;
- GLONASS L1;
- BDS B1;
- GALILEO E5a.

Споживча/комерційна (лише субконтинент Індія):

- GPS L1C/A, L1C;
- GLONASS L1;
- BDS B1;
- GALILEO E5a;
- NAVIC/IRNSS L1C, L5.

Високоточна/довідкова:

- GPS L1C/A, L1C, L2P(Y) (codeless), L2C;
- GLONASS L1, L2;
- BDS B1, B2, B3;
- GALILEO E1, E5, E6;
- QZSS L1C, L6;
- NAVIC/IRNSS L1C, L5.

Сигнал L1 є найстарішим сигналом GPS. Він складається з двох частин: грубого коду/коду збору даних (C/A) та точного коду (P-коду). Код P зарезервований для відомчого використання, а код C/A відкритий для

громадськості. Сигнал L1 використовує частоту 1575,42 МГц. Оскільки L1 є найстарішим і найбільш усталеним сигналом, навіть найдешевші пристрої GPS здатні його приймати. Однак, оскільки його частота відносно мала, він дуже ефективний при подоланні перешкод. Частота L2 була реалізована після частоти L1. Сигнал також має військовий кодекс і кодекс цивільного використання. L2 використовує частоту 1227,60 МГц, що швидше ніж L1. Це дозволяє сигналу краще проходити через такі перешкоди, як хмарність, дерева та будівлі (докладніше про перешкоди тут). На даний час, L2 не можна використовувати самостійно: його необхідно використовувати разом із частотами L1. L5 – 3-ій сигнал GPS, що працює на частоті 1176 МГц. Він найбільш досконалий сигнал GNSS на даний момент. Він використовується для безпечного транспорту та інших вимогливих додатків, таких як авіація. Зрештою він стане ще одним сигналом, доступним для цивільних користувачів (джерело). Оскільки він настільки новий, він поки не є корисним для геодезистів, але про це слід пам'ятати при проектуванні GPS-приймачів майбутнього. Існує два основних способи використання сигналів GPS L1 та L2. По-перше, сигнал L1 можна використовувати окремо. Це дає точність близько сантиметра при використанні RTK, але все одно вважається повільним: для досягнення такого рівня точності потрібно близько 10 хвилин. Сигнали GPS L1 і L2 також можна використовувати разом у методі PPP. Оскільки сигнал L2 має більшу частоту, йому легше долати перешкоди. Це означає, що помилки, викликані частинками повітря, можна обчислити та усунути шляхом порівняння двох сигналів. Це дає рівень точності, який можна порівняти з використанням методу RTK з L1, за винятком того, що потрібен лише один приймач. Крім того, спільне використання L1 і L2 дозволяє приймачу працювати в жорсткіших умовах, наприклад, поряд з будинками або під покривом дерев. Оскільки сигнал L2 передається швидше та відправляється частіше, цей метод дозволяє швидше отримати початковий сигнал, ніж при використанні тільки L1.

Висновки до розділу 1

Інтенсивний розвиток технологій високоточної навігації стає важливим елементом в численних сучасних рішеннях, сприяючи вдосконаленню робочих процесів у різноманітних галузях промисловості. Вона представляє собою техніку, яка надає можливість визначення положення об'єкта з прецизійністю до декількох сантиметрів або, у певних випадках, міліметрів. Серед галузей, де високоточна навігація може виявитися надзвичайно корисною, можна виділити такі як: аграрний сектор; геодезія та картографія; будівельна індустрія; безпілотні засоби пересування; робототехнічні системи.

Стандартні GNSS сигнали, які застосовуються для загальних потреб, забезпечують точність розташування в рамках декількох метрів, що може бути неприйнятно для певних застосувань. Таким чином, поряд із звичайною навігацією існують також додаткові технології та методи, що включають DGNS, RTK-корекцію, інтеграцію даних з різних GNSS або частотних діапазонів, а також використання протоколу PPP.

У випадках, коли є проблеми зі стабільним прийомом GNSS сигналів (наприклад, у міських умовах), застосовується IMU-модуль, який надає корисні дані для визначення позиції у зонах, де GNSS може бути недоступним, стає необхідним. Мережа RTK надає покриття визначеної географічної області і використовується з метою підвищення точності визначення положення мобільних GNSS приймачів, які застосовують RTK-технологію. Оцінка існуючих RTK-мереж в Україні дозволяє ідентифікувати декілька доступних сервісів, які можуть бути використані, наприклад, в аграрній сфері. На основі аналізу тарифних планів, зон покриття існуючих RTK-мереж можна дійти висновку, що використання їхніх можливостей в сучасних умовах може бути обмеженим.

Однак, для загального використання немає опції використання спеціалізованого GNSS-сигналу, такого як, наприклад, військовий, що

дозволяє встановлювати геопозицію з великою точністю. Тому слід реалізувати високоточну навігацію на основі власної розробки.

Для точної навігації слід використовувати одну з наявних GNSS: GPS, Beidou, Galileo, NAVIC, QZSS. Попит на вищу точність та зростаючу надійність продуктивності геолокації спричиняє те, що сучасні багаточастотні приймачі стають все ширше застосовуваними. Вони інтегрують принаймні одну додаткову частоту, яка «істотно відмінна» від спектрів L1/B1/E1. Сучасні багаточастотні приймачі поділяються на декілька категорій: комерційні / промислові; користувацькі / комерційні; користувацькі / комерційні (лише Індія); високоточні/довідкові.

Існують два ключові методи застосування GPS сигналів L1 та L2. По-перше, сигнал L1 може бути використаний в ізоляції. Більше того, кон'юнктурне використання L1 та L2 дозволяє приймачу функціонувати в більш вимогливих умовах. GPS сигнали L1 і L2 також можна використовувати спільно за методом PPP.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВИСОКОТОЧНОЇ НАВІГАЦІЇ БЕЗЕКІПАЖНИХ ПЛАТФОРМ ЕКОСИСТЕМИ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ

2.1 Диференціальний режим GNSS

Диференціальний режим GNSS (DGNSS) – це вид системи GNSS Augmentation, який ґрунтується на розширенні первинної інформації з використанням мережі наземних опорних станцій, які дозволяють відстежувати мовлення диференціальної інформації для підвищення точності даних (рис. 2.1) [27-29].

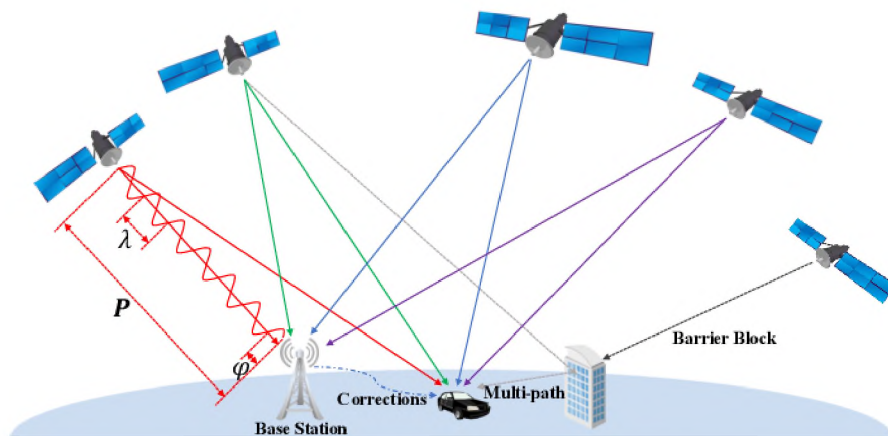


Рисунок 2.1 – Використання DGNSS

Диференціальний режим GNSS досягається за рахунок розміщення опорної станції з приймачем GNSS у точці з відомими координатами, визначення поправок до сигналів дальності супутників та передачі поправок користувачам. Це виключає більшу частину помилок усунення, загальних всім приймачів і значно покращує позиційну точність. Точність після цього обмежується шумами приймача користувача, міжканальними зміщеннями та невизначеністю диференціальної станції. Існує кілька методів DGNSS: класична DGNSS (або DGPS), кінематика реального часу (RTK) і RTK для глобальної мережі (WARTK).

1. Класична методика DGNSS є удосконаленням первинної системи GNSS, яка складається з визначення позиції GNSS для обстежуваної позиції, відомої як опорна станція. Коли GPS є єдиним супутником, який використовується для режиму диференціальної GNSS, система називається DGPS. Точність DGPS становить близько 1 м (1 сигма) в діапазоні від декількох десятків км від базової станції, і зростає зі швидкістю 1 м на 150 км поділу. Берегова охорона США та Берегова охорона Канади використовують DGNSS у США та Канаді на довгохвильових радіочастотах від 285 до 325 кГц. Ці частоти зазвичай використовуються для морського радіо та транслуються поблизу основних водних шляхів та портів. В Австралії діють дві системи DGPS: одна в основному для морської навігації, якою керує Австралійське управління безпеки на морі, що транслує свій сигнал на довгохвильову смугу; інший використовується для наземних зйомок та наземної навігації та має виправлення, що транслуються в радіодіапазоні Commercial FM.

Стандартний режим DGNSS визначає розташування GNSS з точно обстеженого пункту, відомого як опорна станція. Цей метод використовує переваги повільних змін помилок у часі та користувальницького положення через ефемеридне визначення залишкового супутникового годинника, іоносферних і тропосферних затримок. Починаючи з базової станції, система обчислює та транслує або виправлення до положення GNSS або до вимірювань псевдовідстані для користувачів DGNSS. Для того, щоб мати можливість застосовувати ці поправки, приймач повинен бути включений в режимі DGNSS і залишатися в безпосередній близькості від опорної станції, щоб гарантувати, що обидва приймачі (станція та ровер) будуть спостерігати один і той же супутник GNSS. Інші некорельовані помилки, наприклад, багатопроменеве поширення не можуть бути скориговані цим методом, і для їх усунення необхідно застосовувати інші режими та методи. Федеральний радіонавігаційний план США та Рекомендація МАМС щодо ефективності та моніторингу служб DGNSS у смузі 283,5-325 кГц вказують на ймовірне

зростання похибки. Класичний алгоритм DGNSS заснований на поодиноких відмінностях спостережуваних псевдовідстаней. На відміну від інших систем підвищення точності GNSS, таких як SBAS або GBAS, DGNSS використовується не для цивільної авіації, а для міського транспорту та офшорних зон. Тому стандарти, що застосовуються до систем DGNSS, є стандартами передачі даних, визначеними Спеціальним комітетом 104 DGNSS Радіотехнічної комісії для морських служб (RTCM). За винятком RTCM, існують інші пропрієтарні стандарти DGPS, такі як Trimble Compact Measurement Record (CMR).

Стандарти RTCM [30]. Міжнародні стандарти передачі даних для DGNSS визначені RTCM, зокрема його Спеціальним комітетом SC-104. RTCM SC-104 – це стандарт, який визначає структуру даних для інформації про диференціальну корекцію для різних програм. Він був розроблений Радіотехнічною комісією для морських служб (RTCM) і став галузевим стандартом передачі інформації про виправлення. Зауважте, що RTCM є протоколом двійкових даних.

Серед різних GNSS система DGNSS була першою, яка була розроблена досить давно і зараз широко використовується користувачами навігації. Зараз багато комерційних пристроїв GPS, навіть портативні пристрої, пропонують введення даних DGPS. Певною мірою форма DGPS на даний час є природною частиною більшості операцій GPS. Є багато операційних систем, що використовуються у всьому світі; За даними Берегової охорони США, у 47 країнах діють системи, аналогічні NDGPS США (загальнонаціональна DGNSS). Є кілька важливих прикладів систем DGNSS у країнах.

Перша система DGNSS була розроблена Береговою охороною США і називалася, по-перше, DGPS, а потім перетворилася на NDGPS США (Загальнонаціональна диференційна система глобального позиціонування). Міністерство транспорту Сполучених Штатів спільно з Федеральним управлінням автомобільних доріг, Федеральним управлінням залізниць та Національною геодезичною службою США призначило Берегову охорону

США як обслуговуюча агенція для національної мережі DGPS США. Система є розширенням попередньої морської диференціальної системи GPS (DGPS), яку Берегова охорона розпочала наприкінці 1980-их років та завершила у березні 1999 р. DGPS охопила тільки прибережні води, Великі озера та внутрішні водні шляхи річки Міссісіпі, в той час як NDGPS розширює цю систему та включає повне охоплення континентальної частини Сполучених Штатів. Централізованим блоком управління та контролю є USCG Navigation Center, що базується в Олександрії, шт. Вірджинія (США). USCG перейшло до виконання своїх обов'язків NDGPS після переходу з Міністерства транспорту до Міністерства національної безпеки США. У мережі США зараз транслюється 82 сайти NDGPS. Починаючи з 15 січня 2016 р. федеральні агентства, що відповідальні за систему, планують закрити та вивести з експлуатації 62 з 84 діючих ділянок NDGPS.

