

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА АЕРОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
д-р техн. наук, проф.
В.Ю. Ларін
«_»_____2020 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА
ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ
«СИСТЕМИ АЕРОНАВІГАЦІЙНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ»

Тема: «Оцінка точності супутникової системи Beidou»

Виконав: _____ **В.І.Савицький**

Керівник: д-р техн. наук, проф. _____ **О.С. Погурельський**

Нормоконтролер _____ **Т.Ф. Шмельова**

Київ 2020

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
NATIONAL AVIATION UNIVERSITY
FACULTY OF AIR NAVIGATION, ELECTRONICS AND
TELECOMMUNICATIONS
AIR NAVIGATION SYSTEMS DEPARTMENT

PERMISSION FOR DEFENCE

Head of the Department

Doctor of Sciences (Engineering),

prof.

_____ **V.Yu. Larin**

" _____ " _____ **2020**

MASTER'S THESIS
ON THE EDUCATIONAL PROFESSIONAL PROGRAM
"SYSTEMS OF AIR NAVIGATION SERVICE"
(EXPLANATORY NOTE)

Theme: " Beidou system accuracy estimation "

Performed by: _____

Supervisor: Candidate of Sciences
(Engineering) _____

O.S. Pogurelskyi

Standard inspector _____

T.F. Shmelova

KYIV 2020

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Кафедра аеронавігаційних систем
Освітня ступінь «Магістр»
Спеціальність 272 «Авіаційний транспорт»
Освітньо-професійна програма «Системи аеронавігаційного обслуговування»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д-р техн. наук, проф.
В.Ю. Ларін
«___» ____2020 р.

ЗАВДАННЯ

**на виконання дипломної роботи
Савицького Владислава Ігоревича**

1. Тема дипломної роботи: «Оцінка точності супутникової системи Beidou» затверджена наказом ректора від 12.11.2019 №2807/ст
2. Термін виконання роботи: 15.10.2019 - 10.02.2020.
3. Вихідні дані до дипломної роботи: нормативна документація розробників та експлуатантів навігаційної супутникової системи Beidou, керівництво користувача супутникового навігаційного приймача серії OEM.
4. Зміст пояснювальної записки: Аналіз сучасного стану та планів модернізації глобальних супутникових навігаційних систем. Огляд супутникової навігаційної системи Beidou. Структура та формати даних навігаційних повідомлень Beidou. Постановка завдання та опис схеми дослідження. Експериментальна оцінка точності навігаційних визначень з використанням даних від системи Beidou. Висновки
5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: графіки, таблиці, скріншоти. Графічний (ілюстративний) матеріал виконано з використанням Microsoft Office Visio, PowerPoint і представлено у вигляді презентацій.

6. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Попередній аналіз проблеми, підготовка та написання 1 розділу «Сучасні глобальні навігаційні системи»	15.10.19 – 28.10.19	
2	Формулювання цілей та завдань дослідження, написання 2 розділу «Технічне завдання»	29.10.19 – 11.11.19	
3	Вибір системи та написання 3 розділу «Китайська навігаційна супутникова система BeiDou»	12.11.19 – 9.12.19	
4	Проведення комплексу експериментальних досліджень, написання 4 розділу «Апаратно-програмний комплекс моделювання характеристик супутникової системи Beidou»	10.12.19 – 22.12.19	
5	Підготовка доповіді та презентаційних матеріалів.	14.01.19 – 25.01.20	

Дата видачі завдання 15.10. 2019 р.

Керівник дипломної роботи _____ Погурельський Олексій Сергійович

Завдання прийняв до виконання _____ Савицький Владислав

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Оцінка точності супутникової системи Beidou» містить 81 сторінки, 32 рисунка, 6 таблиць, 29 використаних джерел.

Об'єкт дослідження – Китайська навігаційна супутникова система Beidou.

Предмет дослідження – характеристики китайської навігаційної супутникової системи Beidou в довільний момент часу.

Мета роботи – оцінка доступності та точності китайської навігаційної системи для прогнозу характеристик ГНСС на території України.

Методи дослідження – огляд наявної технічної та наукової інформації про склад і призначення існуючих супутникових навігаційних систем, аналіз наявної інформації системи Beidou, систематизація існуючих методів і алгоритмів навігаційних визначень, статистична оцінка експериментальних результатів по методу оцінки точності Beidou.

ГЛОБАЛЬНА НАВІГАЦІЙНА СУПУТНИКОВА СИСТЕМА, КИТАЙСЬКА НАВІГАЦІЙНА СИСТЕМА BEIDOU, ЦІЛІСНІСТЬ, ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ГЛОБАЛЬНІ НАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ.....	13
1.1 Сучасний розвиток глобальних навігаційних систем	13
1.2 Склад глобальної навігаційної супутникової системи	21
1.3 Вимоги до навігаційних супутникових систем в системах CNS/ATM	24
Висновки до розділу 1	27
РОЗДІЛ 2.ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	28
РОЗДІЛ 3 Китайська навігаційна супутникова система BeiDou	32
3.1 Цілі та призначення навігаційної супутникової системи BeiDou	32
3.2 Космічний сегмент навігаційної супутникової системи BeiDou	40
3.3 Структура та характеристика навігаційного сигналу BeiDou	43
3.4 Структура навігаційного повідомлення в системі BeiDou	47
Висновки до розділу 3	55
РОЗДІЛ4.АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ BEIDOU	56
4. 1 Методика запису навігаційного повідомлення BeiDou та налаштування приймача	56
4.2 Експериментальне дослідження точності системи BeiDou	59
4.3 Результати експериментальних досліджень оцінки точності BeiDou	61
Висновки до розділу4	72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	73
Перелік посилань	74
Додаток 1.....	77
Додаток 2.....	80
Додаток 3.....	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ГЛОНАСС	глобальна навігаційна супутникова система Росії
ГНСС	глобальна навігаційна супутникова система, що складається з діючих і перспективних систем супутникової навігації та їх функціональних доповнень
ККС	контрольно-корегуючі станції
СКВ	середньоквадратичне відхилення
СНГ	Союз незалежних країн
АВАС	Aircraft Based Augmentation System (Бортова система функціонального доповнення)
Beidou	Навігаційна супутникова глобальна система КНР
BDCS	BeiDou Coordinate System (Китайська координатна система)
BDT	BeiDou Time
BPSK	Binary Phase Shift Keying (двухпозиційна фазова маніпуляція)
CDMA	Code Division Multiplex Access (кодове розподілення каналів)
EGNOS	European Geostationary Overlay Service (Європейська система функціонального доповнення до ГНСС)
EUROCONTROL	Європейська організація по безпеці повітряної навігації
FANS	Future Air Navigation System (спеціальний комітет по майбутнім аеронавігаційним системам)
Galileo	глобальна навігаційна супутникова система Європейського Союзу
GAGAN	GPS-aided GEO augmented navigation (Індійська

