

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУПУТНИКОВИХ
НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи РТДМ-61
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Кирильчук П.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Гетманець О.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Лавринець К.Г.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Макаренко А.О.

(прізвище та ініціали)

Київ – 2021

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних систем

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
«Мобільних та відеоінформаційних
систем»

Н.В. Руденко

« » _____ 2021 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кирильчуку Павлу Володимировичу

1. Тема роботи: “Методика підвищення ефективності експлуатаційних характеристик супутникових навігаційних систем”,
керівник роботи Гетманець Олексій Володимирович, к.т.н.,
затверджені наказом вищого навчального закладу від 11.10.2021 № 170
2. Строк подання студентом роботи _____ 2021 р.
3. Вихідні дані до роботи:
 1. Супутникові системи навігації GPS та ГЛОНАСС.
 2. Науково-технічна література
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
 1. Види та принципи роботи супутникових навігаційних систем .
 2. Характеристики навігаційних систем.
 3. Методи підвищення точності місцезрешування.

5. Графічна частина роботи представлена на 9 слайдах презентації.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	11.10	
2.	Дослідження видів супутникових навігаційних систем	15.10	
3.	Розбір, дослідження та опис характеристик супутникових навігаційних систем.	05.11	
4.	Аналіз та дослідження методів підвищення точності місцезрештування.	01.12	
5.	Висновки, вступ, реферат	02.12	
6.	Розробка презентації	05.12	

Студент

Кирильчук П.В.

(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Гетманець О.В.

(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 75 стор., 22 рис., 8 табл., 20 джерел.

Об'єкт дослідження – супутникові навігаційні системи.

Предмет дослідження - експлуатаційні характеристики супутникових навігаційних систем.

Мета роботи – дослідження та аналіз методик підвищення експлуатаційних характеристик супутникових навігаційних систем.

Методи дослідження – аналітичний, теорії теоретичної радіотехніки, технології побудови супутникових навігаційних систем.

В магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто супутникові навігаційні системи, їх види, будову, особливості та характеристики. Наведено структуру навігаційних повідомлень, аналіз методів підвищення точності місцерозташування за допомогою фільтрації навігаційних даних.

НАВИГАЦІЙНІ СИСТЕМИ, GPS, КОСМІЧНИЙ СЕГМЕНТ, ГЛОНАСС, ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ДОСТУПНІСТЬ СУПУТНИКОВОГО СИГНАЛУ, ОЦІНКА МІСЦЕВИЗНАЧЕННЯ, ANDROID, БЛОКОВО-ЧАСОВИЙ АЛГОРИТМ ФІЛЬТРАЦІЇ ГЕОЛОКАЦІЙНИХ ДАНИХ, АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ ОБРОБКИ ПОТОКУ НАВИГАЦІЙНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ДІАГНОСТИЧНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ, ФІЛЬТР КАЛМАНА.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ	
12	
1.1 Супутникова радіонавігаційна система GPS.....	13
1.1.1 Історія створення системи GPS	13
1.1.2 Призначення, загальна характеристика і склад системи	14
1.2 Супутникова радіонавігаційна система ГЛОНАСС.....	16
1.2.1 Історія створення системи ГЛОНАСС	16
1.2.2 Призначення, загальна характеристика і склад системи	17
1.3 Космічний сегмент, Сегмент користувачів системи та наземний комплекс управління систем GPS та ГЛОНАСС	19
1.4 Альтернативний спосіб організації системи навігації	25
1.4.1 Розгляд можливих альтернатив	25
1.4.2 Типи дирижаблів.....	26
1.4.3 Аналіз експлуатаційних характеристик дирижабля.....	27
1.4.4 Аналіз альтернативної навігаційної системи	29
1.5 Структура навігаційних радіосигналів	31
2 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ	
37	
2.1 Вимірювані навігаційні параметри і їх геометричні властивості	37
2.2 Корекція навігаційних параметрів	39
2.3 Обробка сигналів GPS-приймачем та визначення доступності супутникового сигналу	40
2.4 Принципи навігаційних визначень.....	41
2.5 Точнісні характеристики	43
2.6 Джерела отримання навігаційних даних	47
2.7 Основні та додаткові джерела отримання навігаційних даних.....	48

2.8	Огляд існуючих методів фільтрації даних	50
2.8.1	Адаптивний алгоритм обробки потоку навігаційних даних на основі методу діагностичної фільтрації.....	52
2.8.2	Блоково-часовий алгоритм фільтрації геолокаційних даних	53
2.8.3	Метод швидкої фільтрації потоку даних.....	55
2.8.4	Фільтр Калмана	59
3	ВПЛИВ ЗАСТОСУВАННЯ ФІЛЬТРУ КАЛМАНА НА ТОЧІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ...	62
3.1	Передумови до застосування	62
3.2	Застосування фільтру Калмана до побудованої моделі.....	65
3.3	Оцінка точності характеристик супутникових радіонавігаційних систем .	67
	ВИСНОВКИ.....	72
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	74
	ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- GNSS - від англ. global navigation satellite system
- GPS – від англ. Global Positioning System
- ГЛОНАСС – Глобальна навігаційна супутникова система
- СРНС – Супутникові радіонавігаційні системи
- NMEA – від англ. National Marine Electronics Association
- C/A-код – від англ. Coarse/Acquisition
- GMT – від англ. Greenwich Mean Time
- UTC - від англ. Coordinated Universal Time
- WGS-84 – від англ. World Geodetic System 1984
- ECEF – від англ. Earth centered & earth fixed
- ШСЗ – Штучний супутник Землі
- НКА – Навігаційний космічний апарат
- АК – Апаратура користувача
- РО – рухомий об’єкт

ВСТУП

З самого початку супутникові навігаційні системи були розроблені для військових цілей - визначення місця розташування різних мобільних об'єктів. У міру вдосконалення цієї системи і способу роботи також розширилися масштаби: від навігації цивільних суден (які не належать військовим відомствам) до створення високоточних геодезичних карт. В даний час визначення місця розташування за допомогою супутникових навігаційних систем настільки спрощено, що власники приватних автомобілів можуть використовувати його в якості протиугінного захисту.

Система спроможна задовольнити точність, безперервність, глобальність, високу доступність і ряд інших вимог. Точне визначення координат і часу є найбільш нагальним завданням для широкого спектру наукових і технічних застосувань. До них відносяться геодезія, геодинаміка, картографія, геодезична і Аерофотозйомка, Авіація, навігація на морських і річкових судах, навігація в наземному транспорті та інші області. До кінця минулого століття були створені дві такі системи. Це американська система глобального позиціонування (GPS) - система глобального позиціонування (або позиціонування) і російська навігаційна супутникова система GLOBAL (ГЛОНАСС). Основне завдання таких систем - визначити координати і час. Крім своєї безпосередньої мети, ці системи служать вирішенню наукових проблем. Це дозволило вивчити геодинамічні процеси в глобальному масштабі.

Для вирішення цих та багатьох інших проблем використовуються різні типи приймачів. Якими б різними не були додатки GPS, у всіх них є одна спільна риса: необхідність точного визначення координат. Слід зазначити, що помилки, що призводять до неточностей у визначенні позиції при вирішенні різних завдань, багато в чому однакові. Однак методи, які їх виправляють, часто сильно розрізняються. Це в основному пов'язано з тим, що у нас різні вимоги до точності і умов, в яких також важливу роль відіграють позиціонування, якість і висота приймача. Можливості навігаційних систем будуть розширені за рахунок

модернізації. Однак для модернізації необхідно намітити цілі поліпшення, тобто те, як працюють ці системи, і фактори, що впливають на їх роботу. Це показує актуальність моєї роботи, оскільки вона була присвячена аналізу характеристик супутникових навігаційних систем і впливу різних факторів на їх роботу.

Метою даної роботи є дослідження та аналіз методик підвищення експлуатаційних характеристик супутникових навігаційних систем.

Досягнення цієї мети потребувало постановки і вирішення наступного комплексу завдань:

- ознайомлення та розгляд принципів роботи двох найпоширеніших систем супутникової навігації;
- аналіз основних характеристик супутникової навігаційної системи;
- аналіз методів підвищення точності місцезоташування за допомогою фільтрації навігаційних даних

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Супутникова система навігації (GNSS. global navigation satellite system)[1] - комплексна електронно-технічна система, яка складається з сукупності наземного та космічного обладнання і призначена для позиціонування та визначення параметрів руху (швидкості, напрямку руху, тощо). Місцерозташування визначається трьома координатами в системі координат. Зазвичай використовують систему координат ECEF (Earth centered & earth fixed, декартова система координат з початком в точці центру масі Земної кулі) та WGS84 (World Geodetic System 1984, сферична система координат з початком в точці центру мас Земної кулі).

Супутникова система навігації включає в себе орбітальне угруповання, яке складається від 2 до 30 супутників, які випромінюють радіосигнали, наземну систему управління, клієнтське приймальне обладнання, систем для передачі користувачам координат і годинників супутників. також можливе використання систем наземних станцій, які дозволяють підвищити точність визначення координаті.

Місцерозташування приймача в супутниковій навігаційній системі розраховується по перетину сфер різних супутників. Радіуси цих сфер неточно визначаються через іоносферної і тропосферної затримки, релятивістського ефекту, ефекту відбитого сигналу, тощо. Без будь-яких виправлень точність визначення місцерозташування складає 30-50 метрів.

На даний час існує кілька супутникових систем навігації:

- GPS (Global positioning system)[2] - супутникова навігаційна система, яка належить Міністерству оборони США. GPS дозволяє в будь-якому місці Землі (за винятком приполярних областей), практично в будь-яку погоду, визначити місце розташування і швидкість об'єктів. За використання системи GPS плата за підписку або підключення системи не потрібне. Щоб використовувати систему GPS, все, що вам потрібно зробити, це купити GPS-приймач.

- ГЛОНАСС (Глобальна навігаційна супутникова система)[3] - система супутникової навігації, належить Міністерству оборони Росії. Одна з двох повністю функціонуючих систем. Для використання ГЛОНАСС, також як і для використання GPS досить наявності призначеного для користувача приймача. ГЛОНАСС в полярних регіонах працює краще, ніж GPS.

- Бейдоу - китайська система супутникової навігації, знаходиться на стадії запуску супутників. Особливість - невелика кількість супутників, що знаходяться на геостаціонарній орбіті.

- GALILEO - система супутникової навігації Європейського Союзу, що знаходиться на етапі створення супутникового угруповання.

Нижче ми розглянемо найбільш широко використовувані супутникові радіонавігаційні системи, а саме GPS і ГЛОНАСС.

1.1 Супутникова радіонавігаційна система GPS

1.1.1 Історія створення системи GPS

Ідеї використання космічних апаратів для навігації рухомих об'єктів в США, почали розвиватися після запуску в СРСР в 1957 році першого штучного супутника Землі. У той час лабораторії прикладної фізики Університету Джона Гопкінса було доручено відстежувати радянський супутник, отримуючи його сигнал на наземній станції з відомими координатами, вибираючи доплерівський зсув несучої частоти носія, а потім обчислюючи параметри руху супутника. Зворотна задача розрахунку координат приймача на основі обробки прийнятого сигналу і координат ШСЗ була очевидною і природною.[4]

На цій основі в інтересах навігаційного забезпечення для запуску підводних човнів з балістичними ракетами "Поляріс" в 1964 році була створена доплерівська супутникова радіонавігаційна система (SRS) Transit першого покоління, творцем якої вважається професор Р. Кершнер. Для комерційного використання ця система була введена в 1967 році, і число цивільних споживачів незабаром значно

перевищило число військових.

В 1973 році програми ВМС і ВПС США були об'єднані в загальну Навігаційну технологічну програму, пізніше перетворену в програму "Навстар-GPS"; супутник TIMATION-III був переобладнаний в космічний апарат NTS-1, запущений 14 липня 1974 з кварцовим і рубідієвим стандартами частоти; за ним послідувало створення КА NTS-2 і NTS-3 відповідно з цезієвим і водневим стандартами. Протягом цього періоду часу точність синхронізації зросла з E-11 до E-12...E-13 і вище, зросла також і висота орбіт супутників (з 925 км до 13000 і потім 20000 км), змінилася несуча частота передавачів (з 400 МГц до 1227 і 1575 МГц).

Протягом першого етапу програми Навстар проводилась оцінка загальної концепції, були розроблені НКА Блок-І. Другий етап повномасштабної розробки і випробувань розпочався в 1978 р. з запуску перших 4-х НКА . В 1995р. система була практично розгорнутою.

За цей час близько 60 підприємств створили понад 400 видів приймальних пристроїв для споживачів різного призначення, які сьогодні використовується не тільки для військових, а й для різних цивільних завдань, включаючи будівництво та сільське господарство.

1.1.2 Призначення, загальна характеристика і склад системи

Глобальна супутникова система GPS призначена для високоточного визначення трьох координат місця, складових вектора швидкості і часу різних рухомих об'єктів.

Система розроблена на замовлення і знаходиться під управлінням МО (ВПС) США. США надають систему в стандартному режимі для цивільного, комерційного та наукового використання без стягування за це спеціальної плати. Визначено, що за використання системи цивільними споживачами відповідальність несе Міністерство транспорту США[8].

Відповідно за Інтерфейсним контрольним документом GPS (ICD-200C-002,

23.09.97), основними розробниками і творцями (contractors) системи є:

- за космічним сегментом - Rockwell International Space System Division (Блок I / I / ІА / ІВ), Martin Marietta Astro Space Division (Блок-ІІR);
- за сегментом управління - IBM, Federal Systems Company;
- за сегментом споживачів - Rockwell International, Collins Avionics & Communication Division.

Документом, що встановлює взаємовідносини споживачів з системою, є інтерфейсний контрольний документ GPS, за поширення якого несе відповідальність корпорація ARINC.

Система GPS складається з космічного сегмента, сегмента управління (наземний командно-вимірювальний комплекс) і сегмента споживачів (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Система GPS

1.2 Супутникова радіонавігаційна система ГЛОНАСС

1.2.1 Історія створення системи ГЛОНАСС

Розвиток супутникової радіонавігаційної системи (СРНС) ГЛОНАСС має вже практично 65-річну історію, початок якої покладено, як найчастіше вважають, запуском 4 жовтня 1957 року в Радянському Союзі першого в історії людства штучного супутника Землі. Вимірювання доплерівського зсуву частоти передавача цього ШСЗ на пункті спостереження з відомими координатами дозволили визначати пара метри руху цього супутника.[20]

Зворотна задача була очевидною: за вимірами того ж доплерівського зсуву при відомих координатах ШСЗ визначити координати пункту спостереження.

Повномасштабні роботи зі створення навігаційної супутникової системи були розгорнуті в середині 60-х років. а 27.11.1967 року був виведений на орбіту перший навігаційний радянський супутник ("Космос-192").

Однією з основних проблем при створенні супутникової системи, яка забезпечує безперервне навігаційне визначення одночасно на декількох супутниках, є проблема взаємної синхронізації шкал супутникового часу до наносекунд, оскільки десинхронізація супутникових сигналів, випромінюваних супутниками за 10 нс, викликає додаткову похибку визначення місцерозташування до 10-15м.

Рішення задачі високоточної синхронізації бортових шкал[20] часу потребує установки на супутниках високостабільних бортових цезієвих стандартів частоти з відносною нестабільністю $1 \cdot 10^{-13}$ і наземного водневого стандарту з відносною нестабільністю $1 \cdot 10^{-14}$, а також створення наземних засобів звірення шкал з похибкою 3-5 нс. Другою проблемою створення високоорбітальної навігаційної системи є високоточне визначення і прогнозування параметрів орбіт навігаційних супутників.

У 1995 році було завершено розгортання СРНС ГЛОНАСС до її штатного складу (24 КА)[5].

Основним замовником і відповідальним за випробування і управління системою є військово-космічні сили (ВКС) РФ (зараз ракетні війська стратегічного призначення, РВСН).

1.2.2 Призначення, загальна характеристика і склад системи

Основне призначення ГЛОНАСС - глобальна оперативна навігація по об'єктах, що рухаються на поверхні: землі(суші, морю, повітря) і космічному простору з низькою орбітою. Термін "Глобальна Оперативна навігація" означає, що рухомий об'єкт, оснащений споживчим навігаційним обладнанням (NAP), може в будь-який момент визначити параметри свого руху в поверхневому просторі - три координати і три компоненти вектора швидкості..