Канадська система схожа на систему США і призначена головним чином для морського використання, що охоплює Атлантичне та Тихоокеанське узбережжя, а також морські шляхи Великих озер та Святого Лаврентія. Він був розроблений канадською береговою охороною, і він також перекриває охоплення суміжних вод DGPS США.

В Австралії діють дві системи DGPS. Одна в основному для морської навігації, якою керує Австралійське управління безпеки на морі, що транслює свій сигнал на довгохвильову смугу. Другий використовується для наземних зйомок та наземної навігації та має виправлення, що транслюються в радіодіапазоні Commercial FM.

Європейська мережа DGPS була розроблена переважно морськими адміністраціями Фінляндії та Швеції з метою підвищення безпеки на архіпелазі між двома країнами. У Великобританії та Ірландії система була введена як морська навігаційна система, щоб заповнити пробіл, що залишився після занепаду системи Decca Navigator у 2000 р. З мережею у 12 передавачів, розташованих навколо берегової лінії та трьома станціями управління, вона була створена в 1998 р. відповідною Генеральною маяковою

організацією країн (GLA) – Трініті-Хаус, що охоплює Англію, Уельс і Нормандські острови, Раді Північного маяка, що охоплює Шотландію, Мен та комісари ірландських вогнів, що охоплюють всю Ірландію. Вона передає дані у діапазоні 300 кГц і прийнята до експлуатації у 2002 р. Надалі потрібно дослідити особливості реалізації високоточної навігації на базі стандартної GNSS GPS.

2.2 Вимірювання псевдовідстані у GPS

Загальний принцип визначення координат навігаційним приймачем полягає в наступному. Навігаційні супутники безперервно випромінюють у бік до земної поверхні електромагнітні сигнали. Сигнали закодовані спеціальним кодом і в них певними методами модуляції закладена певна інформація. У навігаційному приймачі здійснюється пошук сигналів всіх «видимих» супутників, виявлення сигналів та безперервне супроводження виявлених сигналів [16]. Для більш швидкого пошуку та виявлення сигналів супутників використовуються дані альманаху.

Альманах – це набір даних, який використовується для допомоги приймачам GPS у пошуку супутників. Альманах містить курсову інформацію про всі супутники у системі, і ця інформація, зазвичай, дійсна протягом кількох місяців. Коли приймач GPS вмикається, то він завантажує альманах, щоб дізнатися, де кожен із супутників повинен знаходитися на небі в даний момент часу. Це дозволяє приймачу швидко знаходити та «захоплювати» сигнали від супутників, щоб почати процес позиціонування. Додатково до альманаху, супутники GPS також передають «ефемеріди», які надають більш точну та актуальну інформацію про стан та місцезнаходження кожного супутника. Ефемеріди, зазвичай, дійсні лише кілька годин, тоді як альманах може залишатися актуальним протягом місяців. Якщо в пам'яті приймача є альманах і відомо приблизне місце, то в приймачі визначаються «видимі»

супутники, а отже, їх коди і грубі значення доплерівської частоти. За цими даними канали приймача автоматично налаштовуються на відповідні супутники та здійснюється швидкий перехід у режим супроводу. Після переходу в режим супроводу виконується процедура зчитування, декодування та запису пам'яті приймача даних, закладених у сигнали. Виявляються та надалі використовуються лише дані працездатних супутників. Для визначення координат необхідно мати дані про ефемериди, поточний час і час застосування даних. Потім у приймачі формується вимірювальна інформація. Приймач на даний час вимірює час проходження сигналів від кожного супутника до фазового центру антени приймача, а також доплерівську частоту. До поточного часу за допомогою коефіцієнтів, що коригують час, наводиться час кожного супутника та розраховуються часові, іоносферні та тропосферні поправки. За даними про ефемериди визначаються координати супутників на поточний момент часу та враховуються зміни положень супутників за час проходження сигналу від супутника до приймача. Надалі доцільно розглянути приклад визначення координат на площині за двома далекомірними джерелами. На рис. 2.2 зображено два далекомірні джерела з координатами і відстанями (x_1, y_1, R_1) , (x_2, y_2, R_2) , відповідно.

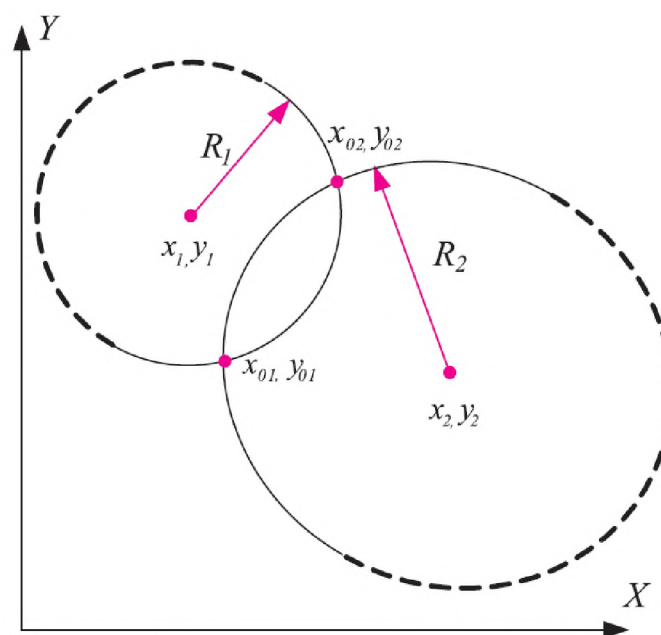


Рисунок 2.2 – Завдання про перетин двох кіл

Шукані координати знаходяться в точках з індексами «01, 02», тобто в точках перетину кіл з радіусами, рівними відстанями. При очевидній геометричній простоті аналітичне точне рішення визначення точок перетину кіл досить громіздко. Наведемо розв'язання цього завдання.

Записуємо рівняння, що зв'язують шукані координати (x, y) , з координатами далекомірних джерел і відстанями до них:

$$R_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2, \quad (2.1)$$

$$R_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2. \quad (2.2)$$

З виразу (2.1) отримуємо:

$$x_{01,02} = x_1 \pm (-y^2 + R_1^2 - y_1^2 + 2 \cdot y_1 \cdot y)^{0.5}. \quad (2.3)$$

Віднімемо з (2.1) рівняння (2.2) і обчислимо результат щодо x :

$$x = \frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2} \cdot y + 0,5 \cdot \frac{x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 - R_1^2 + R_2^2}{x_1 - x_2}. \quad (2.4)$$

Для спрощення запису формул позначимо:

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2} \text{ та } b = 0,5 \cdot \frac{x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 - R_1^2 + R_2^2}{x_1 - x_2}. \quad (2.5)$$

З урахуванням позначення (2.3-2.5) отримуємо квадратне рівняння для визначення координати y :

$$(1 + a^2) \cdot y^2 + 2 \cdot (a \cdot b - a \cdot x_1 - y_1) \cdot y + (x_1 - b)^2 + y_1^2 - R_1^2 = 0. \quad (2.6)$$

З (2.6) отримуємо рішення для координати y :

$$y_{01,02} = \frac{y_1 + a \cdot x_1 - a \cdot b \pm \sqrt{2 \cdot a \cdot x_1 \cdot y_1 + b \cdot x_1 - a \cdot b \cdot y_1 - x_1^2 - b^2 + R_1^2 - a^2 \cdot y_1^2 + a^2 \cdot R_1^2}}{1 + a^2}. \quad (2.7)$$

Рішення для координати x отримуємо (2.4) після підстановки в нього (2.7). Оскільки в результаті виходить два рішення, виникає питання про вибір найбільш відповідного. Для цього потрібно ще одне, третє, далекомірне джерело. Рішення рівняння для 3-го джерела спільно з (2.1) або (2.2) дозволяє розкрити неоднозначність у формулі (2.7). В цілому, для визначення координат приймача використовують ітеративний метод розрахунку спільно з

алгоритмом Гауса для обчислення зворотної матриці. Таким чином, псевдовідстань є одним із головних вимірювальних інформацій, необхідні визначення координат споживача. Для оцінки координат у 3-вимірному просторі потрібно виміряти псевдовідстані щонайменше до чотирьох навігаційних супутників на поточний момент часу. З врахуванням наведеного, вираз (1.1) можливо представити у вигляді:

$$PR_j = c \cdot (t_{np} - t_{j,sv}), \quad (2.8)$$

де: c – швидкість світла;

t_{np} – час у приймачі, на якому проводяться виміри;

$t_{j,sv}$ – час випромінювання фрагмента сигналу j -го супутника, який приймається приймачем.

На даний час, розрізняють кодову та фазову псевдовідстані. Кодова псевдовідстань оцінюється через відліки псевдовипадкових кодів супутників, фазова – через цілі та дробові складові довжини хвилі несучої частоти.

При вимірах псевдовідстані у GPS враховуються розбіжності між шкалою системного часу GPS і часом кожного навігаційного супутника, які компенсуються із застосуванням коефіцієнтів кубічного полінома, що передаються в словах 7...10 субкадру 1. Помилка шкали часу приймача визначається при вирішенні навігаційного завдання.

Процедури виміру псевдовідстані багато в чому залежать від принципу побудови приймача та елементної бази. Розглянемо основні принципи, що застосовуються у приймачах з метою оцінки псевдовідстані.

1. Використання інформації, що передається з навігаційних супутників. Передача інформації з навігаційних супутників здійснюється безперервно. Відлік початку передачі встановлюється щотижня в ніч (0 годин UTC) з суботи на тиждень. Дані йдуть у послідовності 1,5 субкадри і повторюються через кожні 30 сек. (рис. 2.3). Протягом тижня передається 100 800 субкадрів або 20160 кадрів. Кожен субкадр містить преамбулу із 8 двійкових символів 10001011 (на рис. 2.2 – суцільна чорна лінія); z-рахунок з слова 2-го субкадру

з 17 двійкових символів; порядковий номер субкадру з 3-ох двійкових символів 001(1), 010(2), 011(3), 100(4), 101(5) та іншу інформацію. Преамбула однакова всім супутників і всіх субкадрів і повторюється кожні 6 сек. Значення будь-якого z-рахунку поточного субкадру, помножене на 4, вказує час початку відліку від початку поточного тижня, з якого почнеться відлік наступного субкадру.

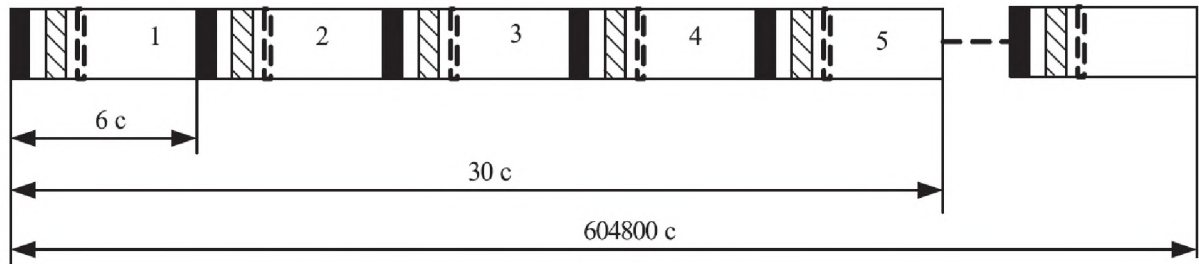


Рисунок 2.3 – Дані супутника протягом тижня

Інформація про номер тижня міститься у перших 10-ти розрядах слова 3 субкадру 1. Крім викладеного синхронно з початком кожного біту інформації з навігаційного супутника передається псевдовипадковий C/A код, який має період повторення 1 мс і містить 1023 символи. В одному інформаційному символі міститься 20 періодів C/A коду. Таким чином, інформація, що закладена в дані кожного супутника, може бути використана для визначення часу випромінювання будь-якого фрагменту даних. Надалі розглянемо наступний приклад. Нехай навігаційний приймач виявив сигнал супутника, перейшов у режим стеження за сигналом по доплерівській частоті та C/A коду, демодулював дані субкадру 1 і перевірів прийняту інформацію за бітом парності. Тоді зі слова 2 по z-рахунку може бути визначено час початку передачі субкадру 2. За номером поточного тижня слово 3 субкадру 1 визначаються рік, місяць і день початку тижня. По відліку часу від початку передачі субкадру 2 моменти відліку будь-якого фрагмента сигналу, оскільки на осі часу відомі положення символів інформації, що передається, кратні 20 мс (тривалість інформаційних символів), а внутрішньо-символьні відліки

кратні періоду повторення C/A коду (1 мс). Якби годинник приймача був ідентичний за точністю годинника супутника, то виміряти час поширення сигналу від супутника до споживача не був би складним. На рис. 2.4 зображено фрагмент сигналу супутника, що характеризується першим від початку субкадру фазовим переходом, зумовленим фазовою маніпуляцією несучої частоти інформаційними символами.