	регіональна супутникова система диференційної корекції)
GBAS	Ground Based Augmentation Systems (Наземна система функціонального доповнення)
GEO	Geostationary Earth Orbit (Геостационарна орбіта)
GPS	Global Positioning System (Глобальна навігаційна супутникова система NAVSTAR США)
GNSS	Global Navigation Positioning System (Глобальна навігаційна супутникова система)
ICAO	International Civil Aviation Organization (Міжнародна Організація Цивільної Авіації)
ICG	Міжнародний комітет із глобальної навігаційної супутникової системи
IGSO	Inclined Geosynchronous Orbit (Похила геосинхронна орбіта)
IERS	International Earth Rotation and Reference System Service
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System (Індійська регіональна навігаційна супутникова система)
IRP	IERS Reference Pole
IRM	IERS Reference Meridian
ITU	International Telecommunication Union
MEO	Medium Earth Orbit (Середня навколоземна орбіта)
MSAS	Multifunctional Transport Satellite-Based Augmentation System the Japanese FIR (Система космічного функціонального доповнення Японії)
CNS/ATM	Communication, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management (Зв'язок, Навігація, Спостереження/Управління повітряним рухом)

CGCS2000	China Geodetic Coordinate System 2000 (Китайська геодезична система координат 2000)
SATNAV	Satellite Navigation Programme
SBAS	Space Based Augmentation Systems (Космічна система функціонального доповнення)
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring (Російська космічна система функціонального доповнення)
UTC	Universal Coordinated Time (Всесвітній координований час)
QPSK	Quadrature phase shift keying (Квадратурний фазовий зсув)
WAAS	Wide Area Augmentation System (Широкозонна система функціонального доповнення США)
WADGPS	Wide Area differential GPS (Широкозонна система функціонального доповнення, Південна Корея)

ВСТУП

Після початку розгортання супутникових систем в 60-х роках минулого століття людство вступило в епоху супутникових технологій, яка продовжує успішно розвиватися і на далі.

На сьогоднішній день існує 4 глобальні супутникові системи, які перебувають на різних стадіях розвитку. Кожна з цих систем складається не тільки з космічного сегменту, а має також наземні станції моніторингу та управління, які розташовані по всій поверхні Землі, що робить реалізацію та обслуговування доволі складним та дорогим. Тому, розробку таких систем могли собі дозволити тільки потужні країни з сильною економікою.

Сполучені Штати Америки розробили систему GPS, Російська Федерація, правонаступниця Радянському Союзу, продовжує модернізувати систему ГЛОНАСС, свої системи почали розгортати Європейський союз (система GALILEO) та Китайська Народна Республіка (система BeiDou).

Основною метою супутникових навігаційних систем є забезпечення потреб у високоточному визначенні місцеположення як для цивільних, так і для військових користувачів. Для підвищення точності визначень позиціонування в подальшому були розроблені космічні та наземні функціональні доповнення.

Зважаючи на мирові тенденції розвитку супутникових технологій Китайська Народна Республіка поставила за мету розробити власну незалежну супутникову систему, яка б на першому етапі забезпечувала потреби власних користувачів навігаційної інформації, а в подальшому мала б і глобальне покриття. Також китайська навігаційна супутникова система має працювати з усіма існуючими навігаційними супутниковими системами.

Для досягнення цієї мети були розроблені три етапи розвитку системи BeiDou, які поступово втілюються в життя.

Особливістю китайської навігаційної супутникової системи є те, що в своєму складі вона має не тільки супутники на середніх орбітах, а і

супутники на геостаціонарних і геосинхронних орбітах, що дозволить значно розширити зону покриття системи та сприятиме покращенню точності визначення.

Поточний етап розвитку системи BeiDou знаходиться на завершальній стадії, що дозволяє тестувати, планувати та виконувати дослідження її параметрів і характеристик як самостійно, так і в комплексі з іншими системами.

Комплексні дослідження можуть бути продовженням експериментів проведених в цій роботі, присвяченій оцінці точності глобальної навігаційної супутникової системи BeiDou.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ГЛОБАЛЬНІ НАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ

В розділі виконується огляд існуючих навігаційних супутникових систем, їх розвиток та модернізація. Аналізується структура, склад та модернізація глобальної навігаційної супутникової системи.

1.1 Сучасний розвиток глобальних навігаційних систем

Впровадження супутникових технологій в повсякденне життя набуває масштабний характер. Все більше країн намагаються розгорнути та впровадити в життя свої проекти в сфері супутникової технології. Підтвердженням цього є розробка таких проектів, як японський проект MSAS, індійський проект GAGAN та інші. А також подальший розвиток європейської супутникової системи GALILEO та китайської супутникової системи Beidou, продовжується модернізація існуючих супутникових систем GPS та ГЛОНАСС.

Сучасний стан глобальної навігаційної супутникової системи зображено на рис.. 1.1.

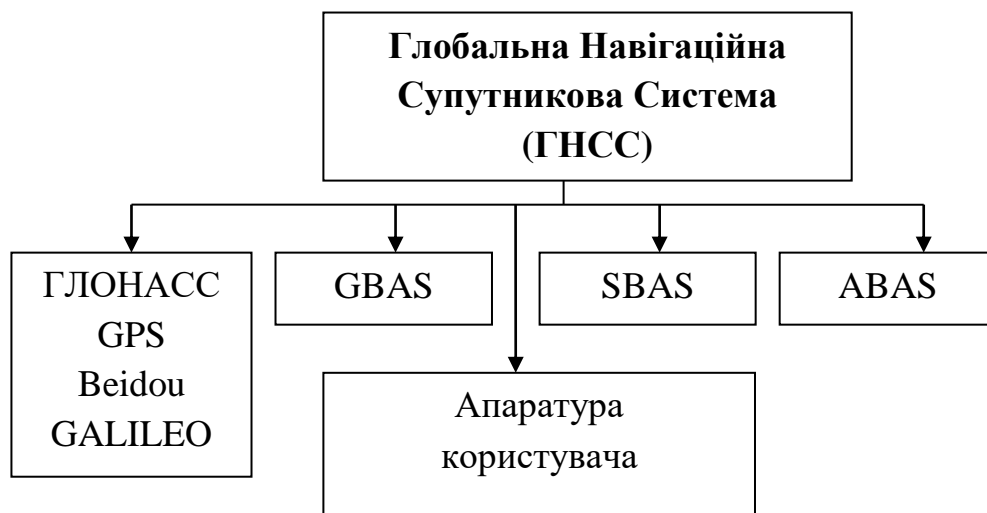


Рис. 1.1 Сучасний стан GNSS

Ринок супутникових технологій стрімко та швидко розвивається. Про це свідчить численність країн, які впроваджують супутникові технології в різні сфери економіки.