ГЛОНАСС використовує навігаційні космічні апарати на кругових геоцентричних орбітах на висоті 20 000 км над поверхнею Землі. Завдяки використанню стандартів ядерної частоти в бортових стандартах часу і частоти НКА, система забезпечує взаємну синхронізацію навігаційних радіосигналів, випромінюваних орбітальною групою НКА. У НАП на рухомому об'єкті в сеансі навігації радіосигнали отримують не менше чотирьох НКА і використовуються для вимірювання принаймні чотирьох відповідних псевдодальностей і радіальних псевдошвидкостей. Результати вимірювань і інформація про ефемериди, отримані кожним НСА, дозволяють визначити або уточнити три координати і три компоненти вектора швидкості рухомого об'єкта, а також визначити зміщення тимчасової шкали об'єкта щодо тимчасової шкали системи. У NRC кількість споживачів не обмежена, тому що NAP не відправляє радіосигнали в НСА, а тільки приймає.[20]

Супутникова радіонавігаційна система ГЛОНАСС окрім навігації приземних рухомих об'єктів дозволяє проводити :

- локальну високоточну навігацію наземних рухомих об'єктів (сухопутних, морських, повітряних) на основі диференціальних методів навігації із застосуванням стаціонарних наземних коригувальних станцій і НКА;

- високоточну взаємну геодезичну "прив'язку" віддалених наземних об'єктів;
- взаємну синхронізацію стандартів частоти і часу на віддалених наземних об'єктах;
- неоперативну автономну навігацію низько- і середньоорбітальних космічних об'єктів.

СРНС ГЛОНАСС включає в себе три сегменти: космічний сегмент з орбітальним угрупованням НКА; сегмент управління - наземний комплекс управління (ПКУ) орбітальним угрупованням НКА; сегмент НАП - апаратури користувачів (рис. 1.2).

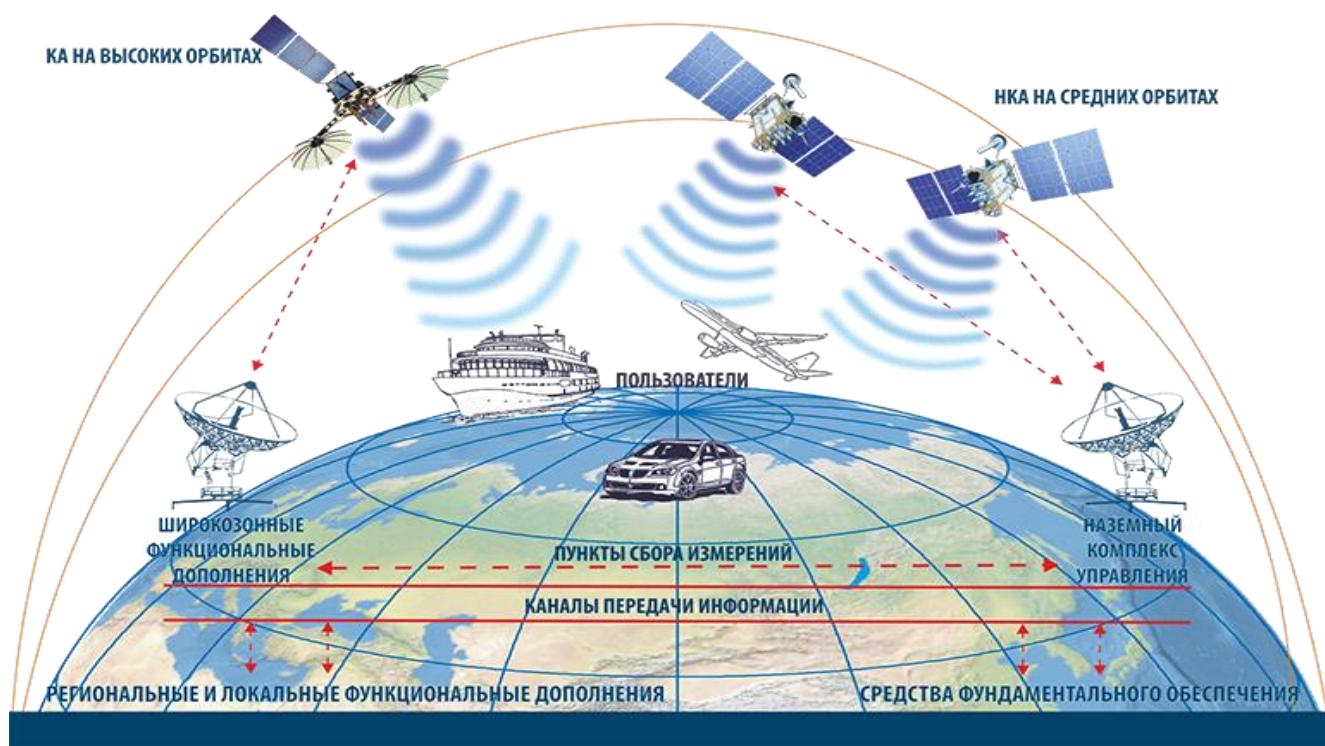


Рис. 1.2. Система ГЛОНАСС

1.3 Космічний сегмент, Сегмент користувачів системи та наземний комплекс управління систем GPS та ГЛОНАСС

Космічний сегмент системи GPS утворений орбітальним угрупованням, яка номінально складається з 24 основних НКА і 3-х резервних НКА. НКА знаходяться на 6 кругових орбітах висотою приблизно 20000 км, нахиленням 55° і рівномірно рознесених по довготі через 60° . Схематично розміщення НКА на орбітах на 19.01.1999 р. проілюстровано на рис. 1.3.[20]

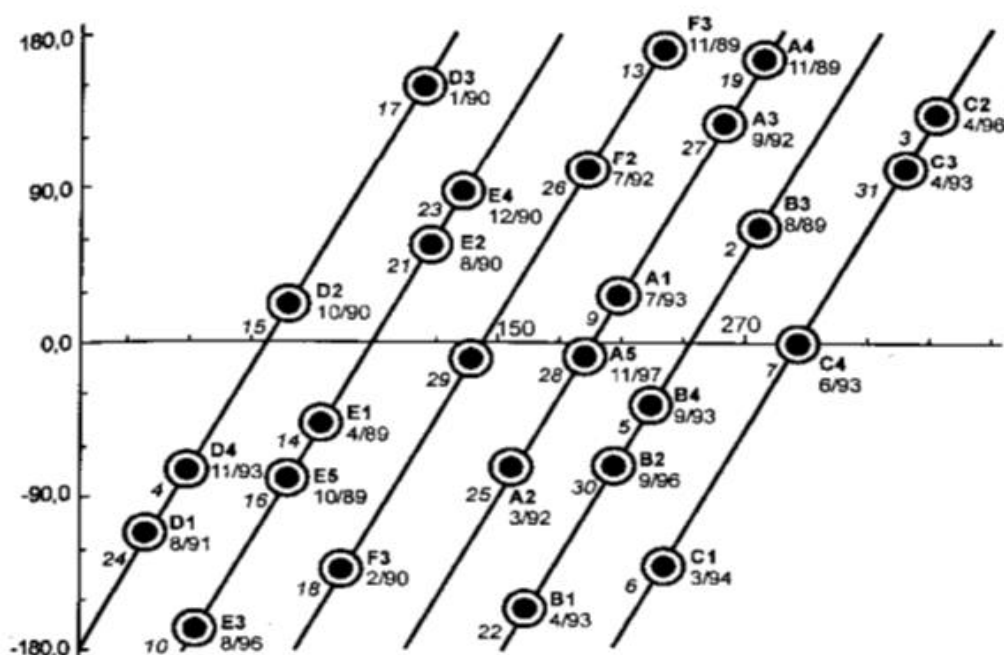


Рис. 1.3. Розміщення НКА GPS на орбітах

Повне орбітальне угруповання в ГЛОНАСС містить 24 штатних НКА на кругових орбітах з нахилом $i=64,8^\circ$ в трьох орбітальних площинах по вісім НКА в кожній. Довготи висхідних вузлів трьох орбітальних площин розрізняються номінально на 120° . Номінальний період обертання НКА дорівнює $E=11$ год 15 хв 44 с і відповідно, номінальна висота кругової орбіти становить 19100 км над поверхнею Землі. У кожній орбітальній площині вісім НКА рознесені по аргументу широти номінально через 45° , і аргументи широти восьми ка в трьох орбітальних площинах зрушені на 15° . За час експлуатації НКА на орбіті (до п'яти

років) реальні положення НКА в орбітальному угрупованні можуть відрізнятися від номінальних не більше ніж на $\pm 5^\circ$. [20]

Для порівняння відзначимо, що повна ОГ в системі GPS містить 24 штатних НКА рис 1.4 на кругових синхронних орбітах з періодом обертання $T=12$ год 00 хв (висота орбіти становить близько 20000 км над поверхнею землі) в шести орбітальних площинах (по чотири НКА в кожній) з нахилом $i=55^\circ$, а довготи висхідних вузлів яких зміщені з інтервалом 60° .

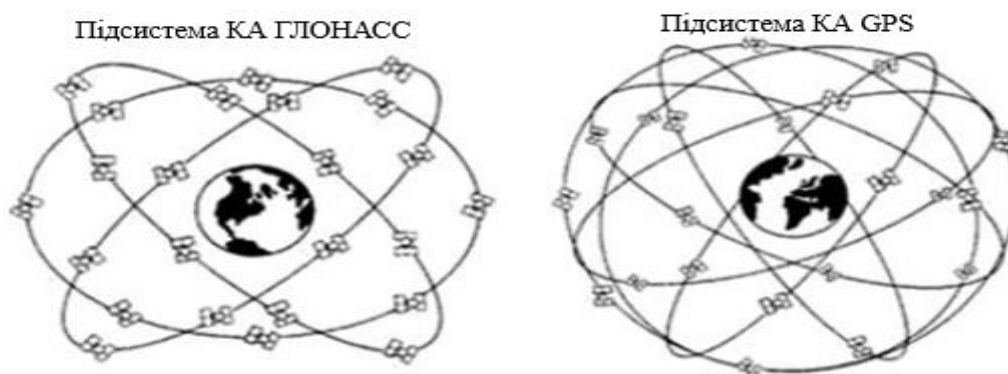


Рис. 1.4. Орбітальні угруповання ГЛОНАСС та GPS

Орбітальне угруповання НКА з несинхронними круговими орбітами ($T=11$ год 16 хв) в системі ГЛОНАСС більш стабільна в порівнянні з орбітальним угрупованням НКА з синхронними круговими орбітами ($T=12$ год 00 хв) в системі GPS. Дана обставина можна пояснити наступним чином. Синхронна орбіта НКА має двохвитковий слід на поверхні Землі, і збурення орбіт окремих НКА, обумовлені нецентральністю поля тяжіння Землі, будуть помітно відрізнятися. Несинхронна кругова орбіта має багатовитковий слід на поверхні Землі, і збурення орбіт для всіх НКА в орбітальному угрупованні будуть практично однакові. Орбітальна побудова ГЛОНАСС схематично проілюстрована на рис. 1.5. [20]

Основу НКА ГЛОНАСС становить циліндричний термобатейер діаметром 1,350 м, в якому розміщуються службові системи і спеціальна апаратура. Живлення всіх підсистем проводиться від сонячних батарей, ширина яких в розкритому вигляді становить 7,230 м. загальна маса становить 1415 кг.

При цьому маса конструкції дорівнює всього 237 кг[5].

У число систем НКА входять: бортовий навігаційний передавач, хронізатор (годинник), керуючий комплекс, засоби заправки і забезпечення параметрів середовища в гермоконтейнері; системи орієнтації, стабілізації, корекції, електроживлення і терморегулювання; елементи конструкції і кабельна мережа.

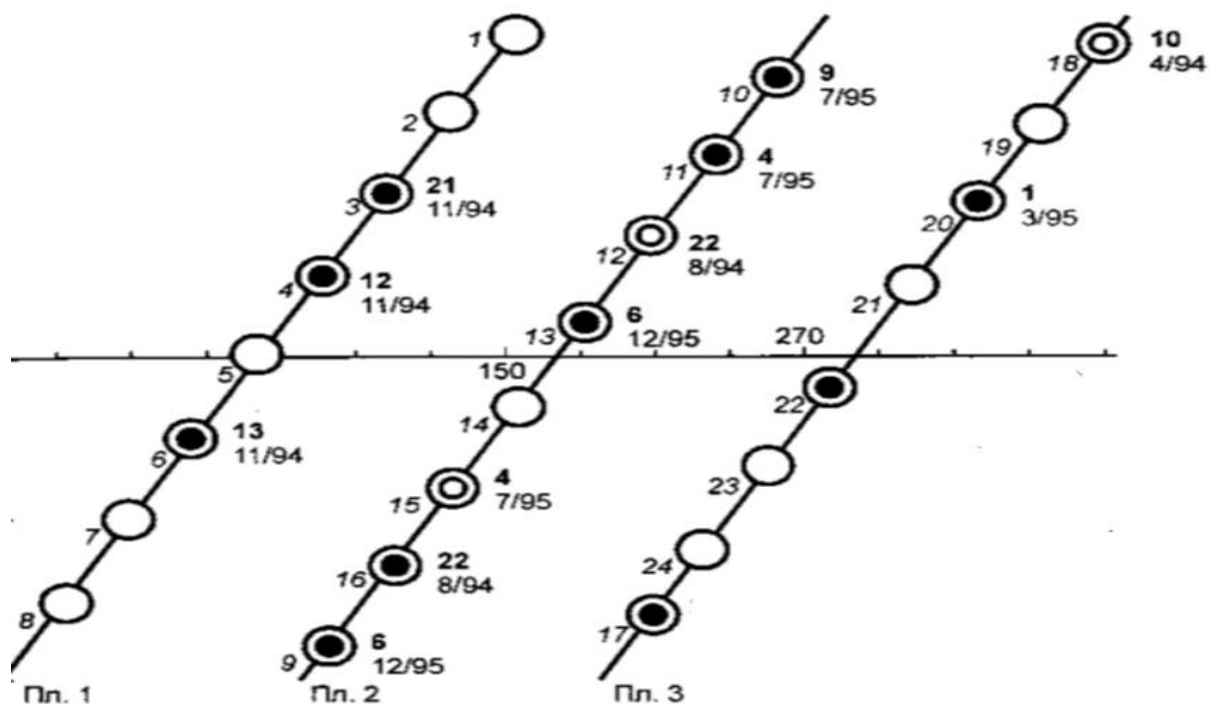


Рис. 1.5. Розміщення НКА ГЛОНАСС на орбітах

Сегмент управління СНС GPS складається з мережі наземних станцій стеження, розташованих по світу. Мережа включає головну станцію (ГС), контрольні станції (КС) або станції стеження (СС) і земні станції введення даних на НКА. Головна станція контролю і управління знаходиться на авіабазі Фалкон ВПС США в районі м. Колорадо-Спрінгс, штат Колорадо. В даний час КС розміщені на атолі Дієго-Гарсія (архіпелаг Чагос в Індійському океані), на о.Вознесіння (в Атлантичному океані), на Гаваях і атолі Кваджалейн (в Тихому океані); одна КС поєднана з ГС. КС розташовані порівняно рівномірно по земній кулі поблизу екватора, що створює сприятливі умови для спостережень НКА. Ці станції приймають сигнали супутників GPS і здійснюють спеціальні прецизійні

вимірювання дальності до НКА. Головна станція здійснює збір вимірювань від усіх КС. Потім всі вимірювання обробляються. За ним здійснюються точні розрахунки параметрів орбіт, іоносферної моделі і коригувальних поправок бортових годин, які з головної станції через земні станції зв'язку (Атол Дієго - Гарсія, о.Вознесіння, Атол Кваджалейн) спільно з даними обробки метеорологічної інформації, що дозволяє уточнити параметри моделі тропосфери, передаються на борт кожного НКА. Проводиться також моніторинг стану НКА і управління їх роботою. Основу ГС становить центр управління з обчислювальним комплексом (координаційно-обчислювальний центр, КВЦ) і засоби передачі даних на земну станцію зв'язку з НКА (станція закладки Службової Інформації, СЗСІ). Канал " Земля - НКА "використовує частоту 2227,5 МГц; канал" НКА - Земля " використовує частоту 1783,74 МГц.[20]

Наземний комплекс управління (НКУ) ГЛОНАСС керує орбітальним угрупованням навігаційних космічних апаратів та виконує чотири групи завдань[5]:

- ефемеридне і частотно-часове забезпечення НКА;
- моніторинг радіонавігаційного поля;
- радіотелеметричний моніторинг НКА;
- командне та програмне забезпечення функціонуванням НКА.

Наземний комплекс управління містить такі взаємопов'язані стаціонарні елементи:

- центр управління системою (ЦУС);
- центральний синхронізатор (ЦС);
- командну станцію стеження (КСС);
- контрольні станції (КС);
- систему контролю фаз (СКФ);
- квантово-оптичні станції (КОС);
- апаратуру контролю поля (АКП).