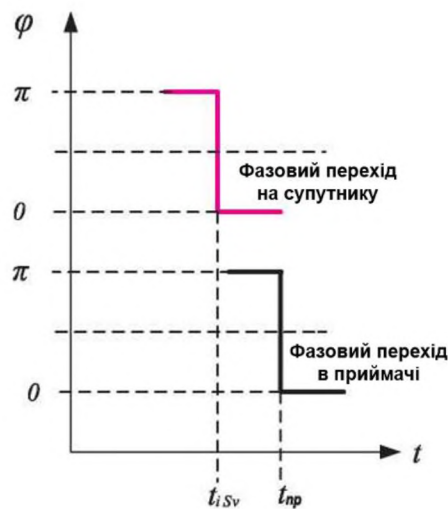


Рисунок 2.4 – Перші від початку субкадру фазові переходи

Той самий фазовий перехід у нижній частині рис. 2.3 зареєстровано на момент прийому сигналу. Оскільки відлік ведеться за тією ж шкалою часу, суміщеною з початком субкадру, то псевдовідстань визначається за формулою (2.8). У реальних приймачах, зазвичай, не встановлюються атомні синхронізатори часу. Шкала часу приймача має точність, на кілька порядків меншу за шкалу часу супутника.

2. Процедури відліку часу у приймачі. Обробці супутникового сигналу в приймачі передуює перетворення сигналу у цифрову форму за допомогою дискретизації. Частота дискретизації у два і більше разів за частоту проходження імпульсів C/A коду. Цифровий сигнал піддається кореляційній обробці. По максимумах кореляційної функції проводяться часові відліки фрагментів сигналу супутника. Сучасні мікросхеми кореляторів

характеризуються багатоканальністю та високими частотами дискретизації. Це дозволяє проводити одночасну обробку сигналів супутників, що у зоні видимості споживача. Одним з методів визначення часу затримки сигналів при поширенні від супутника до споживача полягає в оцінці відносної затримки прийому сигналів супутників. Метод заснований на тому, що при вирішенні навігаційної задачі визначення координат ітераційним алгоритмом із застосуванням методу найменших квадратів достатньо знати відносні затримки часу розповсюдження сигналів від супутника до споживача. Другим важливим фактором є те, що відносна затримка сигналу супутника в зеніті та супутника на лінії горизонту менше 20 мс. На рис. 2.5 зображено розраховану залежність (вісь ординат в мс) затримки сигналу τ в просторі від кута видимості супутника (вісь абсцис у градусах). Як випливає з рис. 2.5, максимальна різниця між низьким та високим супутниками дещо менше 19 мс. Це дає підстави організувати таку схему вимірювання відносної затримки часу. Розглянемо символи преамбули із ВЧ-заповненням (рис. 2.6).

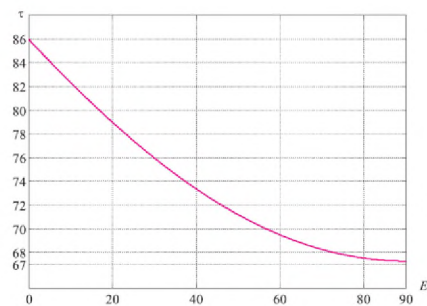


Рисунок 2.5 – Залежність часу поширення сигналу супутника від кута видимості

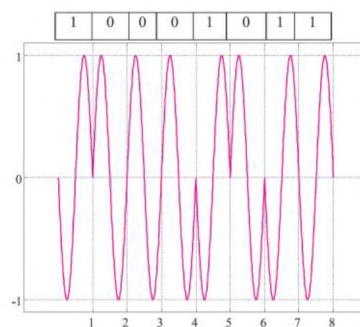


Рисунок 2.6 – Зображення фазоманіпульованого сигналу преамбули

Фазові переходи мають місце між 1 та 2; 4 та 5; 5 та 6; 6 та 7 символами. Оскільки супутники практично в той самий момент часу випромінюють однакові фрагменти сигналу, то фазові переходи, відповідні одним і тим же фрагментам сигналу в приймачі, займуть діапазон у межах, трохи менших 20 мс за шкалою часу приймача. Ці фазові переходи можуть бути початками відліку однакових фрагментів випромінюваних сигналів супутників у відповідних каналах приймача.

Маючи опорні моменти відліку фрагментів випромінюваних супутниками сигналів на шкалі часу приймача, можуть бути визначені відносні затримки супутників сигналів на поточні моменти проведення вимірювань. При цьому темп вимірювань, похибки відліків часу, роздільна здатність, маркування шкали часу приймача визначаються мікропроцесорною елементною базою, що застосовується в приймачі. Припустимо, після виконання всіх описаних процедур отримані відносні затримки часу поширення фрагментів сигналів на поточний момент часу t за шкалою часу приймача. Позначимо їх через Δt_j , ($j = 1 \dots k$ – умовні номери супутників у зоні видимості приймача). Усі Δt_j , лежать у межах 19 мс. Справжня затримка сигналу лежить не більше 67...86 мс. При отриманні Δt_j фактично з кожного значення затримки фрагмента сигналу віднімається постійна величина. Якщо цю величину позначити через ΔC , то вираз (2.8) набуде вигляду:

$$PR_j = c \cdot (\Delta C + \Delta t_j), \quad (2.9)$$

де ΔC – вибирається досить довільно під час вирішення навігаційної завдання.

При цьому слід мати на увазі, що розмірність виразу, що стоїть у дужках у формулі (2.9) в мс, а отже – швидкість світла повинна бути перерахована в м/мс для отримання псевдовідстані в метрах. З використанням формули (2.9) виходять дуже грубі значення псевдовідстаней. Однак вони застосовуються під час вирішення навігаційного завдання. Після

визначення координат споживача розраховуються відстані до супутників, а потім, якщо є необхідність, розраховуються і абсолютні затримки часу поширення фрагментів сигналу від супутника до споживача шляхом поділу розрахованих відстаней на швидкість світла. Слід відзначити, що при визначенні відносних затримок фрагментів сигналів супутників на поточний момент потрібно врахувати всі часові поправки: розбіжність шкал часу супутників і системної шкали GPS, іоносферні та тропосферні поправки, а також інші корекції, для яких є алгоритми.

2.3 Геометричний фактор та похибки визначення координат

При проведенні навігаційних обчислень одним з визначаючих параметрів є виміряні псевдовідстані, через які по суті і виконуються всі подальші обчислення. На рис. 2.7 зображено взаємне розташування фазового центру антени приймача (R), розташованого на поверхні землі (навколоземному просторі), та навігаційного супутника (S_v).

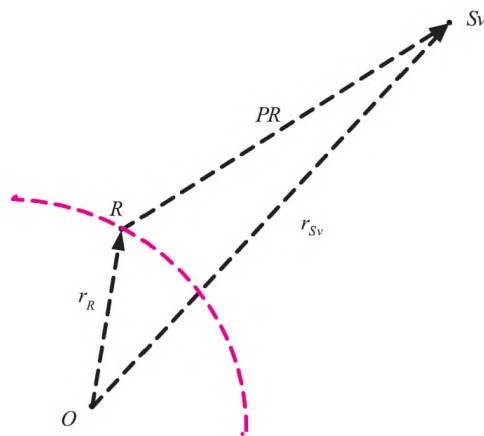


Рисунок 2.7 – Ідеалізоване розташування фазового центру антени приймача R та супутника S_v

Сигнали супутника не містять часових похибок, дані ефемерид характеризують точне положення супутника на орбіті. Приймач не вносить

похибок у вимір псевдовідстані (відстані) PR . Дальність супутника визначається як модуль різниці між векторами положень супутника r_{Sv} і фазового центру антени приймача r_R .

В умовах реальних вимірювань, з урахуванням даних, що передаються з супутника, характеристики навігаційного приймача вимірювання псевдовідстаней до навігаційних супутників мають похибки. Інтерпретацію основних похибок вимірювання псевдовідстані до навігаційного супутника зображено на рис. 2.8 як випадкових векторів Δr , максимальне значення яких обмежено колами. Положення та величина векторів змінюються за випадковим законом, близьким до нормального. Вимірювана псевдовідстань між фазовим центром антени приймача та навігаційним супутником на рис. 2.8 зображено суцільною ламаною лінією, а дальність – пунктирною прямою.

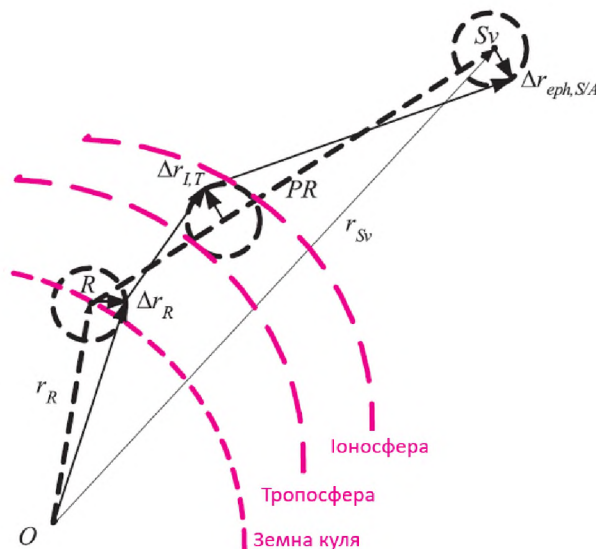


Рисунок 2.8 – Інтерпретація залишкових похибок псевдовідстані

Таким чином, під час потрібно враховувати наступні чинники [31]:

- похибки, зумовлені шумами приймача, багатопроменевістю, параметрами точності вимірювальних каналів приймача;
- залишкові похибки після застосування моделей обліку іоносферних (індекс « I ») та тропосферних (індекс « T ») корекцій;

– похибки, пов'язані з неточністю завдання ефемерид (індекс «eph») супутника, введенням селективного (індекс «S/A») доступу.

Сутність геометричних чинників у тому, що дозволяють прогнозувати похибки визначення координат залежно від взаємного розташування навігаційних супутників і приймача. На рис. 2.9 зображено геометрична інтерпретація низького та високого геометричних факторів. Затінені області в точці навігаційного приймача P відповідають полям похибок визначення координат залежно від кутового розташування (Δ) навігаційних супутників Sv_1 . Менша область на рис. 2.9.а характеризує низькі геометричні фактори, велика на рис. 2.9.б – високі.