Згідно офіційній документації ICAO основою супутникової навігації є дві системи – це ГЛОНАСС та GPS. Система ГЛОНАСС була розроблена Російською Федерацією, а система GPS є власністю Сполучених Штатів Америки.

У 2012 році Російська Федерація прийняла програму «Підтримка, розвиток та використання системи ГЛОНАСС» на 2012-2020 рр..Ця програма впроваджує супутникову систему в таких розділах «Створення та оновлення карт», «Цивільне використання ГЛОНАСС» та інше, а також оснащення приймачами ГЛОНАСС міського транспорту, машин швидкої допомоги та служб МЧС. Таким чином, Російська Федерація просуває свою систему на внутрішній та зовнішній ринок супутникових технологій, а також це дає можливість охопити ринок колишніх країн СНГ. Орбітальне угруповання системи ГЛОНАСС зображено на рис. 1.2. [8]

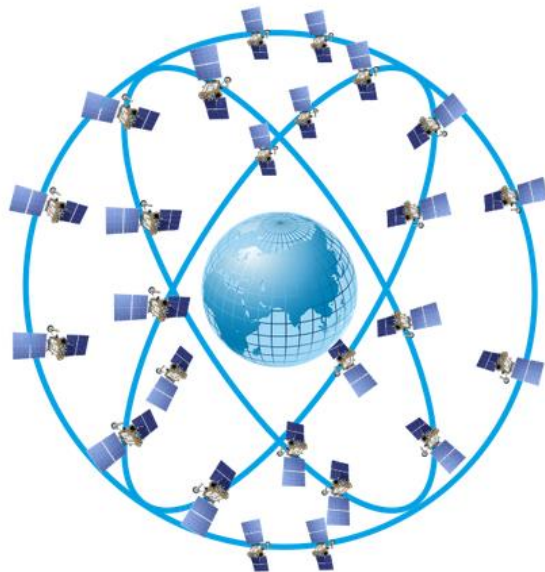


Рис. 1.2 Російська супутникова навігаційна система ГЛОНАСС.

Космічне сузір'я ГЛОНАСС складається з 24 супутників, що знаходяться на середньовисотних орбітах на висоті близько 19100 км, кут нахилу орбітальної площини дорівнює $64,8^\circ$, період одного обертання 11 годин 15 хвилин 44 секунди. Такі орбітальні параметри дозволяють забезпечувати стовідсоткову доступність системи для надання послуг навігації на території Росії, а також в глобальному масштабі.

Також продовжується модернізація та розвиток системи GPS. На сьогоднішній день система налічує 31 супутник, які працюють у штатному режимі та дозволяють отримувати навігаційну інформацію безперервно.

Космічний сегмент GPS складається з 24 оперативних супутників, які зобов'язані 95% часу передавати радіосигнал користувачам. Щоб зберегти функціональність системи протягом останніх декількох років США збільшили кількість до 31 супутника. На рисунку 1.3 зображено космічне сузір'я GPS [7].

Супутники GPS розташовані на середній орбіті Землі (МЕО) на висоті приблизно 20 200 км (12,550 миль). Період обертання супутника навколо Землю двічі на день.

Супутники в розташовані на шести орбітальних площинах, що оточують Землю. Кожна площина містить чотири базові супутники. Цей механізм з 24 супутників забезпечує користувачам можливість отримувати дані з щонайменше чотирьох супутників практично з будь-якої точки планети.

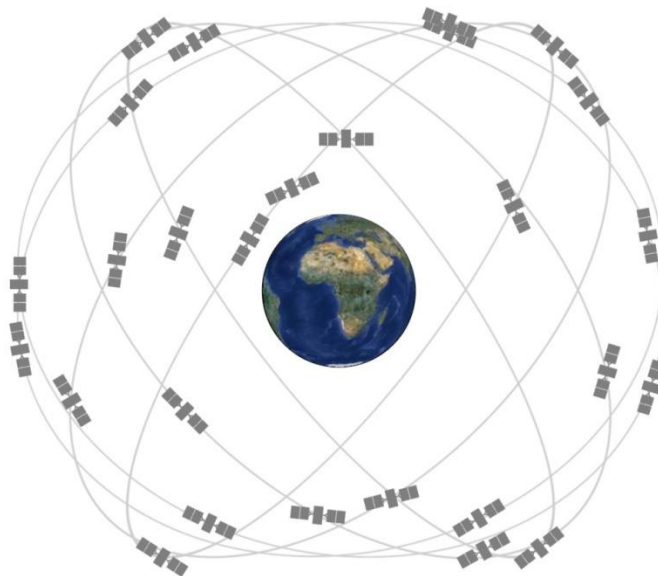


Рис. 1.3 Космічний сегмент системи GPS

Був введений в експлуатацію супутник третього покоління, який передає навігаційні данні для цивільного використання на новій частоті L1C (1575.42 МГц). Це сприяє активній експлуатації американської системи по всьому світові. Сучасний стан модернізації системи GPS представлений в таблиці 1.1. [7,21]

Таблиця 1.1- Модернізація системи GPS

BlockIIA	BlockIIR	BlockIIR-M	BlockIIF	GPSIII/IIF
0 діючих	11 діючих	7 діючих	12 діючих	1 діючий
C/A на частоті L1 для цивільних користувачів	C/A на L1	Усі сигнали	Всі сигнали Block IIR-M	Усі сигнали Block IIF
Точний код P (Y) на частотах L1 і L2 для військових користувачів	P (Y) код на L1 та L2	2-й цивільний сигнал на L2 (L2C)	3-й цивільний сигнал на частоті L5 (L5)	4-й цивільний сигнал на L1 (L1C)
7,5-річний термін експлуатації	Моніторинг годинника на борту	Нові сигнали військового коду M для підвищеної стійкості до пошкодження	Модернізовані атомні годинники	Підвищена надійність, точність та цілісність сигналу
Запущені у 1990-1997 роках	7,5-річний термін експлуатації	Гнучкі рівні потужності для військових сигналів	Підвищена точність та якість сигналу	Немає вибіркової доступності
	Запущені у 1997-2004 роках	7,5-річний термін експлуатації	12-річна термін експлуатації	15-річний термін експлуатації
		Запущені у 2005-2009 роках	Запущені у 2010-2016 роках	Перший запуск у 2018 році

Набуває свого подальшого розвитку і європейська система супутникової навігації GALILEO. Мета впровадження та експлуатації європейської системи – це забезпечення навігаційною інформацією всю територію Європи.