Наземний комплекс управління виконує такі функції:

- проведення траєкторних вимірювань для визначення, прогнозування і безперервного уточнення параметрів орбіт всіх супутників;
- часові виміри для визначення розбіжності бортових шкал часу всіх НКА з системної шкалою часу системи;
- формування масиву службової інформації (навігаційних повідомлень), що містить спрогнозовані ефемериди, альманах і поправки до БШВ кожного НКА та інші дані, необхідні для формування навігаційних кадрів;
- передача (закладка) масиву службової інформації в пам'ять бортової ЕОМ кожного НКА і контроль за його проходженням;
- контроль по телеметричних каналах за роботою бортових систем НКА і діагностика їх стану;
- контроль інформації в навігаційних повідомленнях НКА, прийом сигналу виклику ПКУ;
- управління польотом супутників і роботою їх бортових систем шляхом видачі команд управління і передачі на борт проходження цих даних;
- контроль характеристик навігаційного поля;
- визначення зсуву фази далекомірного навігаційного сигналу НКА по відношенню до фази сигналу ЦС;
- планування роботи всіх технічних засобів ПКУ, автоматизована обробка та передача даних між елементами ПКУ.[5]

Сегмент споживачів [20] включає приймачі (апаратуру споживачів) GPS і співтовариство самих користувачів. АС приймає сигнали GPS, обробляє їх, вимірює радіонавігаційні параметри (псевдодальність і прирощення псевдодальності або псевдошвидкість) і визначає на їх основі координати і складові швидкості в ГСК та поправку до місцевої шкалою часу T'_{GPS} щодо системного часу GPS і її відхід, а потім геодезичні координати і висоту над опорною еліпсоїдом в системі координат WGS-84 (B, L, H) і складові вектора швидкості (V_N, V_F, V_H) , для отримання яких також використовуються співвідношення з параметрами моделі Землі (WGS-84). Можливе також визначення координат в будь-якій іншій системі (Меркатора, Гауса-Крюгера,

тощо)[9].

Під призначеними для користувача пристроями ми розуміємо навігаційні приймачі, які використовують сигнал із супутників GPS для розрахунку поточного місця розташування, швидкості і часу. Призначені для користувача пристрої можна розділити на "побутові" і "професійні". Багато в чому цей поділ умовно, тому що іноді досить складно визначити, до якої категорії віднести GPS-приймач і які критерії використовувати при цьому. Існує цілий клас GPS-навігаційних пристроїв, що використовуються під час піших прогулянок, водіння автомобіля, риболовлі тощо. Існують льотні і суднові навігаційні системи, які часто є частиною складних навігаційних систем, телефонів та інших мобільних пристроїв.

Сегмент споживачів ГЛОНАСС включає приймачі (апаратуру споживачів) та самих користувачів. Наземна апаратура приймає сигнали ГЛОНАСС (практично всі сучасні зразки приймають також і сигнали системи GPS), обробляє їх, вимірює і визначає радіонавігаційні параметри, обчислює геоцентричні координати X, Y, Z і на їх основі - геодезичні координати і висоту над опорною еліпсоїдом в системі координат ПЗ-90 (можлива також робота в системах WGS-84, СК-42, Гауса-Крюгера та ін), поправку до місцевої шкалою часу щодо системного часу ГЛОНАСС (GPS) і складові вектора швидкості. Наземна апаратура використовується для навігації (літаків, вертольотів, морських і річкових суден, автотранспорту), для визначення координат при геодезичних і землепорядних роботах, для синхронізації систем зв'язку, енергосистем і т.д.[20]

Основні характеристики супутникових навігаційних систем GPS та ГЛОНАСС відображено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Основні характеристики супутникових навігаційних систем GPS та ГЛОНАСС

Тип системи	Найменування системи	Призначення	Загальна характеристика	Склад системи		Діапазон робочих частот, МГц	Робоча зона	Точність визначення місця (СКП), м	Дискретність випромінювань	Пропускна спроможність
				Апаратура користувачів						
				незалежність	термін дії					
Навігаційна	ГЛОНАСС	Космічна	Далекомірна	Росії	Безперервно	1602,5625..1615,500 ± ±1МГц	Глобальна	30	Безперервно	Без обмежень
Навігаційна	GPS	Космічна	Далекомірна	США	Безперервно	1227,60 ±12 МГц	Глобальна	40	Безперервно	Без обмежень

1.4 Альтернативний спосіб організації системи навігації

1.4.1 Розгляд можливих альтернатив

Альтернативні системи повинні відповідати таким вимогам:

- Забезпечувати покриття навігаційними сигналами всю земну поверхню;
- відповідати сучасним вимогам точності визначення;
- незалежність платформ, на яких розташована передавальна апаратура, від метеоумов та природних катаклізмів;
- вартість організації та експлуатації нової системи не повинно перевищувати вартості сучасних систем.

В даний час немає найбільш зручного і безпечного способу передачі навігаційних сигналів, ніж радіопередачі, оскільки вона найбільш незалежна від погодних умов та інших факторів.

Організація станцій поблизу (до 15 км) від поверхні Землі недоцільна. Це пов'язано з невеликим радіусом радіозв'язку таких станцій, їх залежністю від стихійних лих (землетрусів, повеней на поверхні землі і торнадо, ураганів в щільній атмосфері). Точно так же організація такої системи вимагає великих

інвестицій, так як через низький радіус радіозв'язку потрібна велика кількість станцій.

Відповідно, навігаційне обладнання повинно знаходитися в повітрі. З сучасних літаків лише вертольоти і повітряні кулі можуть зависати в певному місці, але вертольоти не можуть використовуватися через високі експлуатаційні витрати.

Аеростати - недорогий варіант, тому що вони споживають набагато менше енергії, щоб тримати їх в повітрі, ніж інші типи пристроїв. Некеровані Аеростати - це повітряні кулі різної форми без приводу, які використовуються метеорологічною службою на висотах до 35 км. Керовані Аеростати включають в себе дирижаблі, аеростати з двигуном, завдяки яким вони можуть рухатися незалежно від напрямку повітряного потоку. Це найзручніший варіант, так як сучасні технології створюють дирижаблів з екологічно чистим споживанням енергії з відновлюваних ресурсів (сонце, вітер), піднімуть його на велику висоту і зможуть безкоштовно обслуговувати в якийсь момент, його місткість дуже висока.

Грунтуючись на наведених вище зауваженнях, можна зробити висновок про те, що дирижаблі найкраще підходять для заміни супутників.

1.4.2 Типи дирижаблів

Дирижаблі діляться на три основних типи в залежності від конструкції: м'які, напівжорсткі і жорсткі.

У м'якій конструкції корпус матеріалу також служить оболонкою для газу. Внизу, через систему обв'язки, кріпляться гондола і двигуни.

Напівжорсткі дирижаблі відрізняються від м'яких дирижаблів наявністю (в основному) металевого каркаса в нижній частині оболонки, який запобігає відбуваються деформації оболонки. Прикладом напівжорсткого дирижабля є дирижабль "Італія". Каркас кіля складався з трикутних сталевих рам, з'єднаних сталевими лонжеронами. Перед кільовим шасі була встановлена носова арматура, що представляла собою сталевий трубчастий каркас, закріплений поперечними

кільцями, за ним-розробка кормової частини. З кільової ферми також були підвішені гондоли: в одній розміщувалася кабіна управлУ твердих дирижаблях незмінність зовнішньої форми забезпечувалася металевим (рідше – дерев'яним) каркасом, обтягнутим тканиною, а газ знаходився всередині жорсткого каркасу в балонах з газонепроникної матерії.

За типом заповнювача дирижаблі поділяються на:

- що використовують газ із щільністю меншою, ніж щільність навколишнього повітря при рівних температурі та тиску. У наші дні це інертний гелій, незважаючи на його порівняльну дороговизну, у минулому застосовувався вогнебезпечний водень;
- теплові дирижаблі, які використовують нагріте повітря;
- комбіновані варіанти.

Ідея використання гарячого повітря в цьому випадку полягає в тому, щоб регулювати плавучість дирижабля, не викидаючи газ-носій в атмосферу - просто припинити нагрівати гаряче повітря після того, як полегшав дирижабль, щоб зробити апарат важче. Це найперспективніший варіант.

За формою дирижаблі поділяються на:

- сигароподібні;
- еліпсоїдні;
- дискові;
- лінзоподібні – у вигляді двоопуклої лінзи;
- тороїдальні
- у вигляді тора, призначені для використання в якості повітряного крана.

1.4.3 Аналіз експлуатаційних характеристик дирижабля

Дирижаблі з жорсткою рамою і комбінованим агрегатним типом найкраще підходять для створення навігаційної системи. Жорстка рама дозволяє створити модульну систему балонів з підйомним газом. Це необхідно при розриві

зовнішньої оболонки. Комбінований тип агрегату дозволяє опускати платформу для проведення технічного обслуговування, модернізації або ремонту.

Межа ходу такого дирижабля становить близько 45-50 км. висота 40 км найбільш вигідна, так як в цій області температура повітря наближається до 0 С (це називається стратопаузой), турбулентності через підвищення температури немає.

Також переваги даної висоти полягають у:

- відсутності водяної пари, це дозволить дирижаблям визначати відстань між собою за допомогою електромагнітних хвиль в оптичному діапазоні;
- іоносфера починається лише з 60 км, відповідно при проведенні радіонавігаційних помилок точність буде вищою;
- дрібні метеорити згорають до висоти 50 км;
- цивільна та військова авіація не літає вище від 20 до 25 км.

Однак необхідно враховувати наявність вітрів зі швидкістю 160-200 км/год, розріджену атмосферу і наявність атомарного кисню (озону), самого агресивного окислювача.

Оскільки нижня атмосфера є більш агресивним середовищем, розчаровує те, що дирижабль добре підходить для таких навантажень.

Супутникове радіонавігаційне обладнання важить 1044 кг і має термін служби 7,5 років. Щоб підняти 1500 кг вантажу, потрібно дирижабль об'ємом 5200 м³ (в лінійних розмірах діаметр оболонки становить 135 м, довжина оболонки - 54 м).

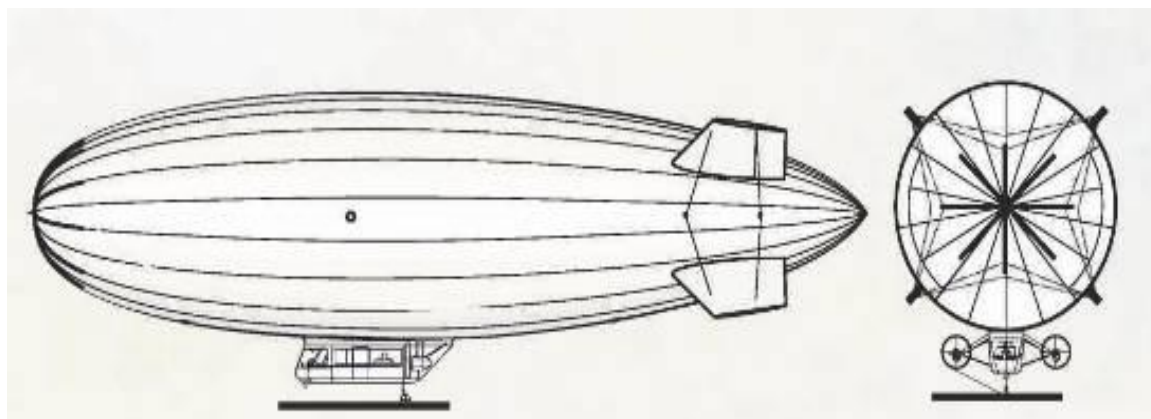


Рис. 1.6. Схема дирижабля

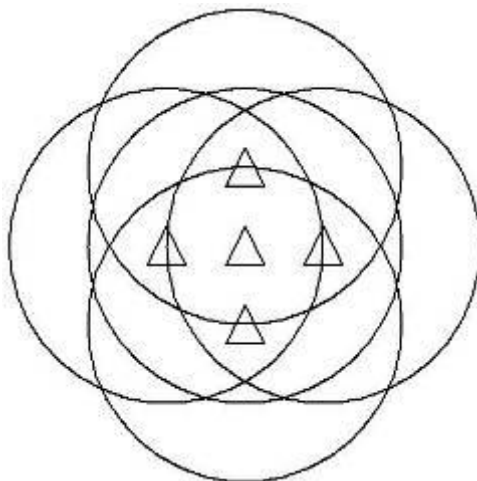
Цей обсяг забезпечує обладнання необхідним живленням від сонячних панелей, розташованих на обшивці дирижабля, щоб ізолювати його від зовнішніх шкідливих факторів.

Термін придатності такої платформи може досягати 30 років і більше, все залежить від матеріалів використовуваної облицювання і каркаса. В даний час найкраще використовувати пластик і його похідні.

Проте, мова йде про те, щоб утримувати дирижабль в певній точці при сильному зустрічному і бічному вітрі. Оскільки щільність атмосфери на висоті 40 км не перевищує 5 г/м³, використання гвинтових двигунів виключено. Реактивні двигуни не можуть використовуватися через небезпеку займання дирижабля, ваги пристрою і високих експлуатаційних витрат.

1.4.4 Аналіз альтернативної навігаційної системи

Одна з головних переваг супутників перед дирижаблями в площі обхвату радіосигналом. З висоти 20 200 км супутник покриває площу близько 19379 км², в той час як дирижабль може покривати близько 2271 км². Потрібно приймати сигнал як мінімум з трьох навігаційних платформ в кожній точці Землі. Схематично організація навігаційної системи на дирижаблях представлена на рис. 1.7.



Δ – дирижабль

Рис. 1.7. Схематичне розташування навігаційних платформ

При використанні такої системи визначення місцезнаходження потрібно більше 100 дирижаблів. Враховуючи відсутність у світі індустрії дирижаблів (в даний час в світі не більше 10 компаній, що виробляють дирижаблі), витрати на організацію системи можна порівняти з вартістю організації системи супутникової навігації.

Кожен дирижабль отримує певні координати місця розташування, які він повинен дотримуватися під час роботи. Відхилення можуть бути зареєстровані, якщо лазерні далекоміри орієнтовані на інші Дирижаблі або засновані на розрахунках сили вітру і опору дирижабля проти зміщення. Це призводить до більшої точності визначення приймача, так як можна передбачити відхилення супутника від заданої точки, можна збільшити частоту несучої хвилі, паралельно можна отримувати результати антени. Навігаційні вимірювання можуть виконуватися відповідно до існуючих процедур.

Переваги використання дирижаблів:

- за наявності атмосфери можна визначити висоту дирижабля від Землі за допомогою вимірювання тиску або температури, що дає можливість точно визначити три координати споживача при використанні сигналів від 3-х навігаційних платформ;
- Підвищення терміну експлуатації обладнання;

- можливість модернізації, ремонту та технічного обслуговування обладнання;
- Більш якісна аерофотозйомка;
- Підвищення точності вимірювань при використанні супутникових методів;
- Низькі енергетичні витрати на підйом супутника до необхідної висоти.

Недоліки навігаційної системи, що базується на дирижаблях:

- Наявність заряджених частинок створює статичну електрику, яка в повітрі відводити нікуди, що може призвести до знищення навігаційної платформи;
- неможливість керувати дирижаблем на висоті 40 км за сучасного розвитку технологій;
- підвищена дія сонячних променів.

В результаті було зроблено висновок, що на даний момент альтернативи супутниковому зв'язку немає. Вона є найбільш надійною, точною та дешевою в експлуатації.

1.5 Структура навігаційних радіосигналів

GPS-передавачі НКА випромінюють два безперервних сигналу на частотах L1 і L2. Несуча частота L1 складається з двох компонентів, які знаходяться по фазі в квадратурі один до одного (зрушені на $\pi/2$) для зручності їх поділу. Перша - модулюються двома двійковими послідовностями (далекомірний псевдовипадковий P-код і інформаційна послідовність лінії передачі даних), що складаються по модулю 2. Друга - також модулюється двома двійковими послідовностями (далекомірний псевдовипадковий C/A-код і інформаційна послідовність), що складаються по модулю 2. Обидві інформаційні послідовності містять інформацію про ефемериди НКА, системний час, поведінку "годинника" НКА, статус повідомлення та ін.[20]

Несуча частота L2 має один компонент і модулюється двома двійковими послідовностями (як правило, далекомірний псевдовипадковий P-код або C/A-код

і інформаційна послідовність лінії передачі даних), що складаються по модулю 2. Тут також передбачений режим використання тільки P(Y)-коду, коли інформаційна послідовність взагалі не передається. У всіх випадках швидкість передачі даних інформаційних послідовностей 50 біт / с. використовується фазова маніпуляція несучих частот (bi-phase shift key, BPSK)[6].

Основним навігаційним далекомірним псевдовипадковим кодом є точний P-код. При включенні режиму A/S (Antispoofing) замість цього коду буде використовуватися закритий код P(Y), введений вперше для НКА Блок-II.[5]

Світовій спільноті доступний відкритий псевдовипадковий код C/A (Clear (Coarse)/Acquisition), який спочатку використовувався для першого входження в режим стеження з подальшим переходом до використання P-коду. Щоб свідомо знизити точність визначення координат до рівня 100 м (2 СРО) для C/A-коду введено спеціальний режим селективного доступу (Selective Availability, S/A, СД), який визначається ICD-GPS-203.

Всі НКА використовують ті ж частоти, але кожен з них має свої власні коди, тому що розглядаються коди отримані таким чином, що вони дозволяють надійно відключати сигнали різних НКА, що означає, що саме тут використовується кодовий принцип поділу сигналів.[5]

P-код являє собою двійкову псевдовипадкову послідовність (ПС) довжиною в 7 діб, передану зі швидкістю 10,23 Мбіт/с (тактова частота 10,23 МГц закритий P(Y)-код, тривалість якого становить 267 діб, формується відповідно до спеціальних закритих документів (ICD-GPS-203/ 224/225).[20]

C/A-код (код Голда) являє собою ПСП довжиною в 1 мс з тактовою частотою 1.023 МГц.