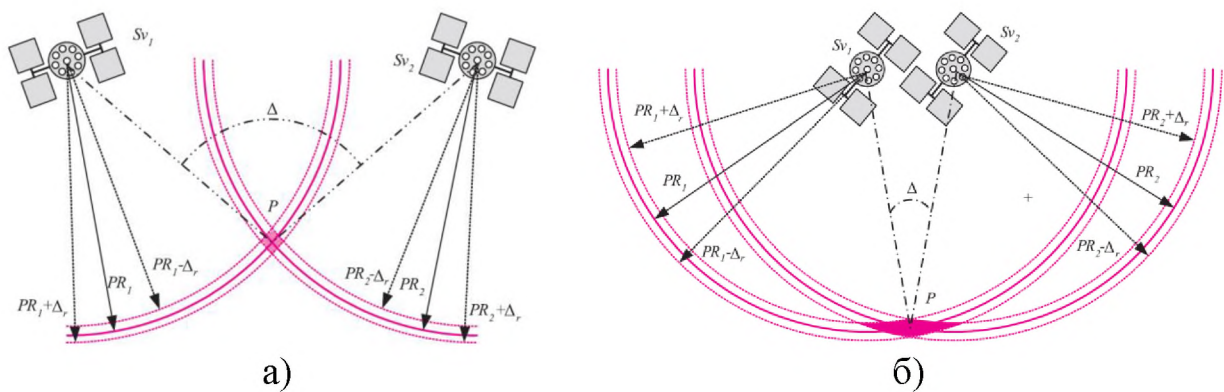


Рисунок 2.9 – Похибки визначення координат:

- а) – низький геометричний фактор;
- б) – високий геометричний фактор

Зменшення значень геометричних факторів відбувається зі збільшенням числа далекомірних джерел. Така тенденція зберігається також у несиметричних схемах розташування далекомірних джерел щодо фазового центру антени приймача. Диференціальний метод визначення координат використовується підвищення точності навігаційних визначень, виконуваних в апаратурі споживача. В загальному випадку, наземне функціональне доповнення містить контрольно-коригуючу станцію (ККС) і ОВЧ-канал передачі даних. Бортовий приймач GNSS і приймач ОВЧ-сигналів встановлені на борту споживача. Фазовий центр GNSS антени ККС

поєднаний з координатами $X_{Ant}, Y_{Ant}, Z_{Ant}$, які виміряно з високою геодезичною точністю (одиниці сантиметрів). Опорний приймач ККС вимірює псевдовідстані до видимих супутників. Оскільки координати фазового центру антени ККС відомі, її обчислювач може розрахувати псевдовідстані за виразом:

$$PR_{j \text{ розрахункове}} = \sqrt{(x_j - X_{Ant})^2 + (y_j - Y_{Ant})^2 + (z_j - Z_{Ant})^2}, \quad (2.10)$$

де (x_j, y_j, z_j) – координати j -го навігаційного супутника.

Різниця між розрахунковою та виміряною псевдовідстанями є поправка до псевдовідстані до відповідного навігаційного супутника. Врахування в апаратурі споживача цієї різниці та дозволяє підвищити точність навігаційних визначень. Вираз (2.10) справедливий для зони дії, обмеженої кількома десятками кілометрів, а обчислення та врахування поправок проводиться в той самий момент часу. У практичних системах передається швидкість зміни поправок до псевдовідстаней, із застосуванням яких проводиться розрахунок скоригованих псевдовідстаней.

2.4 Визначення протоколу для передачі навігаційних даних

Залежно від потреб і обладнання, необхідно використовувати певний протокол для передачі навігаційних даних. На даний час, існує кілька альтернатив. Стандарт NMEA 0183 (National Marine Electronics Association) [32] – це стандарт зв'язку, який використовується в морській та іншій навігаційній апаратурі для передачі даних між пристроями. NMEA 2000 (N2K). Це розроблений тією ж National Marine Electronics Association стандарт, що і NMEA 0183. Він забезпечує швидку передачу даних, підтримує каналні зв'язки і є більш стійким до перешкод в порівнянні з NMEA 0183.

Signal K: Це відносно новий відкритий стандарт, розроблений для обміну даними між морською електронікою. Він має модернізований підхід до зв'язку та інтеграції даних, і може бути заміною або додатком NMEA.

Seatalk: Це пропрієтарний протокол, розроблений компанією Raymarine. Цей протокол спочатку був розроблений для обміну даними між продуктами Raymarine, але з часом багато інших пристроїв стали підтримувати його.

CAN (Controller Area Network): Це стандарт передачі даних, що часто використовується в автомобільній та промисловій електроніці. NMEA 2000 фактично заснований на CAN, але з морською специфікацією.

При цьому, для комунікації можуть існують кілька варіантів інтерфейсу: RS-422 та RS-485, Ethernet та Wi-Fi, USB.

На основі проведених досліджень зроблено висновок про доцільність використання NMEA 0183 (стандарт що визначає текстовий протокол зв'язку навігаційного обладнання). Він став популярним у зв'язку з поширенням приймачів GPS, які використовують цей стандарт для передачі даних по шині UART. Повідомлення NMEA, що передаються GPS-модулем, можуть складатися з одного або кількох рядків, які мають наступний склад:

- кожен рядок починається символом \$;
- далі йдуть два символи джерела даних і три символи ідентифікатора рядка;
- після ідентифікатора слідує дані, що складаються з параметрів, які розділені комами;
- завершують рядок символ '*', два символи контрольної суми та символи \r\n.

Джерело даних представлено двома символами, які йдуть за символом '\$':

- GP – інформація отримана від супутників GPS (США);
- GA – інформація отримана від супутників Galileo (Європа);
- BD – інформація отримана від супутників Beidou (Китай);
- GQ – інформація отримана від супутників QZSS (Японія).

– GN – інформація отримана від супутників різних навігаційних систем.

Ідентифікатор рядка представлений 3-ма символами за джерелом даних:

- GGA – дані про останнє зафіксоване розташування;
- GLL – географічні координати;
- GSA – інформація про активних супутники (що беруть участь у позиціонуванні);
- GSV – інформація про всіх супутники, що спостерігаються;
- RMC – рекомендований мінімум навігаційних даних;
- VTG – швидкість та курс щодо землі;
- ZDA – дата та час;
- DHV – інформація про швидкість руху приймача GNSS;
- GST – статистика помилок позиціонування;
- TXT – текстове повідомлення.

Дані складаються з параметрів, розділених комами. Тип та склад параметрів залежить від ідентифікатора рядка. Нижче розглянуто параметри рядків із різними ідентифікаторами. Контрольна сума представлена двома символами за символом '*'. Контрольна сума являє собою шістнадцяткове подання результату операції XOR з байтами всіх символів рядка, розташованих між '\$' і '*', не включно.

Самі повідомлення складаються з одного та більше рядків. Кількість рядків та їх склад залежить від налаштувань GPS-модуля. При користуванні певного ПЗ (наприклад, бібліотека `iarduino_GPS`) склад повідомлень можна налаштувати функцією `composition()`, вказавши їй ідентифікатори тих рядків, які потрібно включити до складу повідомлення. Приклад повідомлення NMEA 0183 версії 4.1 наведений на рис. 2.10.

1. GGA. Рядок з ідентифікатором GGA містить дані про останнє розташування (рис. 2.11).

```

$GNGGA,102030.000,5546.95900,N,03740.69200,E,1,08,2.0,142.0,M,0.0,M,,*
$GNGLL,5546.95900,N,03740.69200,E,102030.000,A,A*
$GNGSA,A,3,10,16,18,20,26,27,,,,,4.8,2.0,4.3,1*
$GNGSA,A,3,19,,,,,4.8,2.0,4.3,4*
$GNGSA,A,3,82,,,,,4.8,2.0,4.3,2*
$GPGSV,3,1,12,07,08,343,,08,07,304,,10,28,195,42,13,20,054,,0*
$GPGSV,3,2,12,15,27,087,,16,47,262,39,18,66,082,23,20,58,174,23,0*
$GPGSV,3,3,12,21,75,089,23,26,33,222,31,27,38,298,40,29,15,127,,0*
$BDGSV,1,1,01,19,29,174,28,0*
$GLGSV,3,1,09,74,08,001,34,66,55,096,,82,69,318,21,73,25,326,,0*
$GLGSV,3,2,09,80,20,258,,65,18,025,,83,21,292,,81,51,092,,0*
$GLGSV,3,3,09,67,26,161,,0*
$GNRMC,102030.000,A,5546.95900,N,03740.69200,E,0.12,49.75,200220,,A,V*
$GNVTG,49.75,T,,M,0.12,N,0.22,K,A*
$GNZDA,102030.000,20,02,2020,00,00*
$GPTXT,01,01,01,ANTENNA OK*
$GNDHV,102030.000,0.03,0.000,0.000,0.000,0.00,,,M*
$GNGST,102030.000,6.9,,,5.6,9.2,10.1*
$GPTXT,01,01,02,MS=7,7,061A8200,33,0,00000000,20,2,00028000*

```

Рисунок 2.10 – Приклад повідомлення NMEA 0183

```

$GNGGA,102030.000,5546.95900,N,03740.69200,E,1,08,2.7,142.0,M,0.0,M,,*FF
/r/n
^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 234

```

Рисунок 2.11 – Приклад рядка GGA

Призначення параметрів рядка GGA має наступні атрибути.

1 – Час UTC у форматі «ГГММСС.ССС». Так, у прикладі «102030.000» означає 10 годин, 20 хвилин, 30.000 секунд;

2 – Широта у форматі «ГГХВ.МММММ». У прикладі «5546.95900» = $55^{\circ} 46.959' = 55.78265^{\circ}$.

3 – Напрямок широти: 'N'-північ / 'S'-південь. У прикладі 'N' – північ.

4 – Довгота у форматі «ГГГХВ.МММММ». У прикладі «03740.69200» = $37^{\circ} 40.692' = 37.6782^{\circ}$.

5 – Напрямок довготи: 'E'-схід/'W'-захід. У прикладі 'E' – схід.

6 – Спосіб обчислення координат ('0' – недоступно; '1' – автономно; '2' – диференціально; '3' – PPS; '4' – фіксований RTK; '5' – не фіксований RTK; '6' - екстраполяція; '7' – фіксовані координати; '8' – режим симуляції). У прикладі '1' – автономно.

7 – Кількість активних супутників, від «00» до «12». У прикладі «08».

8 – Горизонтальний геометричний фактор погіршення точності (HDOP). У прикладі "2.7".

9, 10 – Висота над рівнем моря (geoid), одиниці виміру висоти. У прикладі "142.0, М".

11, 12 – Різниця між еліпсоїдом землі та рівнем моря (geoid), одиниці виміру.

13 – Кількість секунд, що пройшли з отримання останньої DGPS поправки (SC104).

14 – ID базової станції, що надає DGPS поправки (якщо включено DGPS).

Примітка: у прикладі GPS-модуль не надіслав параметрів 13 і 14.

2. GLL. Рядок з ідентифікатором GLL містить географічні координати (рис. 2.12).

```
$GNGLL,5546.95900,N,03740.69200,E,102030.000,A*FF/r/n - версія 2.2
$GNGLL,5546.95900,N,03740.69200,E,102030.000,A,A*FF/r/n - версія 4.0 та 4.1
  ^ ^ ^ ^ ^
  1 2 3 4 5 6 7
```

Рисунок 2.12 – Приклад рядка GLL

Призначення параметрів рядка GLL має наступні атрибути.

1 – Широта у форматі «ГГХВ.МММММ». У прикладі «5546.95900» = $55^{\circ} 46.959' = 55.78265^{\circ}$.

2 – Напрямок широти: 'N'-північ / 'S'-південь. У прикладі 'N'-північ.

3 – Довгота у форматі «ГГГХВ.МММММ». У прикладі «03740.69200» це $37^{\circ} 40.692' = 37.6782^{\circ}$.

4 – Напрямок довготи: 'E'-схід/'W'-захід. У прикладі 'E'-схід.

5 – Час UTC у форматі «ГГХВСС.ССС». У прикладі «102030.000» означає 10 годин, 20 хвилин, 30.000 секунд.

6 – Достовірність отриманих координат. У прикладі 'A' – дані достовірні ('A' – дані достовірні; 'V' – помилкові дані).

7 – Спосіб обчислення координат ('A' – автономний; 'D' – диференціальний; 'E' – апроксимація; 'M' – фіксовані дані; 'N' – недостовірні

дані). У прикладі 'A' – автономний. У повідомленнях NMEA 0183 версії 2.2 рядок містить лише 6 параметрів.

3. GSA. Рядок з ідентифікатором GSA містить інформацію про активні супутники (рис. 2.13).

```
$GPGSA,A,3,10,16,18,20,26,27,,,,,,,,,4.8,2.0,4.3*FF/r/n - версія 2.2 та 4.0
$GNGSA,A,3,10,16,18,20,26,27,,,,,,,,,4.8,2.0,4.3,1*FF/r/n - версія 4.1
  A A A A A A A A A A A A A A A A
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8
```

Рисунок 2.13 – Приклад рядка GSA

В одному повідомленні NMEA 0183 відправляється відразу кілька рядків GSA, по одному для кожної супутникової навігаційної системи, що використовується модулем. Параметри рядка GSA мають наступні атрибути.

1 – Режим вибору 2D/3D: 'A'-автоматичний / 'M'-ручний. У прикладі 'A' – автоматичне.

2 – Режим вибраного формату '1'-немає рішення / '2'-2D / '3'-3D. У прикладі '3' – 3D.

3-14 – ID активного супутника. У прикладі вказані ID 6 супутників: «10», «16», «18», «20», «26», «27».