Супутники європейської системи навігації розташовані на середній земній орбіті (МЕО) на висоті 23 222 кілометри. Система складатиметься з трьох орбітальних площин, нахилених під кутом 56° до екватора. На кожній орбітальній площині знаходиться по вісім активних супутників. Супутники будуть рівномірно розподілені на орбітальній площини та період обертання навколо Землі становить близько 14 годин. Ще два супутники на кожній орбітальній площині будуть запасними та працюватимуть у режимі очікування у разі виходу з ладу будь-якого операційного супутника. На рисунку 1.4 зображено космічне сузір'я GALILEO [6,8].

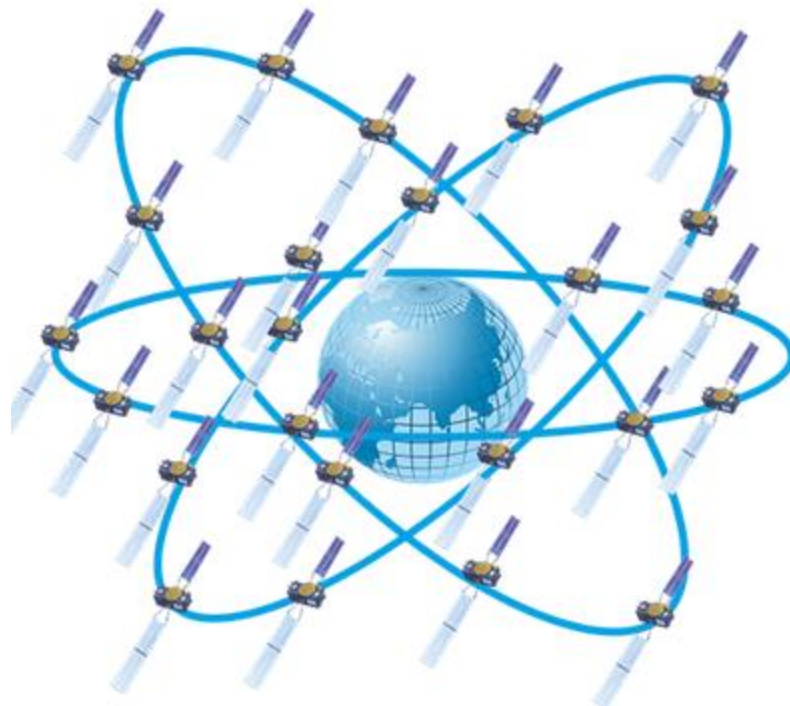


Рис. 1.4 Космічний сегмент системи GALILEO

При повному розгортанні системи GALILEO буде забезпечена ймовірність (понад 90%), що будь-хто в будь-якій точці світу завжди буде отримувати навігаційні дані з щонайменше чотирьох супутників, а отже, зможе визначити своє положення за сигналами, що передаються

супутниками. Нахил орбіт було обрано для забезпечення хорошого покриття полярних широт, які погано обслуговуються системою GPS США.

Незважаючи на місцеположення користувача завжди буде видно шість-вісім супутників, що дозволить визначати положення дуже точно - в межах декількох сантиметрів. Навіть у щільно забудованих містах буде можливість, що над користувачем дорожнього руху буде достатня кількість супутників для визначення координат. Система GALILEO сумісна з американською системою GPS, що збільшує вірогідність отримання навігаційної інформації.

Для надання точної навігації була створена функціональна система доповнення супутникової навігації EGNOS. Цей проект створений за сприянням Європейським космічним агентством, Європейською комісією та Європейською організацією по безпеці повітряної навігації (EUROCONTROL). EGNOS має працювати також з існуючими навігаційними супутниковими системами, забезпечуючи даними з покращеними характеристиками по точності, цілісності, надійності та експлуатаційній готовності та доступності.

Для проведення розрахунків EGNOS використовує вимірювання GNSS, які обчислюються опорними станціями з висоточними координатами. Ці станції розгорнуті по всій Європі. Всі виміряні помилки GNSS переносяться в центральний обчислювальний центр, де розраховуються диференційні виправлення та повідомлення про цілісність. Потім ці обчислення транслюються над охопленою територією за допомогою геостаціонарних супутників, які служать доповненням або накладенням на оригінальне повідомлення GNSS. На рисунку 1.5 зображено розташування опорних станцій на території Європи [6].

Геостаціонарні супутники повинні забезпечити покриття Європи, Африки, Південної Америки та частину Азії. В зону обслуговування системи EGNOS входять Європа, Туреччина, частина Атлантичного океану та Північне море. В подальшому розвитку системи в зону обслуговування планується включити Африку, повністю Південну Америку, країни СНГ.



Рис. 1.5 Розташування опорних станцій EGNOS на території Європи.

В результаті використання EGNOS підвищується точність та надійність інформації про позиціонування GNSS, одночасно надаючи важливе повідомлення про цілісність щодо безперервності та доступності сигналу. Завдяки EGNOS також можливо отримати надзвичайно точний універсальний часовий сигнал.

EGNOS важливий для програм, де точність та цілісність є критичними. Наприклад, лише в авіаційному секторі GNSS не відповідає суворим експлуатаційним вимогам, встановленим Міжнародною організацією цивільної авіації (ICAO) для використання на таких критичних етапах польоту, як кінцеві підходи. Однак із додаванням EGNOS, який сертифікований для цивільної авіації з 2011 року, такі системи, як GPS, можуть відповідати стандартам ICAO. [6-8].

Крім авіаційного сектору, EGNOS вдосконалює та розширює сферу застосування таких програм GNSS, як точне землеробство, управління дорожніми транспортними засобами та навігація суден по вузьких каналах.

Сьогодні EGNOS використовується в багатьох сферах економіки, включаючи авіацію, автомобільні, залізничні, морські, геодезичні, картографічні послуги, сільське господарство.

При повноцінному розгортанні EGNOS забезпечить вимірювання відстаней, а також буде надавати інформацію про цілісність навігаційних супутникових систем.

Такі країни, як Китай та Індія також розвивають свої національні програми щодо розробки та реалізації своїх супутникових навігаційних програм. В Індії одним з центральних напрямів діяльності департаменту по розвитку космічних програм Правління Індії є програма розвитку супутникової навігації (Satellite Navigation Programme, SATNAV), яка передбачає повноцінне розгортання функціонального доповнення GAGAN та створення індійської регіональної навігаційної системи IRNSS [9].