Починаючи з НКА Блок-II, аномальні (нестандартні) коди C/A і P (Y) отримали найменування NSC і NSY. Ці коди призначені для захисту користувача від відмов обладнання.

Таким чином сигнали GPS займають в L-діапазоні дві смуги шириною по 20,46 МГц в центрі яких знаходяться частоти L1 і L2. Ці частоти когерентно сформовані на НКА одним генератором і на землі частота цього генератора

повинна мати величину 10,23 МГц (тактова частота Р-коду). Враховуючи появу релятивістського ефекту, величина частоти задаючого генератора на орбіті повинна бути зміщена на $-4,5674 \cdot 10^{-3}$ Гц і дорівнює 10,22999999543 МГц. Номінальні значення частот будуть 1575,42 МГц і 1227,6 МГц для діапазонів L1 і L2 відповідно.[20]

При цьому кореляційні втрати потужності сигналу складуть:

- внаслідок недосконалості модуляції 0,6 дБ
- внаслідок недосконалості попередньої фільтрації в смузі 20,46 МГц - 0,4 дБ.

Фазові шуми несучої дозволяють при односторонній смузі контуру фазового автопідстроювання в 10 Гц реалізувати точність стеження за фазою порядку 0,1 радіан.

Паразитні сигнали в смузі 20,46 МГц повинні бути принаймні на 40 дБ нижче рівня немодульованих несучих в обох діапазонах.

В результаті фазової маніпуляції значення фаз і станів кодів L1 сигналу будуть визначатися табл. 1.2

Таблиця 1.2

Стан кодів і фази L1 сигналу

Значення фази, град.	Р-код	С/А-код
0	0	0
-70,5	1	
+109,5	0	1
180	1	1

Мінімальні рівні прийнятих сигналів (дБВт) на лінійно поляризовану антену з посиленням в 3 дБ при кутах місця НКА більше 5° наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Мінімальні рівні прийнятих сигналів

Частота	P-код	C/A-код
L1	-163,0	-160,0
L2	-166,0	-166,0

Ефективна невизначеність групової затримки сигналу в НКА (між генератором частоти і фазовим центром передавальної антени) не перевищує 3,0 нс. Групова диференційна затримка між сигналами L1 і L2 коду P (Y) може мати зміщення, що не перевищує 15 нс, і випадкову складову, рівень якої не перевищує 3,0 нс.[20]

Всі передані одним НКА сигнали породжені одним стандартом частоти і когерентно пов'язані між собою. Це відноситься і до несучої частоти, і до кодів, причому для цифрових сигналів норми задає P-код. В інформаційній послідовності відмінність у переходах між станами не перевищує 10 нс.[5]

Навігаційне повідомлення GPS містить інформацію про ефемериди NCA, яка дозволяє розрахувати їх координати і компоненти швидкості, альманах сузір'їв НКА, виправлення частоти і часу, тимчасові мітки, параметри іоносферної моделі, інформацію про бортовому обладнанні НКА і багато іншого. Ця інформація використовується в споживчих пристроях для вирішення проблеми часу навігації для визначення координат, швидкості і корекції за часом в локальній шкалі часу.

Інформаційна послідовність передається кадрами ємністю 1500 біт і тривалістю 30 с. Один кадр ділиться на субкадри тривалістю 6 с. Кожен субкадр (або рядок) містить 10 слів по 30 біт кожне. В одному кадрі передається 1/25 всього альманаху. Тому передача всієї інформації альманаху займає 12,5 хв. Цей масив інформації об'ємом 37500 біт називають суперкадром.[20]

Використовується 11 типів блоків (форматів) даних, які представлені у табл. 2.3 [5]

Параметр "Код L2" використовується для визначення, який код передається на частоті L2 (P або C/A). Третій рядок містить ознаку передачі даних з P-кодом

на частоті L2. Коефіцієнт "Точність НКА" характеризує діапазон помилок ПД. Параметри t_{oc} , a_{f2} , a_{f1} , a_{f0} , (часові поправки) використовуються для корекції "годинника" НКА на основі поліноміальної моделі 2-го порядку з релятивістськими поправками, а параметр T_{GD} , - для корекції псевдодальності при одночастотних вимірах. Параметр IODC є характеристикою часових поправок.

Таблиця 1.4

Зміст блоків (форматів) даних

№ блока	Зміст	№ субкадра в кадрі	№ сторінки в суперкадрі
1	Часові поправки, поправки для двох частотної іоносферної корекції	1	-
2	Ефеміриди	2	-
3	Ефеміриди	3	-
4	Альманах	5	1-24
5	Ознаки справності НКА	5	25
6	Резервне повідомлення	4	1, 6, 11, 16&21
7	Резервне повідомлення	4	12, 19, 20, 22, 23&24
8	Параметри UTS іоносферної моделі	4	18
9	Ознаки A/S	4	25
10	Службове повідомлення	4	13
11	Резервне повідомлення	4	14, 15&17

Інформація блоків 1, 2, 3 передається оперативно через 30 с. Інформація інших блоків передається в суперкадрі, зазначеному в 4-му стовпці табл. 2.3 Для ілюстрації змісту навігаційного повідомлення в табл. 2.4 як приклад наведені параметри субкадра 1.[20]

Кожен субкадр починається зі слів TLM (телеметрія) і HOW (ключ). Шість молодших розрядів кожного субкадра використовується для контролю парності.

Субкадр 1 використовується для передачі тимчасової інформації. Мітка часу- Z-відлік передається наступним чином: 10 старших розрядів (число тижнів) передаються в субкадрі 1 окремо (1-й рядок табл. 1.5), А час тижня передається до складу слова NOW.

Таблиця 1.5

Параметри субкадру 1

Параметр	Число біт	Розряд	Діапазон	Одиниці виміру
Номер тижня	10	1		
Код L2	2	1		
Дані з P-кодом на L2	1	1		
Точність НКА	4			
Ознаки справності НКА	6	1		
T_{GD}	8	2^{-31}		с
IODC	10			
t_{oc}	16	2^4	604784	с
a_{f2}	8	2^{-55}		с/с*с
a_{f1}	16	2^{-43}		с/с
a_{f0}	22	2^{-31}		с

2 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

2.1 Вимірювані навігаційні параметри і їх геометричні властивості

Навігаційні визначення рухомих об'єктів та НКА засновані на вимірюванні навігаційних параметрів R , реальні значення яких визначаються лише відносним положенням та переміщенням об'єктів. У цьому сенсі вони незмінні стосовно систем координат, які задають положення та рух НКА та об'єкти, що визначаються.[20]

У якості вимірюваних навігаційних параметрів можуть виступати дальності (квазідальності), різниці й суми дальностей (квазідальностей), кутомісні, азимутальні й інші кутові вимірювання, радіальні швидкості (квазірадіальні швидкості), їх різниці й т.д.

Як уже було сказано, квазідальності та квазірадіальні швидкості, які реалізуються, реалізовані в умовах беззапитного характеру навігаційних вимірювань, містять помилки через різницю між частотами та фазами бортових стандартів частоти НКА та об'єктом, який слід визначити. Ці помилки можна усунути або за допомогою диференціальних вимірювань, або шляхом включення цих погрешностей у визначаємі параметри. Таким чином, вимірювання квазідальності та квазірадіальної швидкості можна звести до їх диференціальних еквівалентів.[20]

Кожному із виміряних параметрів відповідає його геометрична фігура, яка є геометричним положенням точок можливого положення об'єкта, для якого визначено, що значення вимірюваного параметра навігації однакові. Таким чином, вимірюючи навігаційний параметр у досить широкому діапазоні допустимих значень для позицій обумовленого об'єкта, можна вибрати більш вузьку область (область положення), форма і розмір якої відповідає вимірюваному параметру.

Вимірювання дальності D (рис. 2.1, а) відповідає виділенню в просторі

навколо першого об'єкта, поверхня якого у вигляді сфери, центр якої знаходиться в місці розташування першого об'єкта, а радіус якого відповідає вимірюваній відстані.[20]

Вимірювання різниці дальностей ΔD (рис. 2.1, б між двома об'єктами з номером 1 (два різних НКА, дві наземні станції тощо) відповідає зоні позиції у вигляді двоповерхового гіперболоїда, оскільки це для точок на поверхні Фігура характеризується тим же значенням різниці дальностей ΔD до фокусів гіперболоїда, в яких розташовані опорні об'єкти.

Сумі дальностей ΣD (рис. 2.1, в) відповідає площі положення у вигляді еліпсоїда обертання, у фокусних точках якого лежать опорні об'єкти, а для поверхні еліпсоїда, яка представляє площу можливого розташування об'єкта, що визначається, характерне те ж саме значення ΣD .

Кутомісним вимірюванням γ (рис. 2.1, г) відповідає конічній поверхні, вершина якої розташована в місці розташування опорного об'єкта, кут на вершині якого вдвічі більший за вимірюваний кут 2γ , а положення осі конічної поверхні вказується (зазвичай збігається) з локальною вертикаллю.

Азимутальне вимірювання A (рис. 2.1, д) відповідає півплощині, перпендикулярній місцевій горизонтальній площині, що є кутом A , схожим на півплощину до Північного полюса.[20]

У випадку вимірювання радіальної швидкості D (рис. 2.1, е) знаємо, що опорний об'єкт рухається зі швидкістю V , яка складає з лінією, що з'єднує опорний і об'єкт, що визначається, кут α . Тоді $D = V \cos(\alpha)$. Звідси $\cos \alpha = \frac{D}{V}$ [7]

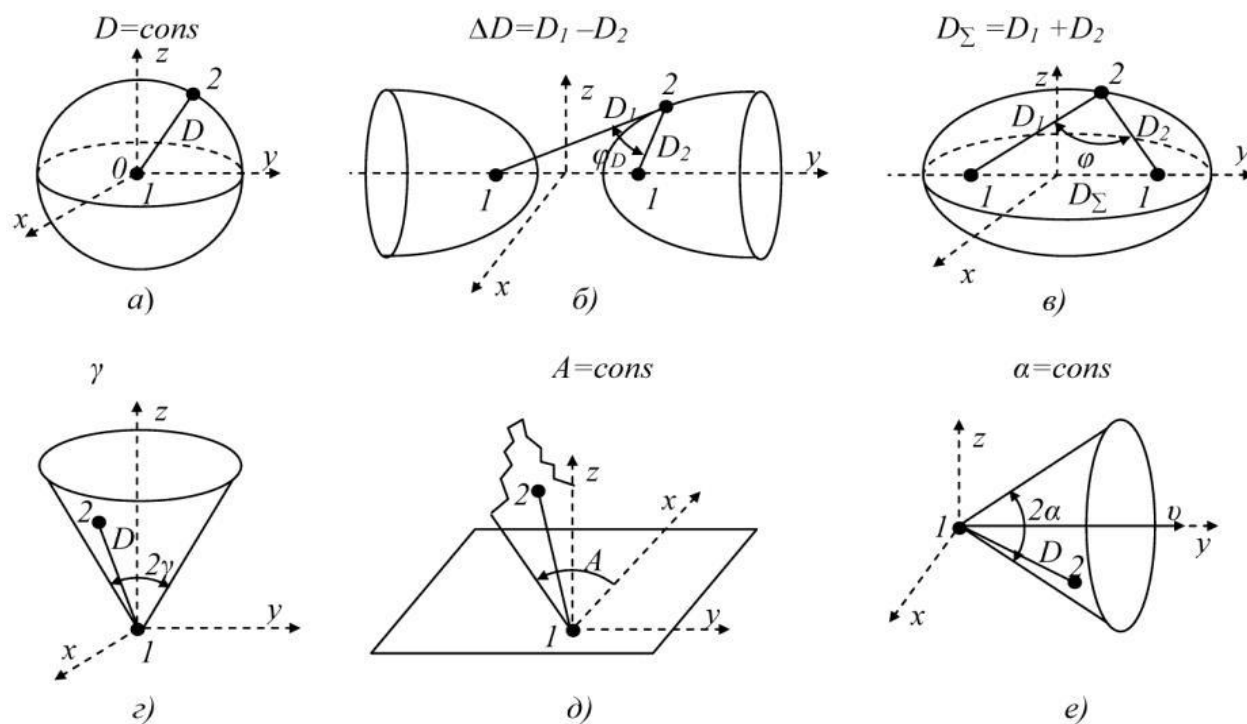


Рис. 2.1. Поверхні положення, що відповідають:

- а) дальномірним D ;
- б) різницево-дальномірним ΔD ;
- в) сумарно-дальномірним ΣD ;
- г) кутомісним γ ;
- д) азимутальним A ;
- е) радіально-швидкісним α вимірюванням.

2.2 Корекція навігаційних параметрів

Особливість корекції полягає в тому, що станція управління обчислює виправлення псевдо-порядку між станцією управління і всіма супутниками на радіогоризонті. Для цього вимірюються псевдодальності до всіх супутників і з опорних координат станції управління і координат супутників визначаються обчислені псевдодальності, які вважаються реальними. Відмінності між вимірюваними та розрахованими псевдодальностями повідомляються споживачам у формі виправлень.[20] Кожен споживач вибирає оптимальне сузір'я, і виміряні псевдодальності коригуються за допомогою виправлень, отриманих з контрольної станції [7].

2.3 Обробка сигналів GPS-приймачем та визначення доступності супутникового сигналу

Перше завдання програмного забезпечення в ресивері-визначити, які супутники будуть відображатися (при прийомі). Коли приймач виявляє, що цей супутниковий сигнал доступний, він намагається контролювати компоненти несучої і сигналу PRN. GPS-приймач використовує функцію відстеження для відстеження мультимедіа та цикл затримки для відстеження послідовності PRN. Навігаційне повідомлення надає користувачеві достатню інформацію для визначення місця розташування супутників.

Перш ніж приймач зможе почати відстеження супутників, він повинен визначити, які супутники знаходяться в полі зору. Крім того, приймач повинен визначити доплерівські зрушення, викликані відносним рухом супутника і Користувача. Визначення цієї змінної називається відстеженням. Оцінка доплерівського зсуву повинна бути точною до декількох десятків герц, щоб відстежувати вдавнення і петлі замикання в середовищі. Фаза послідовності PRN повинна бути точною через функцію автоматичної кореляції золотих кодів з наступною половиною фішок.[20]

Кількість супутників для пошуку можна значно зменшити, оцінивши місце розташування одержувача. Існує безліч різних алгоритмів для пошуку можливих доплерівських зрушень і фаз коду. Однак принцип роботи алгоритмів в основному має подібні характеристики. Спочатку збираються дані і вибирається конкретний супутник. Довжина даних зазвичай становить від 1 до 20 мілісекунд, оскільки код C / A має період в 1 мілісекунду, а ймовірність збільшення біта даних через 20 мілісекунд ($50 \text{ біт} / \text{с} \Rightarrow 20 \text{ мс бітів даних}$) [5].