15 – Просторовий геометричний фактор погіршення точності (PDOP). У прикладі «4.8».

16 – Горизонтальний геометричний фактор погіршення точності (HDOP). У прикладі «2.0».

17 – Вертикальний геометричний фактор погіршення точності (VDOP). У прикладі «4.3».

18 – Номер навігаційної системи (1-GPS, 2-Glonass, 3-Galileo, 4-Beidu). У прикладі '1'.

У повідомленнях NMEA 0183 версії 2.2 та 4.0 рядок містить лише 17 параметрів, а джерело даних (два перші символи після '\$') вказує на конкретну супутникову навігаційну систему «GP», «GL», «GA», «BD», або «GQ», на відміну від версії 4.1, де джерело даних для будь-якого рядка GSA вказано як «GN», а GNSS визначена у 18-му параметрі.

4. GSV. Рядок з ідентифікатором GSV містить інформацію про всіх супутників, що спостерігаються. Приклад рядка в якому присутня інформація про 4 супутники (максимальна кількість) наведений на рис. 2.14, а приклад рядка в якому присутня інформація лише про 2 супутники – на рис. 2.15.

```
$GLGSV,3,1,09,74,09,089,06,66,55,095,,82,70,320,18,73,26,325,23*FF/r/n - версія 2.2 та 4.0
$GLGSV,3,1,09,74,09,089,06,66,55,095,,82,70,320,18,73,26,325,23,0*FF/r/n - версія 4.1
^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^
1 2 3 4 5 6 7 4 5 6 7 4 5 6 7 8
```

Рисунок 2.14 – Інформація лише про 4 супутники

```
$GLGSV,3,3,09,67,26,161,23,82,70,320,18*FF/r/n - версія 2.2 та 4.0
$GLGSV,3,3,09,67,26,161,23,82,70,320,18,0*FF/r/n - версія 4.1
^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^
1 2 3 4 5 6 7 4 5 6 7 8
```

Рисунок 2.15 – Інформація лише про 2 супутники

В одному повідомленні NMEA 0183 відправляється відразу кілька рядків GSA, від одного до декількох рядків для кожної навігаційної системи, що використовується модулем. Призначення параметрів рядка GSV має наступні атрибути.

1 – Кількість повідомлень GSV, що виводяться, для даної навігаційної системи. У прикладі '3'.

2 – Номер повідомлення GSV для цієї навігаційної системи. У 1 прикладі «1», у другому «3».

3 – Кількість супутників зазначеної навігаційної системи. У прикладі – «09».

4, 5, 6, 7 – Дані про супутник. В одному рядку може бути від 0 до 4 блоків даних. Кожен блок даних складається з 4 параметрів:

- ID супутника (від 1 до 255). ID не може дорівнювати '0'.
- Кут піднесення супутника щодо модуля, у градусах («00»-горизонт/«90» – зеніт).
- Азимут положення супутника щодо модуля, у градусах («000» - «360»).

- Рівень сигналу SNR (відношення сигнал/шум) в дБ («00» - «99»),
- 8 – Додатковий параметр, наявний у версії 4.1 і вище, значення завжди дорівнює '0'.

Джерело даних (два перші символи після '\$') вказує на супутникову навігаційну систему «GP», «GL», «GA», «BD», або «GQ», до якої належать дані про супутники у рядку. Для кожної навігаційної системи в одному повідомленні може бути вказано кілька рядків, їх кількість вказана у першому параметрі рядка, а номер рядка вказано у другому параметрі. У повідомленнях NMEA 0183 версії 4.1 додано один останній додатковий параметр, значення якого завжди дорівнює 0.

5. RMC. Рядок з ідентифікатором RMC містить рекомендований мінімум навігаційних даних (рис. 2.16).

```
$GNRMC,102030.000,A,5546.95900,N,03740.69200,E,0.12,49.75,200220,*FF/r/n - версія 2.2
$GNRMC,102030.000,A,5546.95900,N,03740.69200,E,0.12,49.75,200220,,A*FF/r/n - версія 4.0
$GNRMC,102030.000,A,5546.95900,N,03740.69200,E,0.12,49.75,200220,,A,V*FF/r/ n - версія 4.1
  ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3
```

Рисунок 2.16 – Приклад рядка RMC

У повідомленнях NMEA 0183 версії 2.2 рядок містить лише 11 параметрів, а у версії 4.0 – 12 параметрів. Призначення параметрів рядка RMC має наступні атрибути.

- 1 – Час UTC у форматі «ГГХВСС.ССС».
- 2 – Достовірність отриманих координат. У прикладі 'A' – дані достовірні ('A' – дані достовірні; 'V' – помилкові дані).
- 3 – Широта у форматі «ГГХВ.МММММ». У прикладі «5546.95900» = $55^{\circ} 46.959' = 55.78265^{\circ}$.
- 4 – Напрямок широти: 'N'-північ / 'S'-південь. У прикладі 'N'-північ.
- 5 – Довгота у форматі «ГГГХВ.МММММ».
- 6 – Напрямок довготи: 'E'-схід/'W'-захід. У прикладі 'E'-схід.
- 7 – Швидкість у вузлах. У прикладі «0.12» = 0.222 км/год.
- 8 – Курс на справжній полюс у градусах. У прикладі «49.75» = 49.75° .

- 9 – Дата у форматі "ДДММГГ". У прикладі «200220» = 20.02.20 р.
 10 – Магнітне відмінювання в градусах. Відсутня у прикладі.
 11 – Напрямок магнітного відхилення ('E'-відняти / 'W'-додати).
 12 – Спосіб обчислення координат (відсутнє у версії 2.2). 'A' – автономний ('D' – диференціальний; 'E' - апроксимація; 'M' - фіксовані дані; 'N' - недостовірні дані). У прикладі 'A' – автономний.

13 – Статус навігації (відсутній у версіях 2.2 та 4.0). У прикладі 'V'.

6. VTG. Рядок з ідентифікатором VTG містить швидкість та курс щодо землі (рис. 2.17).

У повідомленнях NMEA 0183 версії 2.2 рядок містить лише 8 параметрів. Призначення параметрів рядка VTG має наступні атрибути.

- 1 – Курс на справжній полюс у градусах. У прикладі «49.75» = 49.75°.
 2 – Прапор достовірності курсу: 'T'-True/'F'-False. У прикладі 'T'-True.
 3 – Магнітне відмінювання в градусах. Відсутня у прикладі.
 4 – 'M'-Магнітний.
 5, 6 – Швидкість одиниці вимірювання швидкості. У прикладі «0.12, N» = 0.12 вузлів.
 7, 8 – Швидкість одиниці вимірювання швидкості. У прикладі «0.12, K» = 0.22 км/год.
 9 – Спосіб обчислення швидкості та курсу ('A' – автономний; 'D' – диференціальний; 'E' – апроксимація; 'M' – фіксовані дані; 'N' – недостовірні дані) – відсутнє у версії 2.2. У прикладі 'A' – автономний.

7. ZDA. Рядок з ідентифікатором ZDA містить дату та час (рис. 2.18).

```
$GNVTG,49.75,T,,M,0.12,N,0.22,K*FF/r/n - версія 2.2
$GNVTG,49.75,T,,M,0.12,N,0.22,K,A*FF/r/n - версія 4.0 та 4.1
  ^  ^  ^  ^  ^  ^  ^
  1 2 3 4 5 6 7 8 9
```

Рисунок 2.17 – Приклад рядка VTG

```
$GNZDA,102030.000,20,02,2020,00,00*FF/r/n
  ^  ^  ^  ^  ^  ^
  1 2 3 4 5 6
```

Рисунок 2.18 – Приклад рядка ZDA

Призначення параметрів рядка ZDA має наступні атрибути.

- 1 – Час UTC у форматі «ГГХВСС.ССС».
- 2 – День у форматі «ДД». У прикладі «20» = 20 день місяця.
- 3 – Місяць у форматі «ММ». У прикладі «02» = лютий.
- 4 – Рік у форматі «РРР». У прикладі «2020» = 2020 рік.
- 5 – Часовий пояс – годинник у форматі «ГГ».
- 6 – Часовий пояс – хвилини у форматі «ХВ».

8. DHV. Рядок з ідентифікатором DHV містить інформацію про швидкість руху приймача (рис. 2.19).

```
$GNDHV,102030.000,0.03,-0.179,0.105,0.071,0.04,,,,M*FF/r/n
  ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
```

Рисунок 2.19 – Приклад рядка DHV:

Призначення параметрів рядка DHV має такі атрибути.

- 1 – Час UTC у форматі «ГГХВСС.ССС».
- 2 – Швидкість 3D м/с. У прикладі «0.08».
- 3 – Швидкість ECEF-X м/с. У прикладі «-0.179».
- 4 – Швидкість ECEF-Y у м/с. У прикладі «0.105».
- 5 – Швидкість ECEF-Z м/с. У прикладі «0.071».
- 6 – Швидкість у м/с. У прикладі «0.04».

9. GST. Рядок з ідентифікатором GST містить статистику помилок позиціонування (рис. 2.20).

```
$GNGST,102030.000,6.9,,,,5.6,9.2,10.1*FF/r/n
  ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^ ^
  1 2 3 4 5 6 7 8
```

Рисунок 2.20 – Приклад рядка GST

Призначення параметрів рядка GST наведено нижче.

- 1 – Час UTC у форматі «ГГХВСС.ССС».
- 2 – Середнє квадратичне значення (RMS) стандартної девіації діапазонів у метрах.

- 3 – Помилка еліпса напівосі semi-major в метрах.
- 4 – Помилка еліпса напівосі semi-minor в метрах.
- 5 – Помилка орієнтації еліпса напівосі semi-major у градусах.
- 6 – Помилка широти в метрах.
- 7 – Помилка довготи в метрах.
- 8 – Помилка висоти в метрах.

10. TXT. Рядок з ідентифікатором TXT містить текстове повідомлення (рис. 2.21). Текстове повідомлення може містити пробіли та коми. Призначення параметрів рядка TXT:

- 1 – Кількість рядків із текстом цього текстового повідомлення. У прикладі «01» = 1 рядок.
- 2 – Номер рядка з текстом текстового повідомлення. У прикладі «01» = 1 рядок.
- 3 – Ідентифікатор типу повідомлення («00» – помилка; «01» – попередження; «02» – повідомлення; «07» – користувальницьке). У прикладі «01» – Попередження.
- 4 – Текстове повідомлення. Приклад «ANTENNA OK».

```
$GPTXT,01,01,01,ANTENNA OK*FF/r/n
  ^  ^  ^  ^
  1  2  3  4
```

Рисунок 2.21 – Приклад рядка TXT

Висновки до розділу 2

DGNSS доповнює основні дані за допомогою мережі наземних опорних пунктів, які допомагають слідкувати за передачею диференціальних даних для покращення їхньої точності. Існують кілька рішень DGNSS: традиційна DGNSS (DGPS), RTK та RTK для всесвітньої мережі (WARTK). Звичайний режим DGNSS враховує переваги повільних змін помилок у відношенні до часу та позиції користувача. При цьому потрібно враховувати неточності

через шуми обладнання, багатопроменевість, характеристики точності каналів приймача, а також залишкові неточності після використання іоносферних і тропосферних корекцій та помилки через неточне введення ефемерид супутника та активізацію селективного доступу. Під час навігаційних розрахунків ключовими є виміряні псевдовідстані, на основі яких здійснюються всі наступні розрахунки. Методика виміру цих псевдовідстаней значною мірою залежить від конструкції приймача та його компонентів. Під час обчислення псевдовідстаней в GPS враховують різницю між загальною шкалою часу GPS та часовими показниками кожного супутника. Невідповідність у часовій шкалі приймача стає відомою при вирішенні навігаційних задач. Корегувальні поправки для виправлення вимірів псевдовідстаней передаються від опорної станції до користувача DGNSS. Щоб скористатися цими корекціями, приймач має працювати в режимі DGNSS і бути неподалік від базової станції, гарантуючи, що обидва приймачі (базова станція та мобільний приймач) отримують сигнал від того ж самого GNSS супутника. Щоб швидше знаходити та отримувати сигнали від супутників, використовуються дані альманаху та ефемериди як довідники.