Китайська Народна Республіка активно розробляє та впроваджує швидкими темпами свою навігаційну супутникову систему COMPASS/Beidou2. Перший супутник було запущено у 2007 році, а десятий вже у 2011 році, планується, що у найближчому часі ця система почне повноцінно функціонувати та надавати навігаційні послуги на території усього Азіатско-Тихоокеанського регіону, остаточне розгортання системи планується закінчити у 2020 році [10].

COMPASS/Beidou2, як і існуючі системи GPS та ГЛОНАСС, буде забезпечувати два типи навігаційних сигналів: безкоштовний сигнал для цивільних користувачів та сигнал підвищеної точності для військових структур КНР.

1.2 Склад глобальної навігаційної супутникової системи

Глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС) являє собою всепогодну навігаційну систему та включає до свого складу декілька сузір'їв навігаційних супутників, бортові приймачі, систему моніторингу та контролю доступності та цілісності супутникових навігаційних систем. Згідно з концепцією ІКАО системи супутникової навігації повинні повністю виконувати функції наземних систем навігації та стати основною системою передачі навігаційної інформації.

Принцип дії супутникових навігаційних системи полягає в наступному. Навігаційні супутникові системи випромінюють електромагнітні сигнали, в яких закодовані навігаційні дані. В свою чергу, апаратура користувача, яка знаходиться на земній поверхні або в просторі навколо Землі, приймає цю інформацію та виміряє відстань до супутника, час та доплерівську частоту. На основі цих даних розраховується місцеположення об'єкта, швидкість та час об'єкта.

Супутникова навігаційна система складається з трьох основних та двох допоміжних сегментів: наземний сегмент, космічний сегмент, сегмент користувача, сегмент космічного функціонального доповнення та сегмент наземного функціонального доповнення.

Наземний сегмент складається з центра управління космічним сегментом, станції спостереження за навігаційними супутниками та апаратури контролю стану навігаційного супутника.

Космічний сегмент складається з систем навігаційних супутників та геостаціонарних супутників, які обертаються навколо Землі по орбітах. На орбітальній площині може знаходитись декілька супутників однієї системи. На борту супутник має радіоелектронну апаратуру, яка безперервно випромінює в напрямку Землі радіосигнали, які містять інформацію, необхідну для визначення місцеположення користувача.

Достатня кількість навігаційних супутників дозволяє при будь-яких погодних умовах та в будь-який час апаратурі користувача приймати сигнали

супутника та розраховувати місцеположення користувача, швидкість та час. На рисунку 5 зображені зв'язки між сегментами ГНСС.

До сегменту користувачів входять потенційно необмежена кількість супутникових навігаційних приймачів, які здатні приймати сигнали навігаційних супутникових систем, обробляти навігаційну інформацію та розраховувати місцеположення, швидкість, час, враховуючи похибки, які задаються супутниковою навігаційною системою та апаратурою користувача.

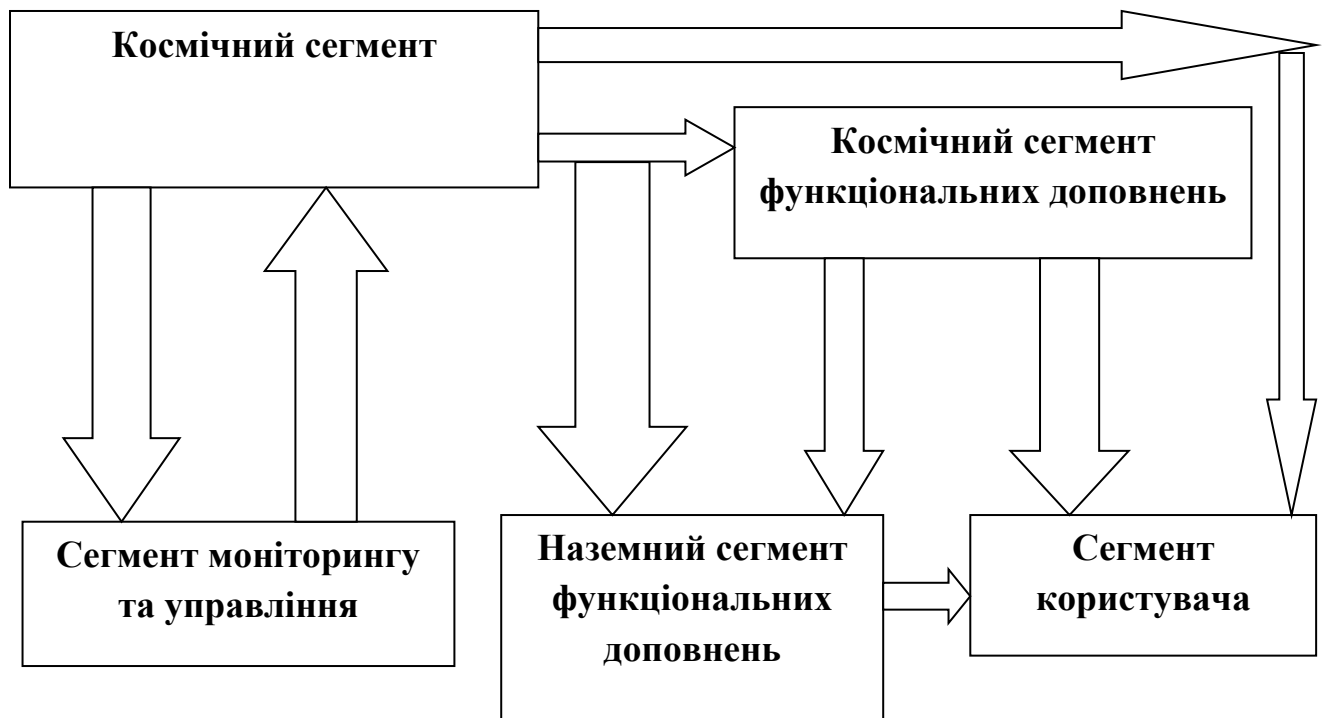


Рис. 1.6 Зв'язки між сегментами ГНСС

Сегмент космічних та наземних функціональних доповнень представляє собою апаратно-програмні комплекси, які надають додаткову інформацію для розрахунку місцеположення користувача, а також забезпечують підвищення точності визначення координат користувача, неперервності, цілісності, доступності та експлуатаційної готовності системи.