2.4 Принципи навігаційних визначень

Основні принципи навігаційних визначень в системі GPS характеризуються рис. 1.3. [20]

Координати споживача в системі отримуються за допомогою їх розрахунку за псевдодальностями до НКА. Псевдодальності розраховуються (співвідношення 2.1) за тимчасовими затримками проходження сигналів синхронізованих між собою НКА по трасах "НКА-споживач".

$$D_i = cT_i, \quad (2.1)$$

де: c – швидкість розповсюдження радіохвиль; T_i – часові затримки сигналу;

Затримки вимірюються шляхом порівняння отриманих псевдовипадкових кодів і генеруються в копіях приймачів цих кодів з урахуванням відомих моментів сигналів НКА. Попередня корекція псевдодальностей виконується шляхом компенсації ефекту обертання Землі, тропосферних і іоносферних помилок. Співвідношення також використовується в двохчастотних пристроях для усунення іоносферних помилок (2.2).

$$D = \frac{(D_1 - \gamma D_2)}{(1 - \gamma)}, \quad (2.2)$$

де: D_1 та D_2 – Псевдодальності, визначені по сигналах на частотах L1 та L2 відповідно; $\gamma = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2$, f_2 і f_1 – частоти відповідно сигналів діапазонів L1 та L2;

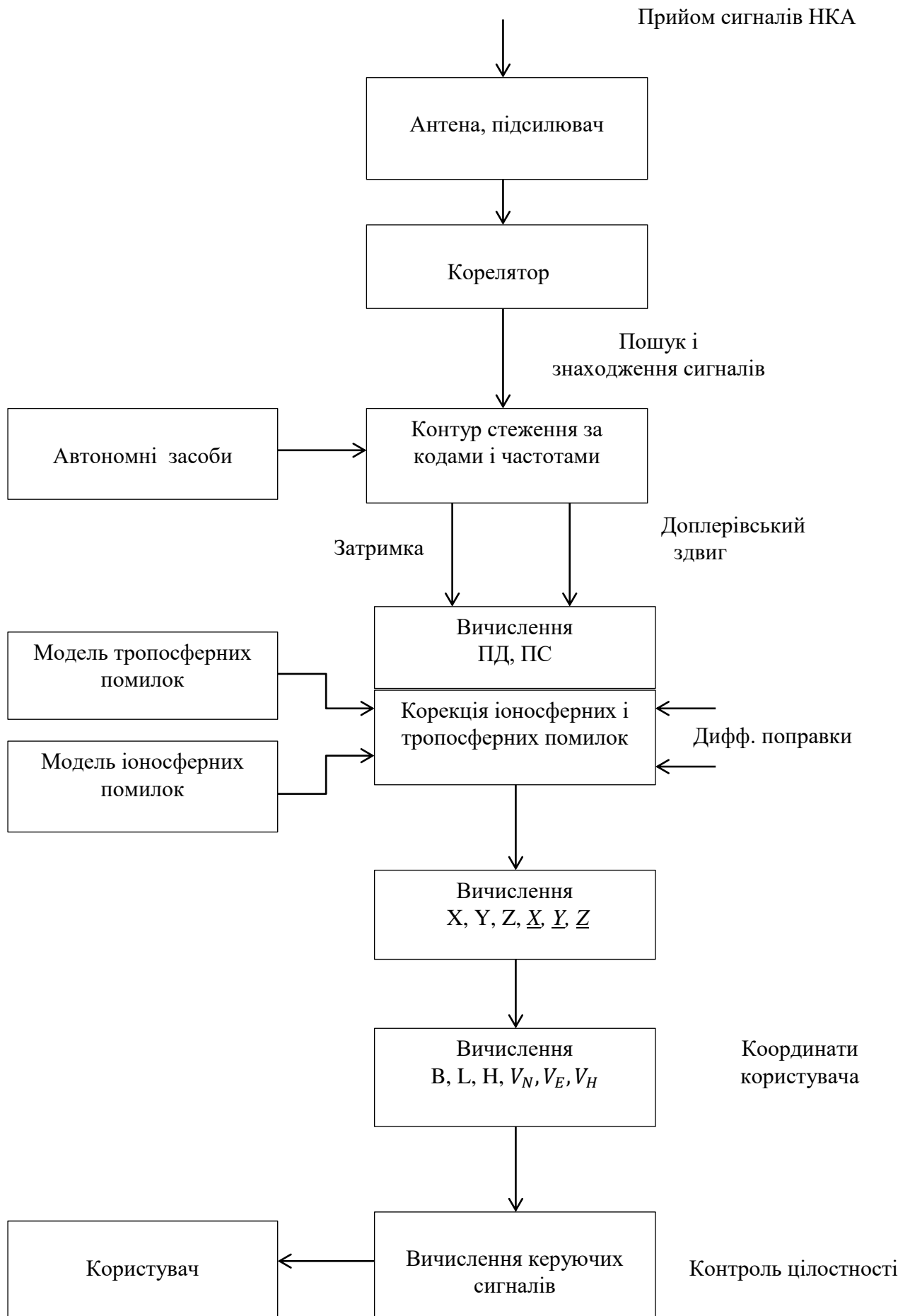


Рис. 2.2. Принципи навігаційних визначень

2.5 Точнісні характеристики

Точнісні характеристики визначаються рівнем основних помилок і геометричним розташуванням використовуваних НКА і споживача. Для вектора визначених навігаційних параметрів[5]:

$$\eta^T = [X \ Y \ Z \ T' \ X' \ Y' \ Z' \ f'], \quad (2.3)$$

де: $X \ Y \ Z$ – прямокутні координати визначаємого об'єкта; T' - розходження шкал часу НКА та споживача;

У припущенні гауссівського характеру розподілів основних похибок СРНС і відсутності зсувів найбільш загальною характеристикою точності визначення η буде коваріаційна (кореляційна) матриця R_g , помилок $\Delta\eta$, яка буде мати вигляд

$$R_g = (H_g^T R^{*-1} H_g)^{-1}, \quad (2.4)$$

де: H_g – матриця похідних і функцій для псевдошвидкостей по змінних (2.1); R^* – коваріаційна матриця похибок визначення псевдодальності і псевдошвидкості.[20]

Для характеристики похибок визначення навігаційних параметрів по ширині і висоті використовується коваріаційна матриця:

$$R = (H_\xi^T R^{*-1} H_\xi)^{-1}, \quad (2.5)$$

де: H_ξ – визначається матрицею H_g і матрицею перетворення вектора помилок $\Delta\eta$.

Знайдені в ході навігаційних визначень прямокутні координати $X \ Y \ Z$ повинні бути перетворені в координати, які зазвичай використовуються користувачем B – широта, L – довгота, H – висота.

Так загальний геометричний фактор зміни точності визначення навігаційних параметрів B, L, H, T' (в лінійній мірі) запишеться у вигляді квадратного кореня:

$$GDOP = \sqrt{(\text{trace } \alpha)}, \quad (2.6)$$

де: α – матриця навігаційних параметрів B, L, H, T' .

Геометричні фактори зміни точності при визначенні місця в просторі - PDOP, по горизонтальній площині – HDOP, по висоті – VDOP, часу – TDOP запишуться відповідно у вигляді:

$$PDOP = \sqrt{\gamma_{11} + \gamma_{22} + \gamma_{33}}, \quad (2.7)$$

$$HDOP = \sqrt{\gamma_{11} + \gamma_{22}}, \quad (2.8)$$

$$VDOP = \sqrt{\gamma_{11}}, \quad (2.9)$$

$$TDOP = \sqrt{\gamma_{44}}, \quad (2.10)$$

У співвідношеннях (2.7-2.10) γ_{xy} , є елементами матриці α . Визначені таким чином геометричні фактори залишаються функціями тільки геометричного розташування використовуваних НКА і визначаємого об'єкта.[20] Відповідно до цього середньо-квадратичні похибки визначення планових координат висоти і часу запишуться у вигляді:

$$\sigma_B = \sigma_{\text{ПД}} \sqrt{\gamma_{11}}, \quad (2.11)$$

$$\sigma_L = \sigma_{\text{ПД}} \sqrt{\gamma_{22}}, \quad (2.12)$$

$$\sigma_H = \sigma_{\text{ПД}} \sqrt{\gamma_{33}}, \quad (2.13)$$

$$\sigma_T = \sigma_{\text{ПД}} \sqrt{\gamma_{44}}, \quad (2.14)$$

де σ – середньоквадратична помилка.

Аналогічні співвідношення можуть бути записані і для визначення помилок складових вектора швидкості.[20]

Середньоквадратична радіальна помилка (*drms*) визначення місця по горизонталі і середньоквадратичне сферичне відхилення (ССВ) представляються у вигляді:

$$drms = \sigma_{\text{ПД}} \sqrt{\gamma_{11} + \gamma_{22}}, \quad (2.15)$$

$$\text{ССВ} = \sigma_{\text{ПД}} \sqrt{\gamma_{11} + \gamma_{22} + \gamma_{33}}, \quad (2.16)$$

Використання геометричних факторів для визначення точності навігаційних параметрів за допомогою СРНС дозволяє вивчати параметри і оцінювати можливості різних сузір'їв без необхідності в даних для точності визначення псевдодальності..

Основними помилками у визначенні псевдодальності є: помилка інформації про ефемериди, корекція частоти і часу, помилка через шум приймача і зовнішніх перешкод, багатоходові властивості радіохвиль в тропосфері і іоносфері. В табл. 2.1 показані середні квадратичні помилки основних джерел помилок при визначенні псевдополя.

Таблиця 2.1

Середньоквадратична похибка основних джерел помилок визначення
псевдодальності

Джерела помилок	С/А-код	Р-код
Селективний доступ	24	0/0
Іоносфера	7	0,01/2,25
Тропосфера	0,7	0,7/1,95
Багатопрореневість	1,2	1,8/1,2
Шуми приймача	1,5	0,6/1,45
Погрішності координатно-часового забезпечення НКА	3,6	3,6/5,4
Загальні	25,3/8,1	4,1/6,5

З табл. 2.5 випливає, що при типовому геометричному факторі HDOP, рівному 2, точність визначення координат (CPO , drms) складе для С/А-коду 50,6 м і 16,2 м, а для Р-коду 8,2 і 13 м, що не суперечить, що сферична ймовірна помилка повинна бути на рівні 16 м.[2]

Більш детально точність визначення навігаційно-часових параметрів з різними довірчими рівнями (%) охарактеризовані в табл. 2.2[10].

У гіршому випадку з сучасними багатоканальними НАП (не менше шести каналів), що використовує відкриті вузькосмугові однодіапазонні (1600 МГц) навігаційні радіосигнали системи ГЛОНАСС, ви зможете ефективно переміщатися по мобільних наземних об'єктах (суші, морю, повітря) з максимальною тонною координат об'єкта: 60 м в горизонтальній площині і 100 м в роки максимальної сонячної активності; 30 м в горизонтальній площині і 50 м у висоту в роки мінімальної сонячної активності.

Таблиця 2.2

Характеристика похибок визначення навігаційно-часових параметрів

Параметр місця визначення, м	Р-код 50%	С/А-код 50%	Р-код 65-68%	С/А-код 65-68%	Р-код 95%	С/А-код 95%
По горизонталі	8	40	10,5	50	21	100
По вертикалі	9	47	14	70	28	140
В просторі	1 6	76	18	86	86	172
Складові швидкості м/с	0,07	н/д	0,1	н/д	0,2	н/д
Час GPS, нс	17	95	26	140	52	280
Час UTS, нс	68	115	100	170	200	340

Похибки (з ймовірністю 0,95) навігаційних визначень в СРНС GPS складають 100 м в площині по горизонталі і 156 м по висоті і, таким чином, точність в СРНС ГЛОНАСС в 2,5 рази вище, ніж в СРНС GPS.

2.6 Джерела отримання навігаційних даних

Розділимо всі джерела даних на основні та додаткові. Основні - ті, які безпосередньо визначають місце розташування пристрою, вихідними даними цих джерел є широта та довгота. Вони завжди входять до складу апаратно-програмної частини мобільних пристроїв, причому достатньо наявності одного, щоб здійснювати геолокацію. Додаткові джерела можуть надати тільки непрямую інформацію про геопозицію, якимось чином характеризуючи фізичне положення пристрою: просторові сенсори та ін. До додаткових також можна віднести джерела, що працюють тільки в певному середовищі або потребують окремих зовнішніх пристроїв.

2.7 Основні та додаткові джерела отримання навігаційних даних

- Супутникові навігаційні приймачі

Дані з джерела є геоінформацією, отриманою за допомогою геостационарних супутників GPS/GLONASS/Galileo/GNSS. У загальному випадку існує два способи одержання даних: безпосередньо через GPS-модуль у форматі необроблених символічних повідомлень різного типу та за допомогою операційної системи, яка здійснює попередню фільтрацію.

Інформація про місцезнаходження від супутникових навігаційних приймачів як правило має найбільш високу точність.

- Wi-Fi точки доступу

Джерело дозволяє отримати інформацію про місцезнаходження Wi-Fi роутера, до мережі якого підключено мобільний пристрій. Можна відзначити такі особливості:

- якщо WLAN роутер підтримує прив'язку широти і довготи, він повинен мати дані про своє місцезнаходження;
- технічно неможливо визначити швидкість користувача і його переміщення тільки на підставі однієї координати в радіусі дії роутера.

Перспективною є технологія WiPS / WFPS – локалізація місця розташування мобільного пристрою на основі аналізу потужності сигналів декількох WLAN точок доступу.

Інформація про місцезнаходження від Wi-Fi точок доступу джерела має середню точність.

- Вишки стільникового зв'язку

Координати мобільного пристрою можна отримати при тріангуляції сигналу вишок стільникового зв'язку при наявності GSM модуля і активному підключенні до мережі.

Через особливості визначення широти і довготи, параметри фіксації координат можуть вказувати на досить високу точність даних, проте на практиці це не завжди вірно.

До додаткових джерел можна віднести:

- Bluetooth маячки

Технологія в загальному випадку аналогічна WiPS / FPS, проте замість Wi-Fi точок доступу тут використовуються Bluetooth маячки. Метод дозволяє отримати високоточні дані місця розташування, проте цей спосіб обмежений радіусом дії маячків і використовується, як правило, лише всередині приміщень.

- Пасивні джерела

Беручи до уваги особливості мобільних операційних систем і мобільних технологій геолокації відзначимо також пасивні джерела – це ті, які безпосередньо не ініціюють визначення місця розташування пристрою, не є "прямими постачальниками" геоданих. Пасивними джерелами можуть бути: кеш, застарілі дані від інших джерел, збережена геоінформація від інших додатків та інші.

- Сенсори

У мобільних пристроях як правило присутні різноманітні сенсори: акселерометри, гіроскопи, магнетометри. Аналіз даних цих сенсорів дозволяє визначати девіації сигналу при нульовій швидкості, що як наслідок істотно поліпшує точність позиціонування.

Виходячи з порівняльного аналізу джерел, можна зазначити найбільш пріоритетні джерела для визначення місця розташування: навігаційні приймачі, Wi-Fi точки доступу і додаткова інформація з кінцевого додатка. Такі джерела присутні практично у всіх мобільних пристроях, можуть використовуватися як при навігації всередині приміщень, так і зовні.

Таблиця 2.3

Порівняння джерел геолокаційної інформації в мобільних пристроях

Тип джерела даних	Джерело даних	Точність місцезнадження поза приміщенням	Точність місцезнадження в приміщенні	Особливості
Основні	навігаційні приймачі	Висока	Низька	Викиди всередині приміщень, блукання координат, відхилення траєкторії, помилка визначення часу фіксації, дуже висока точність поза приміщеннями.
	Wi-Fi точки доступу	Середня	Середня	Необхідна наявність великої кількості WLAN маршрутизаторів, прив'язка роутерів до координат, неможливо визначити швидкість користувача в межах однієї точки доступу
	Вишки стільникового зв'язку	Низька	Низька	Зазвичай низька точність
Додаткові	Bluetooth маячки	-	-	Необхідна наявність великої кількості Bluetooth маячків, поза приміщеннями практично не використовуються
	Пасивні джерела	Середня	Середня	Дані бути відсутні
	Сенсори	-	-	Сенсори можуть бути відсутні

2.8 Огляд існуючих методів фільтрації даних

Під час роботи приймачі GPS / ГЛОНАСС постійно обчислюють ряд навігаційних параметрів: широту, довготу, час, висоту і т.д., і деякі з цих даних можуть бути або надлишковими, або помилковими. Прикладом помилкової

навігаційної інформації є зміщення координат нерухомого об'єкта, схематично показане на рисунку 2.3.

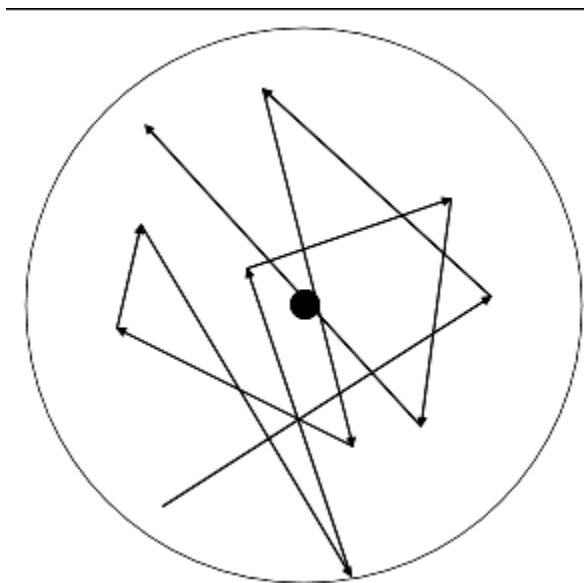


Рис. 2.3. Зміщення координат нерухомого об'єкта

Точка відображає фактичне місце розташування об'єкта, окружність-точність визначення місцезнаходження. Стрілки показують зміщення координат під впливом факторів, що впливають на зниження точності. Найбільш важливим завданням систем фільтрації даних є скорочення обсягу даних в наборі геолокації без втрати якості позиціонування і підвищення надійності одержуваної інформації. [14]

Одним з рішень, що дозволяє підвищити достовірність і зменшити обсяг навігаційної інформації, переданої користувачеві, є фільтрація помилкових і надлишкових даних, отриманих від ГЛОНАСС / GPS модуля мобільного терміналу, що входить до складу апаратури.

Необхідність попередньої обробки фільтрації даних, отриманих безпосередньо з навігаційних приймачів, обумовлена безліччю причин, серед яких найбільш значущі:

- проблеми, пов'язані з живленням навігаційного обладнання (наприклад, тимчасове знеструмлення терміналу або сильні електростатичні перешкоди на апаратуру терміналу);
- перешкоди відбитого сигналу на антену ГЛОНАСС/GPS модуля;
- зміна умов прийому сигналів із супутників (проїзд в умовах щільної міської забудови, в'їзд у тунель або лісисту/гірську місцевість, складні метеорологічні умови).

Використання фільтрації в системах моніторингу мобільних об'єктів дозволяє значно зменшити обсяги оброблюваної інформації зі збереженням її достовірності. Фільтрація полягає у виключенні надлишкових даних, що не приносять значущих змін про становище об'єкта, а також відсіві викидів, які призводять до спотворень даних і помилок у визначенні місця розташування

Існуючі методи фільтрації даних, використовувані в системах супутникового моніторингу, засновані на значеннях вбудованих факторів точності позиціонування HDOP, VDOP, PDOP - фактори втрати точності в просторі, по висоті та по горизонталі відповідно, а також спрацьовування датчиків, встановлених на мобільному об'єкті.