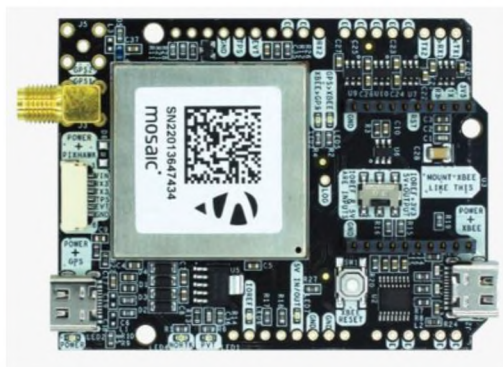
Проведені дослідження свідчать про доцільність використання протоколу NMEA 0183 для передачі навігаційної інформації. Цей протокол став відомим завдяки розповсюдженню GPS-приймачів, які використовують його для комунікації через UART шину.

РОЗДІЛ 3

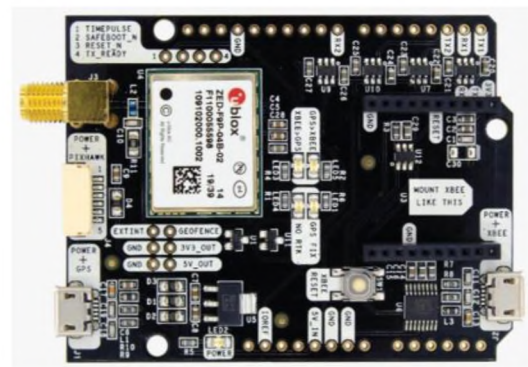
РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ВИСОКОТОЧНОЇ НАВІГАЦІЇ БЕЗЕКІПАЖНИХ ПЛАТФОРМ

3.1 Модель системи високоточної навігації безекіпажних платформ екосистеми інтернет речей

Згідно п.2.2, для розробки системи високоточної навігації безекіпажних платформ екосистеми IoT доцільно використовувати багатодіапазонні модулі GNSS [3, 4, 33, 34]. Досить перспективними є 3-діапазонні модулі (GPS L1/L2/L5), наприклад, simpleRTK3B Pro (к. ArduSimple) на базі чіпсету Septentrio mosaic-X5 – рис. А.1.а [35]. Вони підтримують такі платформи як, Arduino, Raspberry Pi, Nvidia Jetson Nano та STM32 Nucleo. Однак, підтримка діапазону GPS L5 відображається на вартості модуля. На даний час, різниця у вартості модуля з підтримкою лише GPS L1/L2 (simpleRTK2B Budget [36] від тієї фірми – рис. 3.1.б), в середньому, складає 35-40 тисяч грн.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Багатодіапазонні приймачі GNSS к. ArduSimple:

- а) – simpleRTK3B Pro;
- б) – simpleRTK2B Budget.

Існують також реалізації 3-діапазонні модулів від к. TOPGNSS (Китай) [37], що дешевше від номенклатури серії simpleRTK3B. Однак, вони поки що не мають значного поширення через недостатню спільноту та обмежену інформацію щодо програмного забезпечення та відповідних даташитів. Як

наслідок, в роботі запропонована модель системи високоточної навігації безкіпажних платформ екосистеми інтернет речей на основі дводіапазонних модулів на основі мікросхем ZED-F9P (к. U-blox) [38]. В якості базового розглядається модуль simpleRTK2B Budget (к. ArduSimple) у специфікації AS-RTK2B-F9P-L1L2-NH-02 ARDUSIMPLE [39]. При підключенні до базової станції існуючої мережі RTK або серверу NTRIP він може забезпечити точність до 1 см (за умови, що відстань до таких компонентів не перевищує 35 км). В режимі корекції SRR точність складає 4 см, а автономному режимі до 1,5 м. Швидкість оновлення – 1 Гц (за замовчуванням); з максимальною продуктивністю – до 10 Гц; зі зниженою продуктивністю – до 20 Гц. Фіксація першого положення – 25 секунд (холодний старт), 2 с. (гарячий старт), перше виправлення RTK – 35 с. (холодний старт). Модуль підтримує роботу з такими GNSS: GPS: L1C/A L2C, GLONASS: L1OF L2OF, Galileo: E1-B/C E5b, BeiDou: B1I B2I, QZSS: L1C/A L2C, SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN і SouthPAN. При цьому, його можливо використовувати для побудови стаціонарної станції RTK або тимчасової, а також застосовувати для спільної роботи з польотними контролерами типу Pixhawk [40].

Таким чином, в роботі запропонована модель системи високоточної навігації, що наведена на рис. 3.2.

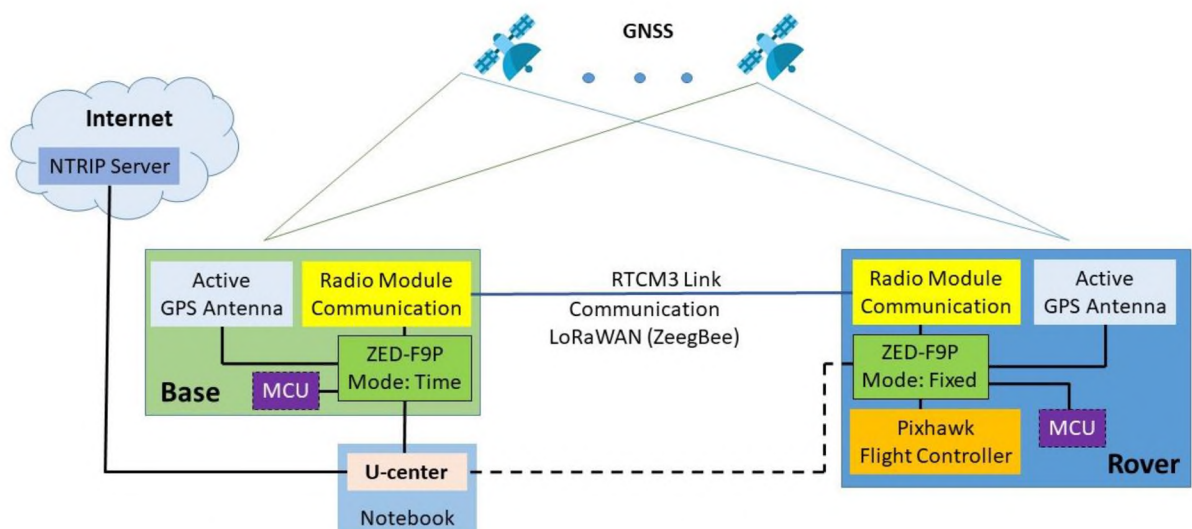


Рисунок 3.2 – Модель системи високоточної навігації безкіпажних платформ екосистеми інтернет речей

Згідно п. 2.3, з ZED-F9P та 2-діапазонною антеною L1/L2 (і без даних корекції RTK) можна спостерігати не менше 30 (або більше супутників за відповідних погодних умов) і точність горизонтального позиціонування вище 300 мм. Це неймовірно точно для одного приймача і має бути достатнім для багатьох проєктів. Налаштування RTK є складним завданням, але після завершення можна отримати виправлення RTK із точністю 14 мм. Однак практична реалізація запропонованого підходу потребує вирішення низки технічних питань.

1. Нестача пам'яті для програми. Для гарантованої доставки пакетів навігаційної інформації потрібен цілий стек протоколів. В якості альтернативи можна використовувати TCP версії Light. При цьому треба оптимізувати (відкидати все зайве) збірку прошивки модуля GNSS максимально для того, щоб вмістити функціонал у Flash пам'ять (230 кБ).

2. Потрібно реалізувати порівняно високу бітову швидкість передачі даних RTCM поправок через модулі LoRa. Це близько від 600 Б/с до 2 кБ/с, якщо мова йде про відстані >10 км. При цьому максимальна дозволена потужність дорівнює 50 мВ. Тобто для LoRa антени та аналоговий тракт мають бути суттєво якісними.

3. Потік пакетів RTCM повинен бути безперервним. Якщо хоч один байт з 1 МБ випаде, то RTK відключиться приблизно на 10-20 хв.

4. Налаштування модуля для базової станції (Base) можливе тільки на відкритій місцевості, щоб приймачі могли отримати сигнал від супутників.

5. Base на основі ZED-F9P визначає свої точні координати 5-15 хвилин, перш ніж включити трансляцію поправок у режимі TIME (без цього RTK не увімкнеться).

6. Кількість підтримуваних діапазонів GNSS відображається на вартості не тільки самого модуля GNSS, але і антен.

7. На даний час, деякі виробник модулів GNSS не поставляють до України власну продукцію (наприклад, к. SparkFun [41]).

8. Якщо використовувати типові трансівери LoRa (наприклад, SX1262) [42], то треба застосовувати механізм програмного тунелювання пакетів, через те, що трансівер LoRa передає пакети по 255 байтів, а пакети RTCM3 мають довжину ≈ 1024 байтів.

9. Для налагодження LoRa треба знайти відкритий простір із прямою видимістю близько 10-20 км. Причому для тестів LoRa треба такий полігон, де можна безперервно збільшувати та зменшувати відстань між трансіверами, не порушуючи при цьому прямої видимості, з врахуванням 3-ої зони Френеля.

Для вирішення цих питань надалі доцільно дослідити конфігурацію модулів навігації з боку станції (Base) та безекіпажної платформи (Rover).

3.2 Налаштування ПЗ U-center і прошивки модулів u-blox

Безкоштовне ПЗ U-center [43] від к. U-blox призначене для налаштування GPS-приймачів U-blox під ОС Windows, яке характеризується досить щільним інтерфейсом (додаток А, рис. А.1).

Для його роботи спочатку встановлюються драйвери (рис. А.2). Для цього відкрити диспетчер пристроїв Windows. Якщо приймач u-blox не відображається під COM-портами, клацнути правою кнопкою миші датчик розташування u-blox GNSS і вибрати «Оновити драйвер». Далі клацнути «Пошук драйверів на моєму комп'ютері», потім «Дозволити мені вибрати»... і вибрати перший послідовний пристрій USB. Тепер плата модуля має числитися як послідовний COM-порт USB, наприклад, на рис. А.3 модуль має порт COM12. Далі повертаємось до U-center і відкриваємо список портів. Вибераємо COM-порт, який відповідає модулю (рис. А.4).

Надалі конфігурується налаштування та виведення повідомлень NMEA. Для цього розглянемо кілька функцій. Текстова консоль. Кнопка текстової консолі покаже Вам необроблені повідомлення NMEA. Це зручно для

швидкої перевірки видимого ASCII, що надходить із модуля через USB (рис. А.5). У цьому вікні Ви можете переглянути та налаштувати нові параметри. Коли натискаєте на таке налаштування, як «MSG (повідомлення)» U-center опитує модуль щодо його поточного стану (рис. А.6). «10» у кутку вказує на те, скільки часу відображається інформація. У цьому випадку, минуло 10 секунд з моменту останнього запиту цього параметра. Натисніть кнопку «Опитування», щоб оновити інформацію. Виберіть F0-00 NMEA GxGGA повідомлення. Коли Ви клацаєте спадне меню, ПЗ опитує поточні налаштування. Спочатку це дезорієнтує, але з часом стає краще. Конфігурація MSG дуже потужна. Це дозволяє увімкнути вимкнути різні повідомлення NMEA або бінарні протоколи, такі як NAV-PVT. Після вибору повідомлення, наприклад GxGGA, прапорці будуть заповнені. Якщо потрібно вимкнути повідомлення GxGGA для інтерфейсу SPI, зніміть прапорець SPI, а потім натисніть «Надіслати».

Відповідно, повідомлення GxGGA більше не відображається в інтерфейсі SPI. Це означає важливий факт – усі інтерфейси можуть отримувати доступ до інформації одночасно. Тобто, можна перевіряти параметри конфігурації через послідовний порт USB, у той час як Ваш Arduino вносить зміни через порт I₂C. Можна читати повідомлення NMEA через порт I₂C або надсилати дані RTCM у модуль через SPI. Все це легко налаштовується. Порт USB на модулі GNSS – це як будь-який інший пристрій USB-послідовний. Він числиться на ПК як COM-порт і діятиме як такий. Він незалежний від порту UART, який є виділеним послідовним портом TTL.

Дуже корисним є підменю «Порти» (PRT) у розділі «Конфігурація». Ви можете змінювати швидкість передачі даних, адресу I₂C і протоколи. Залежно від ПЗ, можна увімкнути або вимкнути цілі протоколи інтерфейсу. Заводські налаштування за замовчуванням для підходять для I₂C і UART1 для цілей RTK (вхід RTCM3 увімкнено для обох портів) – рис. А.7.