До космічних функціональних доповнень відносяться (SBAS) такі системи як широкозонна система функціонального доповнення США (WAAS), європейська система EGNOS, супутникова система космічного функціонального доповнення Японії (MSAS), індійська система GAGAN,

система Південної Кореї WADGPS та російська система SDCM. На рисунку 6 зображено зони покриття систем SBAS [6].

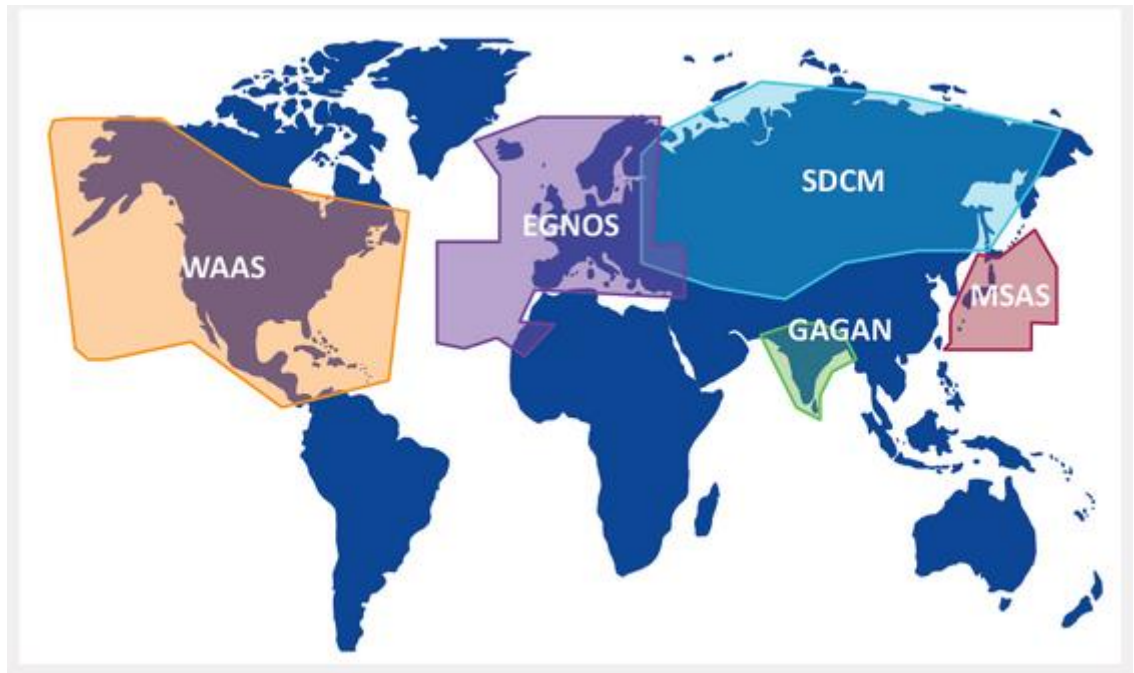


Рис. 1.7 Зони покриття систем SBAS

Наземні функціональні доповнення (GBAS) включають в себе ККС, антени, які приймають радіонавігаційні сигнали. Ці антени розташовані в точках з високоточними координатами. Приймаючи сигнал з супутників ККС після обробки передає диференційні корекції, інформацію про цілісність системи, а також службові повідомлення до приймача користувача.

Зазвичай системи GBAS розташовують в зоні аеродрому, де надають можливість контролювати та управляти усіма об'єктами, які рухаються на території. Для цього весь службовий транспорт обладнують супутниковими навігаційними приймачами, що дає можливість контролювати переміщення по аеродрому. Це дозволяє диспетчеру ефективно керувати як технічним транспортом, так і повітряними кораблями, які знаходяться в зоні аеродрому.

1.3 Вимоги до навігаційних супутникових систем в системах CNS/ATM

Це на початку 1980-х міжнародна організація ICAO визнала, що наземні системи аеронавігації не задовольняють постійно підвищувальні потреби користувачів в навігаційній інформації. ICAO створила Спеціальний комітет по майбутнім аеронавігаційним системам (FANS), який мав вивчати, аналізувати, визначати та оцінювати перспективні аеронавігаційні технології та розробляти рекомендації до їх впровадження.

Системи організації повітряного руху зобов'язані забезпечувати безпеку та ефективність польотів літаків. Основні функції цих систем це забезпечення зв'язком, навігаційними даними та даними спостереження. Відповідно зв'язок забезпечує обмін інформацією між літаками та наземними службами. Навігаційні дані містять інформацію про місцезнаходження повітряного літака, а дані спостереження забезпечують відповідального диспетчера інформацією про місцезнаходження літака в зоні обслуговування.

Досліджуючи це питання комітет FANS прийшов до висновку, щоб задовільнити високі вимоги до систем аеронавігації необхідно спиратися на нові концепції та системи, які б поєднували основні функції аеронавігаційних систем. Такими технологіями є супутникові технології.

Тому нова концепція FANS, яка називається CNS/ATM, поєднує в собі супутникові технології та системи прямої видимості.

Основні особливості системи ATM включають в себе те, що система не розділяє функції на бортові та наземні, а буде розглядати їх як цілу частину системи. Відповідно, що в цьому контексті слід розглядати бортове та наземне обладнання як цілу систему та погоджувати їх параметри з необхідними навігаційними характеристиками.

До основних вимог, які необхідні для системи ATM, відносяться наступні:

- застосування високошвидкісних ліній передачі даних з спеціальним видом модуляції;

- найбільш широко застосовувати глобальну супутникову навігацію для всіх етапів польоту;
- оптимізувати дані з радіолокаторів та автоматизованого залежного спостереження (ADS);
- організація повітряного простору буде орієнтована на впровадження необхідних навігаційних характеристик методів зональної навігації;
- використовувати повітряний простір не регламентовано, а скоординовано та мобільно, задовольняючи усіх користувачів;
- впровадження та застосування інтерактивних та автоматизованих засобів;
- в обслуговування повітряного руху ввести систему обробки даних з подальшим впровадженням в регіональні та глобальні мережі.

В системі CNS/ATM супутникова навігація має наступні складові:

- глобальні супутникові навігаційні системи, до них належать всі існуючі системи;
- супутникові навігаційні приймачі, які можуть бути встановлені на борту повітряного корабля;
- супутникові системи функціонального доповнення наземного та космічного базування SBAS та GBAS;
- канали передачі даних між бортовим навігаційним приймачем та наземним функціональним доповненням [1].

В подальшому стратегія ICAO включає повний перехід на супутникову систему навігації, як на основну навігаційну систему для забезпечення навігаційними даними.