2.8.1 Адаптивний алгоритм обробки потоку навігаційних даних на основі методу діагностичної фільтрації

Згідно з цим методом процедуру фільтрації необхідно виконувати в 3 етапи: попередній відсів, діагностична фільтрація і згладжування даних.[17]

На першому етапі здійснюється фільтрація даних, які з великою ймовірністю є помилковими. Відсів здійснюється за такими критеріями:

- кількість видимих супутників менша за допустиме значення;
- режим позиціонування не відповідає вибраному режиму;
- дані по показанням статусу достовірності не валідні;
- значення вбудованих факторів точності позиціонування більші за допустимі значення;

- швидкість руху перевищує максимально допустиму для такого типу мобільних об'єктів

На етапі діагностичної фільтрації в якості критерію для відсіювання навігаційних даних використовується відстань між двома координатами GPS/ГЛОНАСС-вибірок, які повинні бути більше або дорівнювати граничному значенню. Значення факторів втрати точності рекомендується брати з діапазону від 5 до 15 метрів для HDOP, і від 10 до 29 для VDOP. Завдяки діагностичній фільтрації вдається відсіяти від 30% до 70% GPS/ГЛОНАСС-вибірок, що несуть надлишкову або помилкову інформацію.

Необхідність етапу згладжування згладжування пояснюється тим, що мобільний об'єкт рухається плавно, з поступовим зміною напрямку руху. Завдяки згладжуванню можна досягти реалістичного відображення шляху пересування, а також отримати більш точні значення пройденої відстані

Таким чином цей метод дозволяє значно зменшити потік даних для кожного типу спостережуваного об'єкта і його типу руху, що знижує навантаження на канал передачі між центром управління і мобільним об'єктом.

2.8.2 Блоково-часовий алгоритм фільтрації геолокаційних даних

Геолокаційні дані, що описують переміщення об'єкта, що спостерігається, являють собою послідовність, значень широти, довготи, часу, висоти над рівнем моря, миттєва швидкість, тощо.

Якщо представити lon, lat – довгота та широта відповідно, в порядку зростання часу, являють собою вершини ламаної. Для спрощення ламаних ліній часто використовують алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера [19], який дозволяє зменшити число точок кривої, апроксимованої більшою серією точок.

Суть алгоритму полягає в тому, щоб за ламаною, яка апроксимує криву, побудувати ламану з меншою кількістю точок. Алгоритм визначає розбіжність, яка обчислюється за максимальною відстанню між вихідною і спрощеною кривими. Спрощена крива складається з підмножини точок, які визначаються з

початкової кривої.[18]

Початкова крива є впорядкованим набором точок або ліній, і задана відстань $\epsilon > 0$. Початкова крива показана на пункті 0 рисунку 2.2, спрощена — на пункті 4.

Алгоритм рекурсивно поділяє лінію. Входом алгоритму служать координати всіх точок між першою та останньою. Перша та остання точка зберігаються незмінними. Після чого алгоритм знаходить точку, найбільш віддалену від відрізка, що з'єднує першу та останню. Якщо точка знаходиться на відстані меншій ϵ , то всі точки, які ще не були відзначені до збереження, можуть бути викинуті з набору і пряма, що вийшла, згладжує криву з точністю не нижче ϵ

Якщо ж відстань більше ϵ , то алгоритм рекурсивно викликає себе на наборі від початкової до даної і від даної до кінцевої точках (що означає, що дана точка буде відзначена до збереження). Після закінчення всіх рекурсивних викликів вихідна ламана будується лише з тих точок, що були відзначені для збереження.

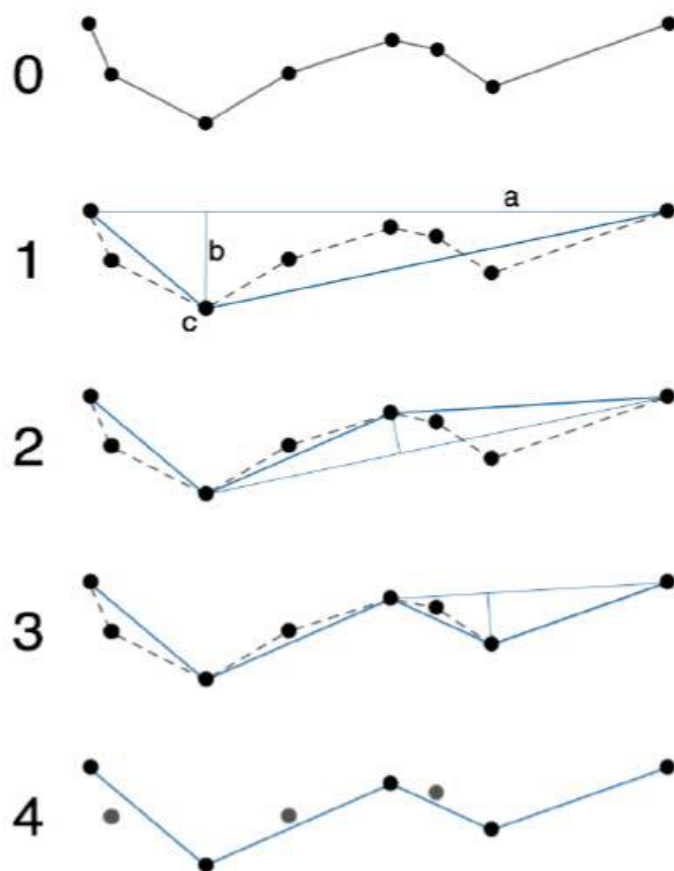


Рис. 2.4. Результат роботи алгоритму Рамер-Дугласа-Пекера

В результаті виконання алгоритму Рамер-Дугласа-Пекера дана ламана лінія набуває вигляду, зображена в нижній частині малюнка. На ній чорним кольором зображені вузли вихідної ламаної, які не були видалені в результаті обробки, сірими точками – віддалені вузли ламаної, сірими лініями – новий вигляд, якого набуває ламана після обробки. [19]

Проте серед цих точок можуть виявитися також і точки, що несуть додаткове смислове навантаження, наприклад, точки тривалого простою об'єкта, що спостерігається, або проміжні точки на довгих прямолінійних ділянках магістралей - вони є зайвими з точки зору алгоритму Рамера - Дугласа - Пекера, але можуть бути важливим елементом для інших бізнес-процесів підприємства, що експлуатує інформаційну систему. Типовими "втратами" при застосуванні алгоритму Рамера – Дугласа – Пекера (і багатьох інших алгоритмів спрощення ламаних) до даних геолокації є:

- втрата місць спокою об'єкта, що спостерігається, коли стає неможливо визначити, як довго насправді знаходився об'єкт на одному місці;
- втрата проміжних точок об'єкта, що спостерігається при його русі по прямолінійному шосе.

Таким чином в блоково-часовому алгоритмі фільтрації геолокаційних даних, пропонується спочатку виділити на треку точки спокою та контрольні точки та використовувати їх як точки розбиття вихідної ламаної на підламані, до кожної з яких вже застосовувати класичні алгоритми спрощення ламаних, наприклад алгоритм Рамера — Дугласа Пекера.[18]

2.8.3 Метод швидкої фільтрації потоку даних

Метод швидкої фільтрації потоку даних, що містить глобальне положення спостережуваного об'єкта. Цей метод фільтрації є двоетапним і включає в себе алгоритми попередньої і кінцевої фільтрації даних геолокації.[14]

На етапі попередньої фільтрації відбираються несправні, неповні або ті які не відповідають режиму GPS-вибірки даних. GPS-вибіркою називається набір

даних, одержуваних від навігаційного приймача. До цих даних відносяться дата і час визначення місцезнаходження, широта і довгота в градусах, висота над рівнем моря, фактори втрати точності DOP.

Для низки додатків на даному етапі фільтрації може виявитися корисним передбачити генерацію таких подій, як «втрата сигналу GPS/ГЛОНАСС» та «початок роботи фільтра». Додатково, залежно від вимог до якості даних, можна відсівати вибірки, у яких значення DOP виходять за максимально допустимі межі, вказані у налаштуваннях фільтра. Рекомендується приймати такі максимально допустимі значення: $HDOP_{max} = 3-6$ м , $VDOP_{max} = 4-7$ м .

Алгоритм попередньої стадії фільтрації зображено на рис. 2.5. При старті запропонований алгоритм перевіряє GPS-вибірки, що надходять. Після того, як з'явиться сигнал GPS/ГЛОНАСС, ініціалізуються допоміжні змінні та починається основний цикл фільтрації. [14]

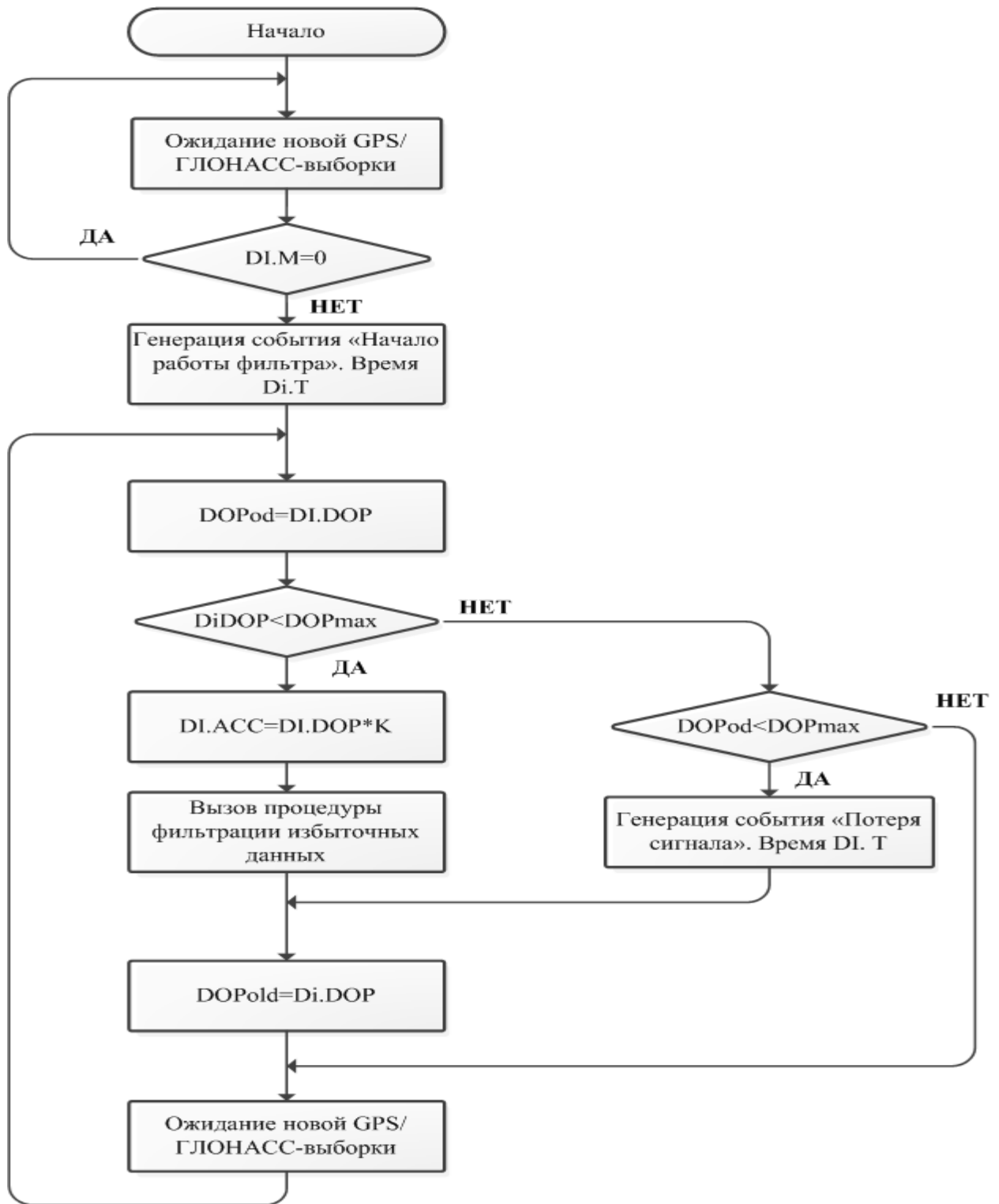


Рис 2.5. Блок-схема работы алгоритму попередньої фільтрації

Другим етапом методу швидкої фільтрації є фільтрація надлишкових даних. Він використовує вибірки, які не відфільтрувались на етапі попередньої фільтрації, а також значення точності позиціонування, відповідні кожній вибірці. Основним критерієм цього алгоритму є відстань між двома координатами GPS-

вибірок, відстань між якими має бути більше або дорівнювати сумі точності позиціонування для кожної з GSP-вбірок. Графічно це показано на малюнку 2.4. У середині кіл (для сфер тривимірного режиму позиціонування), що представляють точність позиціонування, знаходяться координати зразків GPS. Кожне нове значення вибірки порівнюється з попереднім, при розрізах кола воно відкидається.

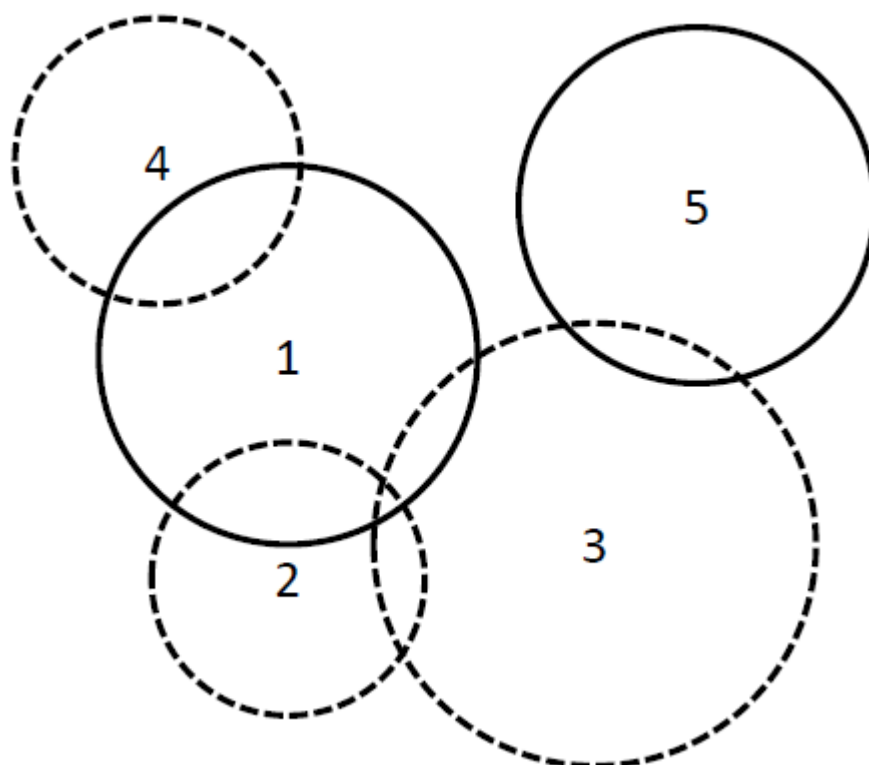


Рис. 2.6. Метод швидкої фільтрації потоку даних

Наступним кроком у цьому методі [14] є обчислення відстані між точками, які пройшли процедуру фільтрації. GPS використовує геодезичну світову систему прив'язки WGS-84, засновану на тривимірній геоцентричній системі координат, в якій форма Землі розглядається як еліпсоїд з великою і малою півсями 6378137 метрів і 6356752,31 метра відповідно. Тому, щоб розрахувати відстані між двома точками, вам потрібно буде використовувати формули для перетворення координат еліпсоїда в декартові. Для цього вам потрібно виконати складні

обчислення з плаваючою комою, які є трудомістким завданням для більшості мікроконтролерів. Щоб спростити обчислення, ви можете обійтися без складних обчислень і фільтрів, не переводячи координати в декартову систему. В результаті приблизно 21% корисних зразків помилково відкидаються при русі в площині і 48% при русі в просторі при фільтрації. При моніторингу транспорту цей відсоток втрати інформації є прийнятним.

2.8.4 Фільтр Калмана

Фільтр Калмана - ефективний (тобто має спосіб гарантовано досягати результат за кінцеве число дій) рекурсивний фільтр, що оцінює вектор стану динамічної системи, використовуючи ряд неповних і зашумлених вимірювань. Названий на честь Рудольфа Калмана [11].

Щоб дати більш повне визначення фільтра Калмана, необхідно ввести ряд необхідних термінів і позначень. Шлях є деяким процесом, для якого існує фізична модель. Нехай також існують деякі вимірювання, пов'язані з цим процесом. У k -ий момент часу вектор станів виражається через вектор станів $(k - 1)$ - го моменту часу x_{k-1}

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}, \quad (2.17)$$

де: $A - n \times t$ – матриця фізичної моделі процесу; $B - n \times t$ – матриця управління процесом; u – вектор управління розмірності s ; w – вектор похибки розмірності n , характеризуючий похибку фізичної моделі.