Вікно повідомлень (рис. А.8) дозволяє переглядати різні повідомленням від модуля. Це неочевидно, але якщо Ви двічі клацнете «NMEA», дерево

повідомлень згорнеться. Подібним чином, якщо Ви двічі клацнете «UBX», він розгорнеться, показуючи різні варіанти UBX. За замовчуванням багато з них не увімкнено.

Якщо щось недоступне через U-center, це, ймовірно, означає, що ця функція чи налаштування несумісні з поточним під'єднаним пристроєм. Якщо ваш модуль переходить у невідомий стан, ви можете від'єднати його та знову підключити, щоб скинути налаштування.

Надалі необхідно переконатись, що модулі Base і Rover мають однакову прошивку від u-blox. На даний час, досить поширеними є v1.13 і v1.32. Щоб перевірити прошивку, відкрийте вікно повідомлень. Згорніть гілку NMEA, двічі клацнувши «NMEA». Розгорніть гілку UBX і знайдіть «MON» (монітор). Розгорніть MON і знайдіть VER (останній у списку). FWVER вказує поточну версію прошивки (рис. А.9). Якщо наявна версія застаріла, то потрібно її оновити до актуальної – рис. А.10. Відкрийте меню Інструменти → Оновлення та дотримуватись підказок (при цьому, іноді, доводиться зняти прапорець «Введіть безпечне завантаження перед оновленням».

3.3 Методика контролю точності системи високоточної навігації безекіпажних платформ

Першим кроком у налаштуванні Base і Rover є налаштування базової станції. Існує кілька способів налаштування базової станції: тимчасова базова станція є швидшою, але менш точною. Статична базова станція потребує більше часу для створення та налаштування, але забезпечує найбільшу точність. Згідно завдання, в роботі розглядається варіант тимчасової базової станції. Мета бази GNSS RTK – не рухатися. Як тільки Ви повідомите приймачу, що він є базовою станцією (тобто не рухається), він почне дивитися на супутники, які наближаються над головою, і обчислить своє положення. У міру зміни навколишнього середовища сигнали від GNSS

змінюються та трансформуються. Оскільки база знає, що вона нерухома, вона може визначити збурення в іоносфері та тропосфері (а також інші джерела помилок) і почати обчислювати значення, необхідні для корекції розташування, яке супутники повідомляють фактичному розташуванню базової станції. Ці значення називаються «коригуючими значеннями» та закодовані у форматі під назвою RTCM (Radio Technical Commission for Maritime), але це лише назва стандарту, схожого на «802.11». На даний час, досить поширеною є версія RTCM3; це просто дані корекції, що передаються за допомогою версії 3 формату RTCM. Точність розташування Base буде відображатися на точності позиції Rover. Іншими словами, якщо база неправильно записана на відстані 1 м від її фактичного розташування, то всі показання Rover будуть неправильними рівно на 1 м. Дуже важливо розташувати антену з чітким оглядом неба та отримати точне місцезнаходження Base. Після встановлення антени та підключення ZED-F9P [38] до USB та до антени. Відкриваємо U-center та підключаємо до відповідного COM-порту, створеного Windows під час підключення плати. Якщо все виконано вдало, то у вікні ПЗ можна побачити кількість супутників відповідної GNSS, що спостерігаються, тип сигналу, режим роботи модулю навігації (3D/DGNSS) – рис. 3.3.

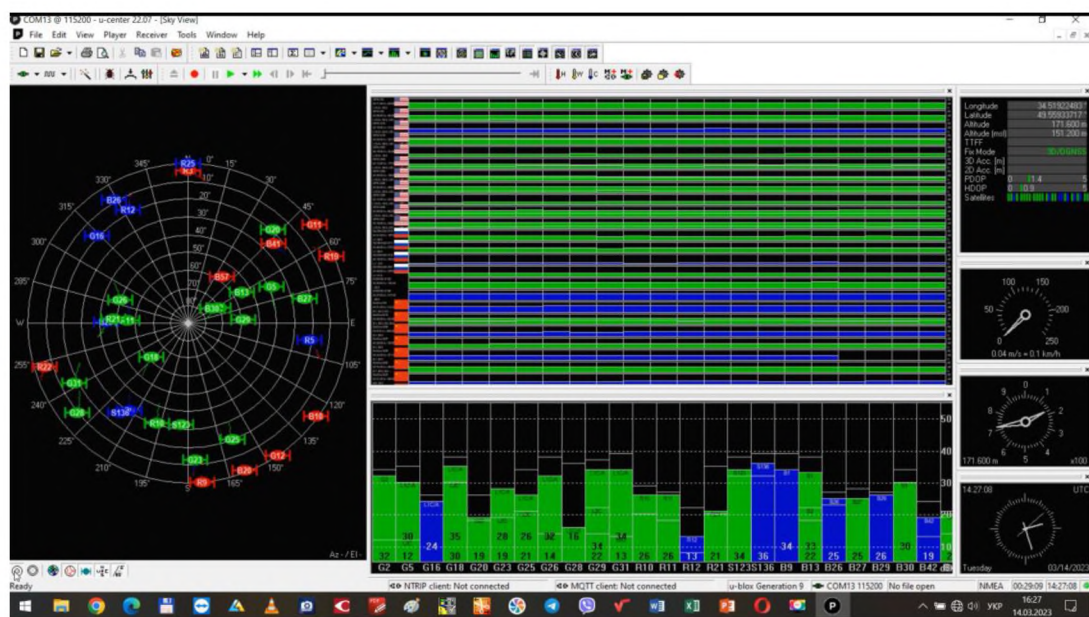


Рисунок 3.3 – Результат підключення модуля ZED-F9P з активною антеною

Ви повинні почати бачити, як все змінюється, і дані надходять. Як наслідок, ZED-F9P працює протягом кількох хвилин, отримує купу супутників і досягає 0,9 м горизонтальної точності. Надалі відкриємо вікно Messages і налаштуємо модуль (рис. A.11). По-перше, закрийте гілку NMEA, щоб усунути її. Відкрийте гілку UBX, а потім гілку конфігурації CFG початку кількість параметрів конфігурації може бути надмірною, але з часом вони можуть стати дуже корисними. Шукаємо MSG. Дані корекції, або RTCM, відрізняються за розміром, але становлять приблизно від 1 до 2 кБ/с. Трафік маленький, але достатньо великий, щоб LoRa та менші пакетні радіостанції не змогли з цим впоратися. Тому рекомендується використовувати радіомодулі для телеметрії, наприклад, працюючи на частоті 915 МГц, ці радіоприймачі можуть забезпечити приблизно 300 м при 100 мВт (з доступною опцією 2 км/500 мВт). Радіоприймачі працюють як прозорий серійний канал зі швидкістю 57600 біт/с. У вікні повідомлень u-center треба увімкнути наступні повідомлення для UART2 і USB: RTCM3.3 1005; RTCM3.3 1074; RTCM3.3 1084; RTCM3.3 1094; RTCM3.3 1124; RTCM3.3 1230×5 (увімкнути повідомлення кожні 5 секунд). Під час налаштування кожного параметра потрібно буде натиснути кнопку «Надіслати». Не завадить натиснути кнопку «Опитування», щоб переконатися, що налаштування застрягло. Також рекомендовано увімкнути ці повідомлення як для USB, так і для UART2. Це вказує модулю розпочати передачу лише цих повідомлень RTCM (типів повідомлень), коли модуль завершить опитування. UART2 найкраще використовувати для надсилання послідовного входу/виходу RTCM. USB увімкнено, щоб могли бачити та перевіряти, що повідомлення RTCM дійсно виводяться модулем (рис. A.12). Далі встановлюємо для UART2 відповідну швидкість передачі даних. Прокручуємо униз до «PRT» або параметрів порту. Виберіть UART2. За замовчуванням це 38400 біт/с, а радіостанції очікують 57600 біт/с. Збільшуємо швидкість (не забуваємо натиснути «Надіслати») – рис. A.13. Тепер прокручуємо до опції CFG або конфігурації. Це меню дозволяє зберегти поточні налаштування. Коли Ви

знову підключите свій модуль, Вам не доведеться повторно виконувати всі ці налаштування. BBR – це оперативна пам'ять, що живиться від акумулятора. На деяких платах ZED-F9P є невелика батарея, яка повинна підтримувати налаштування більше тижня. Налаштування флеш-пам'яті також записує параметри у флеш-пам'ять, тому, якщо батарея втрачає заряд, флеш-пам'ять збереже налаштування (також називається енергонезалежною пам'яттю або NVM). Останнє, що потрібно зробити, це розпочати опитування. Перейдіть до меню TMODE3 (рис. А.14), встановіть режим «1 – Survey-In» (рис. А.15), встановіть час спостереження на 60 секунд і необхідну точність на 5 метрів. Це налаштування, які рекомендує u-blox. Натисніть «Надіслати» та сядьте зручніше. Модулю може знадобитися багато хвилин, щоб отримати достатньо виправлень, щоб мати стандартне відхилення менше 5 м. Можете ввести час спостереження та необхідні значення точності, а потім зберегти поточні налаштування в BBR/Flash. Це фактично повідомить вашому модулю перевіряти під час кожного ввімкнення. Це може бути зручно в багатьох польових додатках, де U-center недоступний. Щоб відстежувати статус опитування, треба прокрутити вниз, вийдіть із розділу CFG і увійдіть у розділ NAV. Клацніть правою кнопкою миші на «SVIN» і натисніть «Увімкнути повідомлення». Це вказує модулю надсилати статус цього реєстру щосекунди. Коли модуль отримає 60 с даних і середнє стандартне відхилення менше 5 м, опитування повідомить «Завершено!». Широта/довжина/висота цього модуля більше не змінюватимуться, оскільки це виправлено. Ви можете переконатися, що опитування завершено, перевіривши повідомлення PVT. Якщо тип виправлення – «ЧАС», що базу успішно налаштували (рис. А.16). Крім того, можна переглядати повідомлення RTCM. Відкрийте консоль пакетів (рис. А.17). Якщо повідомлення RTCM увімкнено та опитування завершено, ми повинні побачити повідомлення RTCM, що прокручуються. Повідомлення RTCM не є видимими ASCII, як повідомлення NMEA, це закодовані байти даних. Не можете «побачити» їх у текстовій консолі, але вони відображаються в пакетній консолі. ZED-F9P здатний видавати

фіксовані частоти до 30 Гц. База передає значення корекції раз на секунду. Можна збільшити вихідну частоту модуля до 4 або 10 Гц, але оскільки умови між базою та супутниками не змінюються так швидко, це може лише бути надлишковим та забивати радіозв'язок. Надалі варто зберегти конфігурацію, наприклад, як «survey-in-config.txt» і завантажте за допомогою u-center (рис. А.18). Після завантаження конфігурації обов'язково запишіть її на BBR/Flash. Далі налаштування Rover. Припустимо, що є стаціонарна базова станція, або як тимчасова база, або з координатами ECEF (відстань від центру землі). U-blox має кілька хороших документів про те, як налаштувати ZED-F9P у режимі Rover і це досить легко (рис. А.19). Модулю Rover просто потрібно надіслати поправки RTCM, і він увійде в режим RTK Float, а вже потім у режим RTK Fix. Відкрийте U-center і підключаємось до модуля Rover. Кілька екземплярів U-center можна запустити, якщо до одного ПК підключено кілька модулів. Переходимо до повідомлення CFG/PRT і налаштовуємо UART2 на 57600 біт/с, щоб відповідати базі та радіокомплекту телеметрії, який будемо використовувати, та зберігаємо конфігурацію (рис. А.20). Якщо виникнуть проблеми з конфігурацією модуля, можна вибрати «Повернутися до конфігурації за замовчуванням» і натиснути «Надіслати». Це повинно добре промити ваш модуль, повернувши його. Ця команда скине налаштування до заводських налаштувань за замовчуванням, а також BBR/Flash. Надалі вмикаємо Rover і Base. Якщо зелений світлодіодний індикатор на радіостанціях переходить з блимання на постійний, що вказує на те, що радіостанції виявляють одна одну та передають послідовні дані між собою. Миготливий червоний світлодіод на радіо вказує на передачу послідовних даних. Це означає, що модуль Rover тепер готовий до роботи. Рекомендується мати під рукою U-center, щоб переглядати стан Rover, коли він отримує поправки RTCM. Коли Rover отримує RTCM, він швидко переходить від фіксації 3D до RTK Float і RTK Fix. Є кілька повідомлень, які слід переглянути, поки Rover досягне RTK Fix (рис. А.21). NAV/HPPOSECEF покаже загальну позиційну точність, NAV/HPPOSLLH покаже горизонтальну

точність. NAV/PVT показуватиме тип виправлення під час переходу від 3D до RTK Float і RTK Fixed.