Відповідно до Додатку 10 Том I Радіонавігаційні засоби основою GNSS є навігаційні супутникові системи ГЛОНАСС та GPS . З розвитком інших супутникових систем таких як GALILEO та Beidou, вони додаються до глобальних навігаційних супутникових систем. ICAO також включає в склад GNSS системи функціонального доповнення – SBAS та GBAS. Ці системи повинні забезпечити функціонування диференційного режиму, що дозволить

підвищити точності до сантиметрового рівня та забезпечити вимоги для точних заходів на посадку. Функціональні доповнення SBAS та GBAS також передають повідомлення про цілісність, доступність та експлуатаційну готовність системи в цілому.

Відповідно були розроблені основні технічні вимоги до GNSS по точності, цілісності, надійності та експлуатаційній готовності системи.

GNSS повинна забезпечувати точність визначення місцеположення в горизонтальній площині від 13-36 м, а вертикальній площині 22-77 м без застосування диференційного режиму. Точність передачі даних по часу не повинна перевищувати 40 нс.

Що стосується експлуатаційної готовності, то GNSS готовність системи надавати навігаційні дані повинна складати не менше 99% часу роботи самої системи.

Цілісність та надійність системи також повинні забезпечувати безперервне обслуговування не менше 99% часу роботи системи GNSS, тобто відказ космічного сегменту не повинен перевищувати три відмови за рік. А зона дії системи GNSS охоплює всю земну поверхню та навколосемну територію від 2000 до 3000 км [1,17].

Навігаційне повідомлення включає в себе наступну інформацію:

- час передачі супутника;
- місцеположення супутника;
- стан супутника;
- параметри шкали часу годинника супутника;
- затримки розповсюдження сигналу;
- поправки до часу UTC;
- стан орбітального сузір'я.

Цим вимогам повинні відповідати як існуючі супутникові навігаційні системи, так і майбутні, які згодом приєднаються до глобальної навігаційної супутникової системи.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Виконаний аналіз існуючих навігаційних супутникових систем доводить, що космічна інфраструктура може задовольнити попит на отримання навігаційної інформації. Навігаційні супутникові системи сприяють розвитку економіки та соціальної сфери, все більше входячи в сучасне життя людства.

Подальша модернізація існуючих супутникових систем та бажання багатьох країн розробляти свої власні навігаційні супутникові системи доводить перспективність супутникових технологій та переваги надання точної інформації про час та простір для користувачів.

РОЗДІЛ 2 ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

2.1 Найменування дипломної роботи

Оцінка точності супутникової системи Beidou

2.2. Підстава для проведення дипломної роботи

- Навчальний план освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» за напрямом підготовки 6.070201 «Аеронавігація» № НМ-14-6.070102-2/11.

- Наказ ректора про затвердження тем та керівників дипломних робіт №1443/ст. від _____.

2.3. Мета і призначення роботи

2.3.1. Мета роботи

Мета роботи – розробка і експериментальна апробація методики оцінки точності супутникової системи Beidou

2.3.2 Призначення роботи

Дипломна робота призначена для створення програмних засобів оцінки точності визначення координат користувача за даними від супутникової навігаційної системи Beidou .

2.4 Вихідні дані для проведення роботи

Дипломна робота виконується вперше з використанням матеріально-технічного забезпечення та наукового супроводження лабораторії супутникових систем кафедри АНС та Аерокосмічного Центру НАУ. Під час роботи використовується напрацьований науковий і технічний досвід:

1. В. В. Конин и В. П. Харченко, “Системы спутниковой радионавигации: монография.,” Киев: ХОЛТЕХ, 2010.

2. BeiDou Navigation Satellite System Interface Control Document «Signal In Space Open Service Signal B1I (Version 3.0)», 2019.

3. Б. Гофман – Велленгоф, Г. Ліхтенеггер та Д. Коллінз, «Основи визначення місцеположення та скеровування», Київ: Наук. Думка, 1996.

4. Global Positioning Systems directorate, «Interface specification IS-GPS-200: Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interface», 2013.

2.5. Очікувані наукові результати і порядок їхньої реалізації

2.5.1. Очікувані наукові результати

Внаслідок виконання роботи очікуються наступні наукові результати:

- аналіз наявної інформації про поточний стан та розвиток систем GNSS;
- огляд особливості побудови системи Beidou;
- методика оцінки точності навігаційних визначень за даними супутникової системи Beidou;
- результати експериментальних досліджень точності.

2.5.2. Порядок реалізації наукових результатів

Отримані наукові результати можуть бути використані:

- при проведенні довготривалого моніторингу зміни якості навігаційних визначень за даними Beidou та спостережень за системою;
- при постановці нових лабораторних робіт в дисциплінах «Аерокосмічні інформаційні технології», «Глобальні навігаційні супутникові системи», «Моделювання аеронавігаційних систем».

2.6. Вимоги до виконання роботи

Дипломна робота повинна виконуватись у відповідності до методичних рекомендацій до виконання магістерських дипломних робіт для студентів напряму підготовки 6.070102 «Аеронавігація» та ДСТУ 3973-2000 «СРППВ. Правила виконання науково-дослідних робіт. Загальні положення».

Пояснювальна записка оформлюється у відповідності до вимог ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки».

2.5 Етапи роботи і терміни їх виконання

Таблиця 2.1.

Етапи роботи	Зміст етапу	Терміни		Форма звітності (№ розділу роботи)
		Початок	Закінчення	
1	2	3	4	5
1. Вибір напрямку дослідження та аналіз актуальності проблеми	Аналіз загальних відомостей про глобальну навігаційну систему (ГНСС)	09.10.19	15.10.19	Підрозділ 1.1
	Аналіз даних про склад системи ГНСС	15.10.19	20.10.19	Підрозділ 1.2
	Аналіз вимог до систем ГНСС в складі CNS/ATM	21.10.19	26.10.19	Підрозділ 1.3
	Формулювання висновків по першому розділу	26.10.19	28.10.19	Висновки до розділу 1
	Розробка технічного завдання на роботу	29.10.19	31.10.19	
	Розробка технічного завдання на роботу	01.11.19	02.11.19	Розділ 2

1	2	3	4	5
2. Теоретичне дослідження особливостей китайської навігаційної супутникової системи Beidou	<p>Дослідження особливостей складу китайської навігаційної супутникової системи Beidou</p> <p>Формулювання висновків по третьому розділу</p>	<p>03.11.19</p> <p>08.11.19</p> <p>14.11.19</p> <p>19.11.19</p>	<p>07.11.19</p> <p>13.11.19</p> <p>18.11.19</p> <p>20.11.19</p>	<p>Підрозділ 3.1</p> <p>Підрозділ 3.2</p> <p>Підрозділ 3.3</p> <p>Висновки до розділу 3</p>
3. Експериментальна оцінка	<p>Визначення типу повідомлення та формату його даних</p> <p>Запис експериментальних даних супутниковим приймачем</p> <p>Візуалізація та аналіз результатів експериментальної оцінки</p>	<p>21.11.19</p> <p>24.11.19</p> <p>29.11.19</p>	<p>23.11.19</p> <p>28.11.19</p> <p>09.12.19</p>	<p>Підрозділ 4.1</p> <p>Підрозділ 4.2</p> <p>Підрозділ 4.3</p>

РОЗДІЛ 3 Китайська навігаційна супутникова система BeiDou

В розділі виконується огляд історії розробки та розгортання китайської супутникової навігаційної системи BeiDou. Систематизується наявна інформація про заплановане використання та покриття системи. Аналізується особлива структура космічного сегменту. Аналізується структура та зміст навігаційного повідомлення.