Цей алгоритм використовується в управлінні багатьма складними динамічними системами, оскільки, це математичний пристрій, який можна використовувати для згладжування даних на льоту, не накопичуючи їх для аналізу. Керуючи динамічною системою, спочатку необхідно повністю знати її фазовий стан. Однак не завжди можливо виміряти всі змінні, що підлягають контролю. У цих випадках фільтр Калмана є засобом для відновлення відсутньої

інформації за допомогою наявних неточних (шумних) вимірювань.

Він також використовується для обробки даних з датчиків та будь-яких пристроїв. Такі показники, як правило, схильні до шуму і відхилень, їх потрібно відсікати. Фільтр Калмана дозволяє відкинути піки (викиди) та відобразити середню, найімовірнішу, картину процесу.

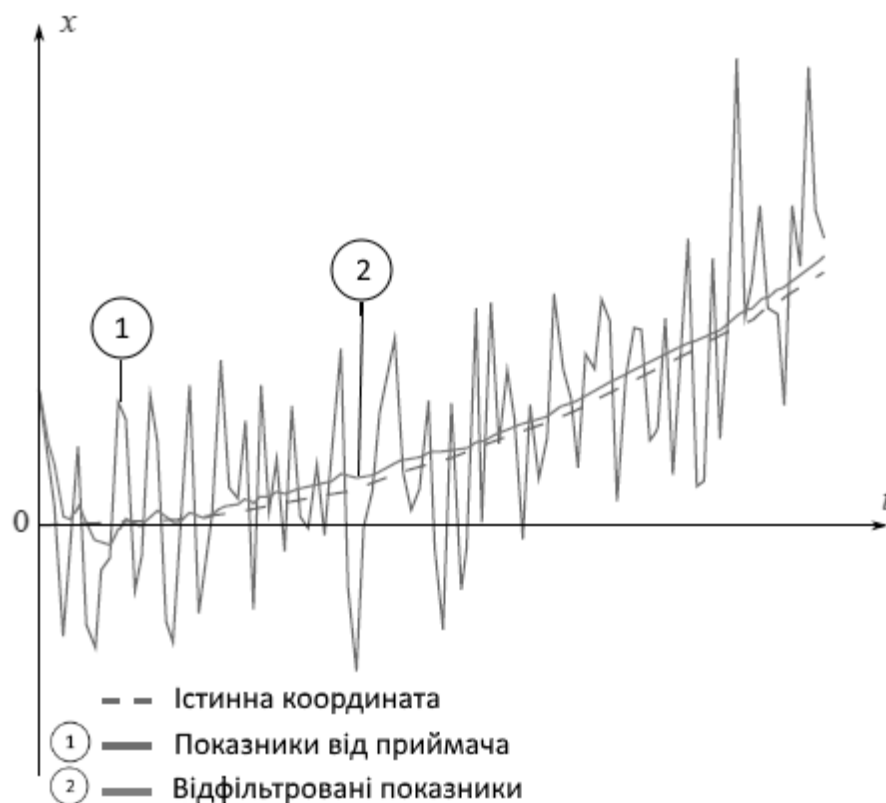


Рис. 2.7. Дані, отримані з імітаційного GPS приймача

На рисунку 2.7 показані дані, отримані від змодельованого GPS-приймача. Використання фільтра Калмана дозволяє встановити інформацію про тип системи, взаємозв'язку змінних і на цій основі скласти більш точну оцінку, оскільки можливо окремо враховувати помилки вимірювання і випадкові процеси.

Фільтр Калмана не вимагає, щоб всі попередні дані зберігалися в пам'яті і оброблялися на кожній новій ітерації. Це має вирішальне значення для практичності реалізації фільтра. "Фільтр" являє собою додаток, що працює в процесорі. Таким чином, він по суті включає в себе дискретні вимірювання, а не

безперервні вхідні дані. На малюнку 2.8 показана типова ситуація, коли фільтр Калмана можна використовувати безпосередньо. Деякі системи управляються деякими відомими контролерами, а вимірювальні пристрої забезпечують значення певних відповідних розмірів. Знання цих системних входів і виходів - це все, що явно виходить з фізичної системи для цілей оцінки.

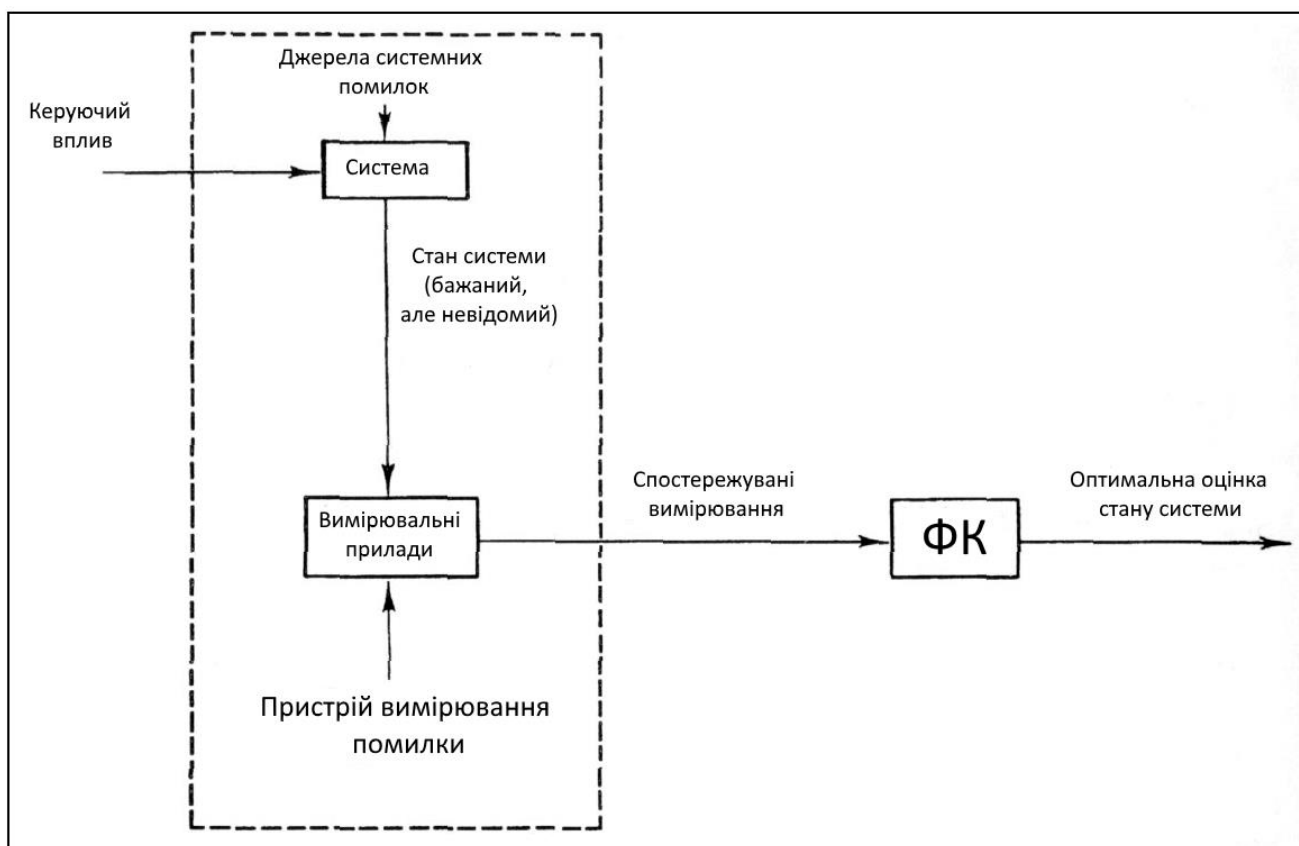


Рис. 2.8. Типове застосування фільтра Калмана

3 ВПЛИВ ЗАСТОСУВАННЯ ФІЛЬТРУ КАЛМАНА НА ТОЧНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

3.1 Передумови до застосування

Часто змінні, що представляють інтерес в системі, кінцева кількість значень для опису" стану " системи, не можуть бути виміряні безпосередньо і необхідно визначити деякі способи виведення цих значень із наявних даних. Наприклад, система повітряних даних безпосередньо забезпечує статичний і динамічний тиск, з якого повинна бути отримана швидкість. Цей висновок ускладнюється тим, що система зазвичай управляється вхідними даними, відмінними від наших власних відомих елементів управління, і що відносини між різними контрольними змінними і вимірними виходами відомі тільки з деякою невизначеністю.

Крім того, кожен вимір в деякій мірі спотворюється шумом, спотвореннями і неточностями пристроїв, тому також необхідно надати засіб для вилучення цінної інформації з шумового сигналу. Як правило, може бути багато різних вимірювальних приладів, кожен зі своїми характеристиками і характеристиками помилки, які надають деяку інформацію про конкретну змінної, і бажано систематично і оптимально комбінувати їх результати. Фільтр Калмана об'єднує всі доступні дані вимірювань і попередні знання системи і вимірювальних приладів, щоб отримати оцінку бажаних розмірів, щоб статистично мінімізувати помилку.

Іншими словами, скільки б неодноразово запускалося б фільтрів-кандидатів для одного і того ж самого додатка, середні результати фільтрації Калмана були б краще, ніж середні результати всіх інших. Концептуально ідея будь-якого типу фільтра полягає в тому, щоб спробувати створити та отримати "оптимальну" оцінку бажаних значень з даних, що надаються зашумленим середовищем («оптимальна» – означає, що в деякому відношенні вона мінімізує помилки).

Фільтр Калмана виконує завдання, в яких система може бути описана лінійною моделлю і де система і вимірювальний шум мають білий і гаусоподібний характер. У цих умовах середнє значення, режим, медіана і практично будь-який розумний вибір збігаються для "оптимальної" оцінки, тому насправді існує однозначна "краща" оцінка.

Лінійна модель системи виправдана з кількох причин. Часто така модель підходить для цієї мети, і якщо існують нелінійності, типовим технічним підходом є лінеаризація по відношенню до номінальної точки або траєкторії, досягнення моделі збуреності або моделі помилок. Лінійні системи мають пріоритет, оскільки з ними простіше поводитися за допомогою інженерних інструментів, а теорія лінійних систем (диференціальних рівнянь) набагато більш повна і практична, ніж нелінійні.



Рис. 3.1. Цикл корекції прогнозу

Для використання фільтра Калмана необхідно, щоб досліджуваний процес описувався наступним чином

$$s_k = A_k s_{k-1} + B_k u_{k-1} + w_k \quad (3.1)$$

$$z_k = H_k s_k + v_k \quad (3.2)$$

У формулі (3.1) $s_k \in R^n$ – вектор стану процесу, A – матриця розмірністю $n \times n$, котра описує перехід спостережуваного процесу із стану s_{k-1} у стан s_k . Вектор $u_k \in R^1$ описує керуючий вплив на процес. Матриця B розмірністю $n \times 1$ відображає вектор керуючих впливів u у зміні стану s . $w_k \in R^n$ є випадковою величиною, що описує похибку досліджуваного процесу, причому $p(w) \sim N(0, Q)$, де Q – коваріаційна матриця похибок процесу.

Так як досліджується процес руху об'єкта, рівняння стану складається, виходячи із рівняння руху тіла $\bar{r}_k = \bar{r}_{k-1} + \bar{v}_{k-1} dt_k + \bar{a}_{k-1} \frac{dt_k^2}{2}$. Крім того, відсутня додаткова інформація про процес руху, тому рахується, що керуючий вплив u_k дорівнює 0. За стан процесу прийнятий вектор

$$S_k = [x_k \quad y_k \quad v_k^x \quad v_k^y]^T \quad (3.3)$$

де x, y – координати об'єкта, v_k^x, v_k^y – проекція швидкості об'єкта. Таким чином, для розглядаемого процесу рівняння 1 приймає наступний вигляд:

$$s_k = A_k s_{k-1} + G_k a_k \quad (3.4)$$

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & dt_k & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dt_k \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$a_k = \begin{bmatrix} a_k^x \\ a_k^y \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$G_k = \begin{bmatrix} \frac{dt_k^2}{2} & 0 \\ 0 & \frac{dt_k^2}{2} \\ dt_k & 0 \\ 0 & dt_k \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$Q_k = G_k G_k^T \sigma_a^2 \quad (3.8)$$

Вектор вимірювань z_k для цієї задачі можна представити наступним чином:

$$z_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ v_k^x \\ v_k^y \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

де, x_k, y_k - координати об'єкта, отримані від датчика, v_k^x, v_k^y - швидкість об'єкта, отримані від датчика.

Матриця H у Формулі (3.2) приймається рівною одиничній матриці розмірністю 4×4 , так як в рамках даної задачі вважається, що виміром є лінійна комбінація вектора стану і деяких випадкових похибок. Коваріаційна матриця похибки вимірювань R вважається заданою. Один з можливих варіантів її обчислення - використання даних про передбачувану точність вимірювання, одержуваних від датчика.

3.2 Застосування фільтра Калмана до побудованої моделі

Для застосування фільтра необхідно ввести такі поняття:

\hat{S}_k - апостеріорна оцінка стану об'єкта в момент k , отримана за результатами спостережень аж до моменту k включно;

$\hat{S}_{\tilde{k}}$ - нескоригована апостеріорна оцінка стану об'єкта в момент часу k ;

P_k - апостеріорна коваріаційна матриця помилок, що задає оцінку точності

отриманої оцінки вектора стану і включає оцінку дисперсій похибки обчисленого стану та коваріації, що показують виявлені взаємозв'язки між параметрами стану системи;

$P_{\tilde{k}}$ - нескоригована апостеріорна коваріаційна матриця помилок.

Матриця P_0 визначається як нульова, оскільки вважається, що відомо початкове положення об'єкта.

Один цикл фільтру Калмана складається з двох етапів: передбачення та корекція.

1. На етапі екстраполяції обчислюється оцінка $\hat{S}_{\tilde{k}}$ за оцінкою вектора стану $\hat{S}_{\tilde{k}-1}$ та матриця помилок $P_{\tilde{k}}$ за наступними формулами:

$$\hat{S}_{\tilde{k}} = A_k \hat{S}_{\tilde{k}-1} \quad (3.10)$$

$$P_{\tilde{k}} = A_k P_{\tilde{k}-1} A_k^T + Q_k \quad (3.11)$$

де матриця A_k відома з формули (3.5), матриця Q_k обчислюється за формулою (3.8).

2. На етапі корекції обчислюється матриця коефіцієнтів посилення K_k за такою формулою:

$$K_k = P_{\tilde{k}} H^T (H P_{\tilde{k}} H^T + R)^{-1} \quad (3.12)$$

де R , H вважаються відомими. K_k використовується для корекції оцінки стану об'єкта $\hat{S}_{\tilde{k}}$ і коваріаційної матриці помилок $P_{\tilde{k}}$ наступним чином:

$$\hat{S}_k = \hat{S}_{\tilde{k}} + K_k (z_k - H \hat{S}_{\tilde{k}}) \quad (3.13)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_{\tilde{k}} \quad (3.14)$$

де I – одинична матриця.

Слід зазначити, що з використання зазначених вище співвідношень, необхідно, щоб параметрів об'єкта, що у обчисленнях, одиниці вимірів були узгоджені. Однак у вихідних даних широта та довгота наводяться у кутових координатах, а швидкість – у метричних. Крім того, прискорення для розрахунку помилки процесу також зручніше задавати у метричних одиницях. Для перекладу швидкості та прискорення в кутові одиниці використовуються формули Вінченці [14]

Проте загальна теорія фільтрів Калмана застосовується до оцінок для векторів з точністю оцінок, представлених коваріаційними матрицями. Однак, щоб оцінити місце розташування на пристроях Android, Загальна теорія сходиться до іншого випадку. Провайдери-постачальники навігаційних даних Android визначають місце розташування в широті і довготі, а також точність, яка визначається як одне число в метрах. Це означає, що замість коваріаційної матриці точність фільтра Калмана може бути виміряна одним числом, хоча положення в фільтрі Калмана вимірюється двома числами. Також можна ігнорувати той факт, що широта, довгота і метр насправді є різними одиницями виміру, тому що якщо ви помістите коефіцієнти масштабування в фільтр Калмана, щоб перетворити їх все в одні і ті ж одиниці виміру, ці коефіцієнти масштабування будуть повернуті до вихідних одиниць при перетворенні результатів

3.3 Оцінка точності характеристик супутникових радіонавігаційних систем

Вихідні дані, отримувані від доступних пристрою джерел, включають у себе моментальні характеристики розташування[12]:

- широта (lat, град) – широта поточної точки;
- довгота (lon, град) – довгота поточної точки;
- швидкість (spd, м/с) – моментальна швидкість в поточній точці;
- точність – радіус кола, в якому знаходяться поточні координати;

- час (t , мс) – час фіксації місце розташування.