В ході проведених досліджень було виявлено наступні положення. При некоректних налаштуваннях GNSS RTK Fixed режим вмикається рідко та швидко зникає. Треба активувати RTCM3, пакети MSM4 або класу MSM7. Якщо передавати поправки MSM4 і MSM7 впереміш, то RTK Fixed буде нестабільним або взагалі не включиться. У налаштуваннях Rover використовуємо або Set1 або Set2 (рис. 3.4). У налаштуваннях бази слід прописати колонку Set3. Далі при надійному трансфері RTCM3 пакетів FTK Fixed режим повинен увімкнутися сам.

	rover	rover	base	Set	Set			
Dir	Variant set1	Variant set2	set3	MSM4	MSM7	constellation	Message	Description (Type)
io	1		1	1		GPS	1074	GPS MSM4 (Input/output)
io	1		1	1		GLONASS	1084	GLONASS MSM4 (Input/output)
io	1		1			GLONASS	1230	GLONASS L1 and L2 code-phase biases (Input/output)
io	1		1	1		Galileo	1094	Galileo MSM4 (Input/output)
io	1		1	1		BeiDou	1124	BeiDou MSM4 (Input/output)
io	1		1				1005	Stationary RTK reference station ARP (Input/output)
in		1					1006	Stationary RTK reference station ARP with antenna height (Input)
in		1					1033	Receiver and Antenna Description
io		1			1	GPS	1077	GPS MSM7 (Input/output)
io		1			1	GLONASS	1087	GLONASS MSM7 (Input/output)
io		1			1	Galileo	1097	Galileo MSM7 (Input/output)
io		1			1	BeiDou	1127	BeiDou MSM7 (Input/output)

Рисунок 3.4 – Вибір конфігурації ZED-F9P

При налаштуванні Base треба, щоб вона сама обчислила свої координати (режим Survey-In). Так, там є можливість прописати жорстко відомі GNSS координати. Хай краще базова станція сама визначить свої координати. Це зазвичай займає близько кількох хвилин. У режимі підвищеної точності Rover знаходиться у режимі RTK Fixed. Base у режимі TIME. Поправки надсилаються лише в одному напрямку, від Base до Rover (симплексний режим). Rover на Bas нічого не шле. Проте потрібна гарантована доставка. Тому Rover повинен посилати підтвердження, що прийняв потік даних безперервно. Для транспорту підходить протокол TCP.

Для перевірки працездатності запропонованого підходу необхідно отримати трек GNSS координат, наприклад, використовуючи «карусель».

Варіант перевірки наведено на рис. 3.5. При стабільному потоці пакетів RTCM3 з поправками точність 2,5 см дуже досяжна при GNSS RTK навігації.

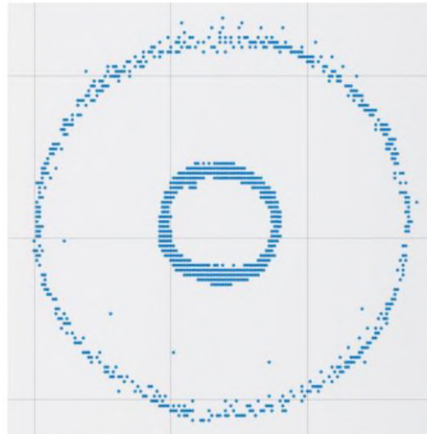


Рисунок 3.5 – Трек GNSS координат ZED-F9P у режимі RTK Fixed

Дуже важлива безперервність надходження пакетів RTCM3. RTK Fixed режим дуже чутливий до зникнення поправок, які надходять LoRa радіоканалу. Щоб підвищити точність позиціювання можливо використати служби корекції NTRIP в рамках існуючих в Україні мереж RTK (див. п. 1.3).

3.4. Інтеграція безекіпажних платформ і екосистеми інтернет речей

Для впровадження системи високоточної навігації доцільно орієнтуватись на підключення до мікроконтролерів та мікрокомп'ютерів [44, 45]. В якості першого варіанту можна розглядати платформу Arduino (Додаток Б). Для неї можна використовувати бібліотеку SparkFun u-blox GNSS Arduino, яка призначена для зв'язку I2C, Serial та SPI з модулями GNSS u-blox. Вона підтримує повний спектр модулів GNSS u-blox (в тому числі і ZED-F9P), використовуючи протоколи NMEA та UBX через I2C, Serial та SPI. Також вона підтримує служби RTK NTRIP Caster, а саме, RTK2go, Emlid Caster і Skylark. Ця бібліотека містить функції, зворотні виклики та перевірені приклади, які дозволяють безперешкодно передавати дані корекції RTCM на модуль GNSS Rover. Більш детально варто розглянути підключення модулів

до мікрокомп'ютерів Raspberry Pi. Для цього на Raspberry Pi налаштовується UART для зв'язку з simpleRTK2B. На терміналі запускається `sudo raspi-config` (рис. А.22). Вибираємо 5-ий параметр інтерфейсу → P6 Serial, потім «Чи хочете ви, щоб оболонка входу була доступна через послідовний порт?» → «Чи хочете ви, щоб апаратне забезпечення послідовного порту було ввімкнено?». Після перезавантаження проводиться тестування комунікацій (підключіть антена до модулю GNSS, який потім до Raspberry Pi. Вводимо облікові дані і `sudo nano test.py` і код (рис. А.23). Скрипт, який читатиме інформацію з модуля. Конфігурація швидкості передачі дійсна для стандартної конфігурації і може бути змінена за потреби. Натискаємо Ctrl+X і зберігаємо зміни. Ви повинні побачити вхідні повідомлення NMEA (рис. А.24). Також можна виконувати діагностику GNSS на Raspberry Pi. Після цього встановлюються `gpsd`-клієнти (рис. А.25) і монітор – `grsmmon`, і можна побачите стан GPS (рис. А.26). Також можна вибрати полегшену версію монітору (тип `cgps`).

3.5 Техніко-економічне обґрунтування прийнятих рішень

Одним з ключових аспектів реалізації системи високоточної навігації безекіпажних платформ екосистеми інтернет речей є використання багатодіапазонних GNSS модулів. В роботі запропоновано для створення Base (стаціонарна або тимчасова станції RTK, яка здатна виконувати функції сервера NTRIP), і навігаційного обладнання Rover, використовувати однакове обладнання. Наприклад, реалізувати основний функціонал розробленої системи можливо за допомогою наступних складових:

1. Модуль GNSS simpleRTK2B Budget [39] – 15116 грн;
2. Мікроконтролер Arduino UNO R3 (CH340) [46] – 238 грн;
3. Бездротовий модуль NRF24L01+PA+LNA із зовнішньою SMA антеною (Ai-Thinker) [42] – 229 грн;

4. Антена RTK для модулів GPS ZED-F9P [47] – 4000 грн.

Таким чином, з урахуванням Base і Rover, загальна вартість обладнання складає ≈ 39200 грн.

Якщо орієнтуватись на підключення до існуючих RTK-мереж в Україні та, відповідно, реалізацію лише комплекту Rover – 19600 грн. При цьому мінімальна абонентська плата за підключення складає 180 грн на день [20]. Це свідчить про доцільність реалізації власної BASE, яка окупиться максимум за 1 рік. На користь такого підходу свідчить також вартість готового обладнання BASE – H-RTK F9P (к. Holybro) – 22500 грн [48].

Якщо необхідно підвищити точність позиціювання за рахунок використання обладнання що, підтримує діапазон L5 GPS (simpleRTK3B Pro), то вартість необхідного обладнання зросте ≈ 60000 грн.

Висновки до розділу 3

Для розробки системи високоточної навігації безекіпажних платформ екосистеми інтернет речей доцільно використовувати багатодіапазонні модулі GNSS. Кількість підтримуваних діапазонів GNSS відображається на вартості не тільки самого модуля GNSS, але і антен.

В якості базового розглядається модуль simpleRTK2B Budget (к. ArduSimple) на базі ZED-F9P (к. U-blox). Він забезпечує роботу з GPS L1/L2. При оптимальному налаштуванні RTK можна отримати точність 14 мм. Модуль може реалізувати режими Base і Rover.

При використанні ПЗ U-center (к. U-blox) Base надає корегувальні поправки RTCM на навігаційний модель Rover. Для цього може застосовуватись LoRa. Для Base можна прописати конкретні координати, підключити її до існуючої мереж RTK. Сама станція може бути як стаціонарною так і тимчасовою. Для інтеграції безекіпажних платформ і екосистеми інтернет речей в роботі запропоновані варіанти підключення

навігаційних модулів до мікроконтролерів (наприклад, Arduino) та мікрокомп'ютерів (наприклад, Raspberry Pi).

В рамках техніко-економічного обґрунтування прийнятих рішень проаналізовані витрати на реалізацію системи високоточної навігації безекіпажних платформ екосистеми інтернет речей. Зроблений висновок про доцільність реалізації власної BASE, яка окупиться максимум за 1 рік. Якщо необхідно підвищити точність позиціонування за рахунок використання обладнання що, підтримує діапазон L5 GPS, то вартість необхідного обладнання зросте ≈ 60000 грн.

ВИСНОВКИ

Інтенсивний розвиток технологій високоточної навігації стає важливим елементом в численних сучасних. Стандартні GNSS сигнали, які застосовуються для загальних потреб, забезпечують точність розташування в рамках декількох метрів, що може бути неприйнятно для певних застосувань.

Поряд із звичайною навігацією існують також додаткові технології та методи, що включають DGNSS, RTK-корекцію, інтеграцію даних з різних GNSS або частотних діапазонів, а також використання протоколу PPP.

Для точної навігації слід використовувати одну з наявних GNSS: GPS, Beidou, Galileo, NAVIC, QZSS. Попит на вищу точність та зростаючу надійність продуктивності геолокації спричиняє те, що сучасні багаточастотні приймачі стають все ширше застосовуваними.

DGNSS доповнює основні дані за допомогою мережі наземних опорних пунктів, які допомагають слідкувати за передачею диференціальних даних для покращення їхньої точності. Під час навігаційних розрахунків ключовими є виміряні псевдовідстані, на основі яких здійснюються всі наступні розрахунки. Методика виміру цих псевдовідстаней значною мірою залежить від конструкції приймача та його компонентів. Щоб швидше знаходити та отримувати сигнали від супутників, використовуються дані альманаху та ефемериди як довідники. Проведені дослідження свідчать про доцільність використання протоколу NMEA 0183 для передачі навігаційної інформації.

Для розробки системи високоточної навігації безекіпажних платформ екосистеми інтернет речей доцільно використовувати багатодіапазонні модулі GNSS. Кількість підтримуваних діапазонів GNSS відображається на вартості не тільки самого модуля GNSS, але і антен. В якості базового розглядається модуль на основі ZED-F9P. Він забезпечує роботу з GPS L1/L2. При оптимальному налаштуванні RTK можна отримати точність 14 мм. Модуль може реалізувати режими Base і Rover.

При використанні ПЗ U-center (к. U-blox) Base надає корегувальні поправки RTCM на навігаційний модель Rover. Для цього може застосовуватись LoRa. Для Base можна прописати конкретні координати, підключити її до існуючої мереж RTK. Сама станція може бути як стаціонарною так і тимчасвою.

Для інтеграції безекіпажних платформ і екосистеми інтернет речей в роботі запропоновані варіанти підключення навігаційних модулів до мікроконтролерів (наприклад, Arduino) та мікрокомп'ютерів (наприклад, Raspberry Pi).

В рамках техніко-економічного обґрунтування прийнятих рішень проаналізовані витрати на реалізацію системи високоточної навігації безекіпажних платформ екосистеми інтернет речей. Зроблений висновок про доцільність реалізації власної BASE, яка окупиться максимум за 1 рік. Якщо необхідно підвищити точність позиціювання за рахунок використання обладнання що, підтримує діапазон L5 GPS, то вартість необхідного обладнання зросте ≈ 60000 грн.

Таким чином, результатами роботи є система високоточної навігації безекіпажних платформ; методика контролю її точності; пропозиції щодо інтеграції безекіпажних платформ і екосистеми інтернет речей. Вони можуть бути використані для подальших досліджень за даною тематикою та при реалізації концепції інтернет речей.