Як приймач використовується смартфон на базі ОС Android . Дані збираються для обробки додатком, яке реєструє інформацію про об'єкт (широта, довгота, час, швидкість, тип Постачальника, точність). Кількість набраних точок на маршруті-68. Тайм-аут між точками під час збору - 15 сек. [16] результатом фільтра є послідовність координат з скоригованою широтою і довготою. [20]



Рис. 3.2. Оригінальний маршрут рухомого об'єкта

На рис. 3.3 та 3.4 показано загальний вигляд треку до обробки[12].



Рис. 3.3. Загальний маршрут досліджуваного об'єкта

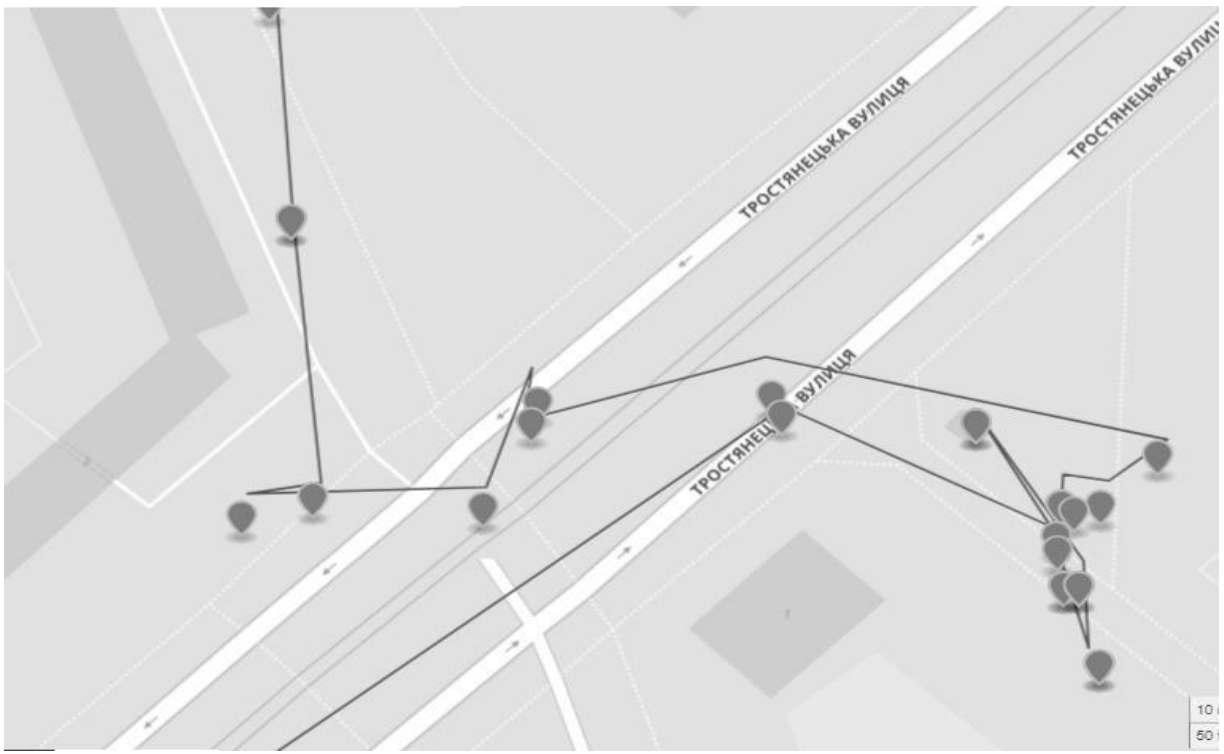


Рис. 3.4. Візуалізація «викидів»

На рис. 3.4 видно, що в цьому прикладі є координати з високим ступенем похибки, яка виражається в наявності "викидів" - координат, які значно відхиляються від основного маршруту.[20]

Використовуючи фільтр, "викиди" можна усунути, а доріжку згладити. Як результат, у нас майже немає "піків", крім найбільших, які ж в свою чергу були зменшені (рис. 3.5).

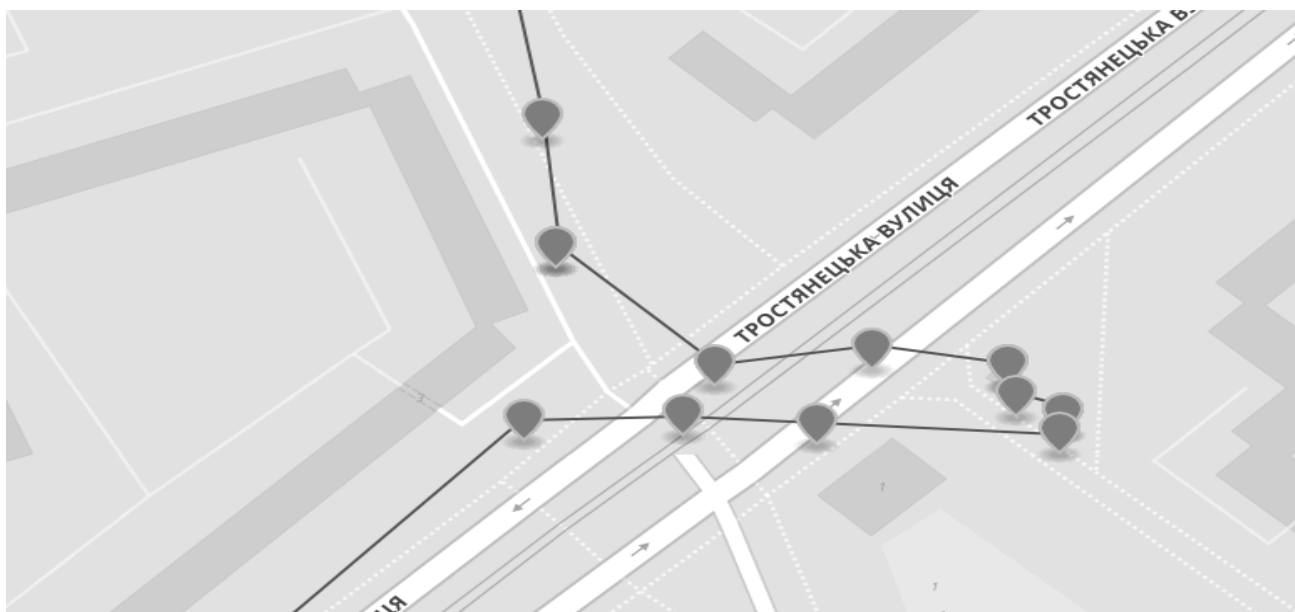


Рис. 3.5. Відфільтрований трек

На рис. 3.6 показано графік з показниками точності зібраних невідфільтрованих даних у кожній точці. Середнє значення точності – 25,2 м

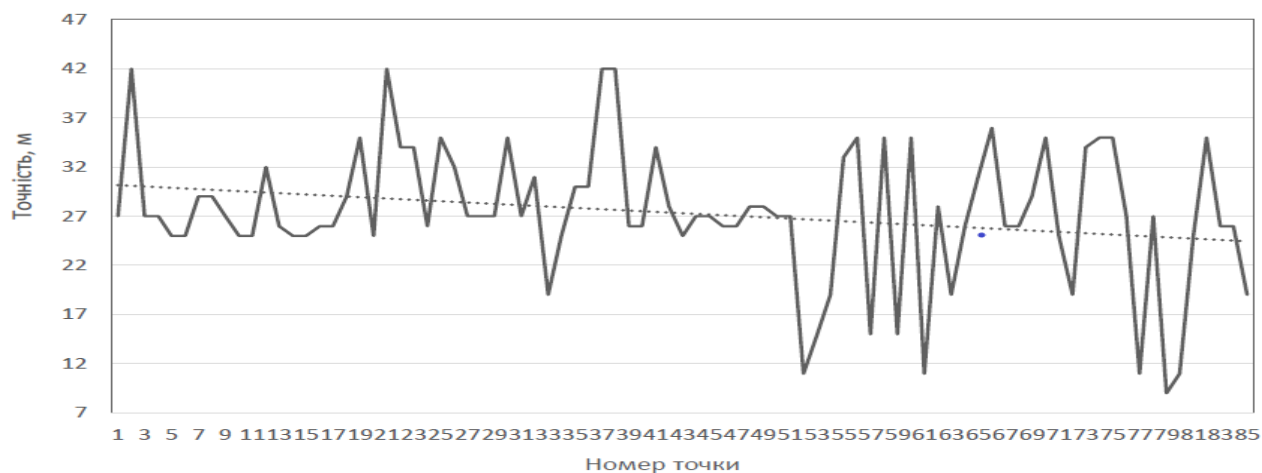


Рис. 3.6. Графік точності у кожній точці до обробки

На рис. 3.7 показано графік з показниками точності зібраних даних, до яких було застосовано фільтр Калмана. Середнє значення точності зменшилося до 11 м.[20]

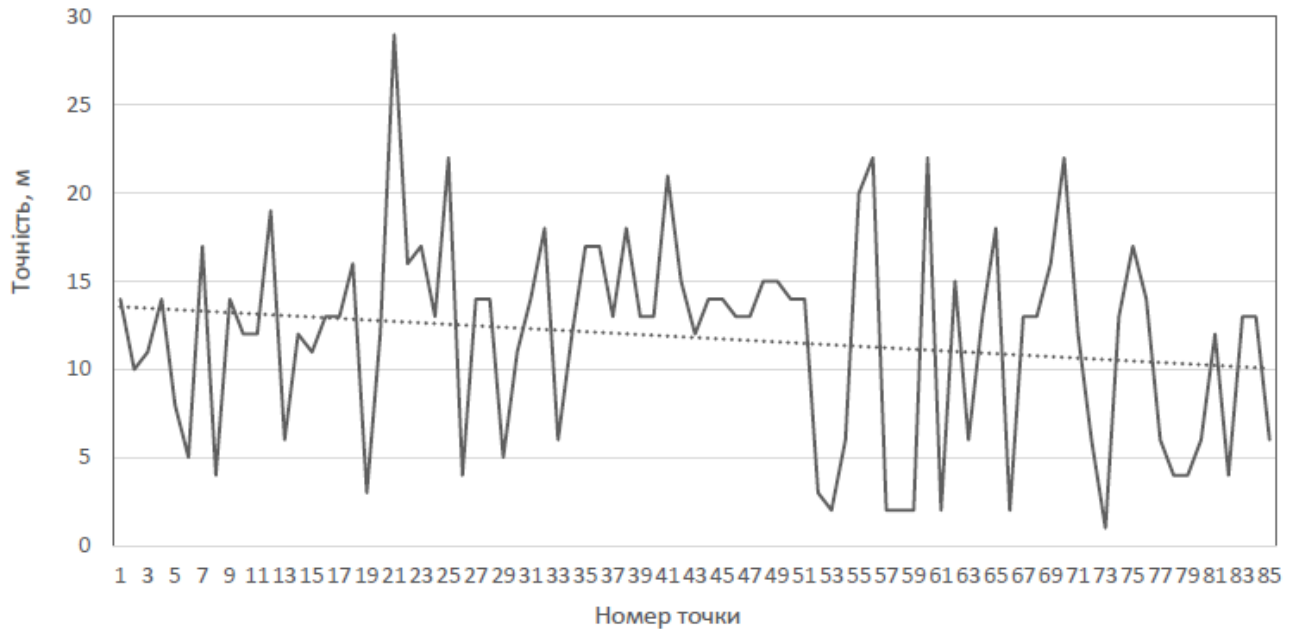


Рис. 3.7. Графік точності у кожній точці після обробки даних

ВИСНОВКИ

Магістерська кваліфікаційна робота складається з трьох частин, присвячена аналізу експлуатаційних характеристик супутникових навігаційних систем.

Для досягнення мети в роботі виконано:

- огляд існуючих супутникових радіонавігаційних систем та принципи їх роботи;
- аналіз основних характеристик супутникової навігаційної системи;
- аналіз методу підвищення точності місця розташування за допомогою фільтрації навігаційних даних.

Можна зробити висновок, що основні експлуатаційні характеристики пов'язані з точністю визначення координат приймача. Очікується, що з урахуванням поточного стану розвитку технологій продуктивність в області супутникового життя, методів обробки даних і методів передачі інформації покращиться.

У зв'язку з планами з модернізації системи GPS ми можемо згадати основні можливості, які вона відкриє для підвищення точності. Два нові додаткові кодовані цивільні сигнали (код C / A в L2 і новий сигнал в L5) підвищують продуктивність користувачів в програмах, які забезпечують високоточні вимірювання на довгих і коротких базових лініях – наприклад, для точного заходу на посадку і автоматичної посадки, картування, зйомки і геофізичних вимірювань, оскільки час дозволу зменшується для неоднозначності, а довжина базової лінії збільшується, що дозволяє використовувати найкращу іоносферну корекцію для великих площ. Ці заходи підвищать точність автономного визначення місця розташування. Наукові та геодезичні вимірювання, які не використовують режим реального часу, досягають сантиметрової точності швидше і з меншими витратами, ніж зараз. Це стане можливим завдяки використанню трьох частот, щоб полегшити процес вирішення неоднозначності при виконанні високоточних вимірювань фази. Це також знижує ймовірність випадкового збою системи GPS. Використання супутникового зв'язку і установка більш потужних комп'ютерних

систем значно розширить можливості системи.

Головною проблемою супутникових навігаційних систем для рядових користувачів залишається недостатня точність місцевизначення через ряд причини, таких як втрата сигналу від супутника, зміна геометрії розташування супутників, відображення сигналів, обчислювальні помилки та помилки округлення, підсумковий результат не відповідає точності маршруту об'єкта.

В рамках цієї роботи були розглянуті різні засоби обробки навігаційних даних. Детально розглянуто підхід до корекції координат GPS з використанням фільтра Калмана. Цей фільтр працює в режимі реального часу, звільняючи мобільний термінал від збору даних, згладжуючи "викиди", що покращує візуальне сприйняття треку. Був запропонований експериментальний метод фільтрації навігаційних даних на основі фільтра Калмана для підвищення точності і надійності отриманих даних. Використання фільтра Калмана в супутниковій радіонавігаційній системі дозволить підвищити точність на 40-60 відсотків та усунути найбільш помітні спотворення маршруту, що демонструє застосування даного методу до завдання згладжування маршруту та усунення піків.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Спутниковая система навигации [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Спутниковая_система_навигации (01.11.2021).
2. ГЛОНАСС [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ГЛОНАСС> (02.11.2021).
3. Спутниковая система навигации [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Спутниковая_система_навигации (02.11.2020).
4. Никитенко Ю.И. Глобальная спутниковая радионавигационная система “НАВСТАР”. М.: В/О Мортехинформреклама, 1991.
5. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. Москва: Эко-Тредз, 2000, 260 с
6. Кошелев А. В., Синякин А. К. Физические принципы работы GPS/ГЛОНАСС. Монография – Новосибирск: СГГА, 2009. – 110 с.
7. Навігаційне забезпечення Збройних Сил України з використанням космічних систем Монографія / С. В. Козелков, К. С. Козелкова, С. М. Неділько та ін.; за ред. С. М. Неділько – Кіровоград: Вид-во КЛА НАУ, 2013 р. – 628 с.
8. Бонч-Бруевич А.М., Быков В.Л., Кантор Л.Я. и др.; под ред. Л.Я. Кантора. Системы спутниковой связи. М.: Радио и связь, 1992.
9. Липкин И.А. Спутниковые навигационные системы. М.: 2006.
10. Lachapelle G. Navigation Accuracy for Absolute Positioning, AGARD Lecture Series 207, System Implications and Innovative Applications of Satellite Navigation, NATO, 1996, pp 4.1-4.10.
11. Greg Welch and Gary Bishop, An Introduction to the Kalman Filter. Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill, 2006
12. “Обработка GPS координат з використанням Калманівської фільтрації” – Науковий журнал “Проблеми програмування” – 2018 – №1 – С. 105-111.

13. Vincenty T. Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations // Survey Review. 1975. apr. Vol. 23. No. 176. PP. 88–93.
14. Гришин М.Л., Данилкин Ф.А. Метод быстрой фильтрации потока данных о глобальной позиции наблюдаемого объекта на примере GPS-телеметрии // Геоинформатика, 2008. № 3.
15. GPS – История, применение, преимущества и недостатки [Электронный ресурс] – Режим доступа: ru.navirec.com > F.A.Q (дата звернения: 25.11.2021) – Назва з екрану.
16. Приложения на Google Play – GPS Test [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.chartcross.gpstest> (дата звернения: 01.12.2020) – Назва з екрану.
17. Харисов В.Н., Яковлев А.И., Глущенко А.Г. Оптимальная фильтрация координат подвижного объекта // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 23. – № 7. – С. 1441–1452.
18. Бейлина Н.В. Блочно-временной алгоритм фильтрации геолокационных данных // Вестн. СамГУ. Естественнонаучн. сер., 2013. № 9/1(110). С. 212–215.
19. Алгоритм_Рамера_—_Дугласа_—_Пекера [Электронный ресурс] Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Рамера_—_Дугласа_—_Пекера (01.12.2021)
20. Кирильчук П.В. Аналіз експлуатаційних характеристик // Бакалаврська робота 2020.