3.1 Цілі та призначення навігаційної супутникової системи BeiDou

Зважаючи на мирові тенденції та прагнення багатьох країн мати власну навігаційну супутникову систему, Китай в кінці 20 століття розпочав досліджувати шляхи розвитку власної навігаційної супутникової системи, яка б задовольняла національні потреби в сфері супутникової навігації.

Була прийнята програма розвитку навігаційної супутникової системи. Ця програма складається з тріступеневої стратегії розвитку. Перший етап BDS-1 повинен забезпечити розгортання системи та надання послуг по всій країні на кінець 2000 року. Другий етап BDS-2 повинен забезпечити завершення будівництва системи та забезпечувати навігаційною інформацією Азіатсько-Тихоокеанський регіон до кінця 2012 року. І останній третій етап BDS-3 – це завершення розгортання системи та надання послуг по всьому світу до кінця 2020 року.

Навігаційна супутникова система BeiDou – це космічна інфраструктура загальнодержавного значення, яка за безпечує з високою точністю позиціонування для глобальних користувачів при будь-яких погодних умовах та в будь-який момент часу.

З розвитком можливостей проекту та сервісів, які надаються системою BDS, їх послуги широко застосовуються у сферах зв'язку, наземному, морському та повітряному транспорті, гідрологічному моніторингу, прогнозуванні погоди, картографуванні та наданні географічної інформації, запобігання лісовим пожежам, синхронізації часу для систем зв'язку, диспетчеризації, пошук та порятунок у надзвичайних ситуаціях та інші сфери.

Ці послуги поступово проникають в усі аспекти суспільного виробництва та життя людей, розвиваючи світову економіку та соціальний сектор.

Навігаційні супутникові системи – це загальні суспільні ресурси, які охоплюють всю Земну кулю, а багато системна сумісність та сумісність стали важливими тенденціями в розвитку глобальної навігації.

Китайська навігаційна супутникова система буде працювати з усіма існуючими навігаційними супутниковими системами та сприяти розвитку глобальної супутникової навігації [10-11].

Основною ціллю розвитку навігаційної супутникової системи BeiDou є побудова навігаційної супутникової системи світового класу для задоволення потреб національної безпеки країни, а також економічного та соціального розвитку, надання постійних, стабільних та надійних послуг для ГНСС, а також розвиток галузей, пов'язаних з BDS, для підтримки глобальної економіки та економіки Китаю, соціального розвитку, поліпшення життєвого рівня людей та посилення міжнародної співпраці.

Китай підтримує наступні принципи в будівництві та розвитку своєї системи – це незалежність, відкритість, поступовість, сумісність та співпраця з існуючими системами.

Перший принцип незалежність означає підтримувати незалежне будівництво, розробку та функціонування BDS, а також набуття можливостей для впровадження та надання незалежно супутникові навігаційні послуги глобальним користувачам.

Другий принцип відкритість означає надання відкритих навігаційних супутникових послуг безкоштовно та заохочувати все масштабне, багаторівневе та якісне міжнародне співробітництво та обмін.

Третій принцип сумісність означає підвищення сумісності BDS з іншими навігаційними супутниковими системами та заохочення до міжнародного співробітництва та обміну, щоб забезпечити кращі послуги для користувачів.

Під четвертим принципом поступовість мається на увазі реалізація проекту BDS поетапно крок за кроком, підвищення продуктивності BDS - сервісу та стимулювання розвитку індустрії супутникової навігації.

Розробка навігаційної супутникової системи Китаєм відбувається самостійно, враховуючи національні інтереси крок за кроком з постійним удосконаленням.

На першому кроці BDS-1 було розпочата будівництво та розгортання системи BeiDou у 1994 р. Система була завершена і введена в експлуатацію у 2000 р. За цей час було виведено на орбіту два геостаціонарні супутники (GEO). Система почала надавати китайським користувачам навігаційні послуги, а саме інформацію для визначення місцеположення та часу користувача, додаткову інформацію з геостаціонарних супутників. Третій супутник GEO був запущений у 2003 році, що підвищило працездатність системи.

Другий крок BDS-2 було розпочато у 2004 році, а до кінця 2012 року на навколосемну орбіту було виведено загалом 14 супутників - 5 супутників GEO, 5 похилих геосинхронних супутників (IGSO) та 4 середньоорбітальні супутники (MEO). BDS-2 додав можливість пасивного позиціонування для користувачів в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні.

В 2009 році було розпочато третій крок розробки системи BeiDou. BDS-3 успадкував всі функції як активних, так і пасивних служб. Основною ціллю третього кроку є надання основних навігаційних послуг сусіднім регіонам до 2018 року та завершити розробку та розгортання сузір'я до 35 супутників до кінця 2020 року для забезпечення навігаційних послуг глобальним користувачам.

Система BDS складається з трьох сегментів: космічного сегмента, наземного сегмента та сегмента користувача.

Космічний сегмент представляє собою гібридне навігаційне сузір'я, що складається з супутників GEO, IGSO та MEO.

Наземний сегмент складається з різних наземних станцій, включаючи головні станції управління, станцій синхронізацію часу та зв'язку, станцій моніторингу.

Сегмент користувачів включає в себе різні види навігаційного обладнання, яке здатне приймати та обробляти навігаційні данні.

Покрокова розробка BDS дає можливість удосконалювати систему від розвитку регіональних сервісних можливостей поступово розширюючи послугу в глобальному масштабі.

А саме, по-перше, його космічний сегмент являє собою гібридне сузір'я, що складається із супутників трьох видів орбіт. У порівнянні з іншими навігаційними супутниковими системами в системі BDS працює більше супутників на високих орбітах, що надає кращі можливості для екранування. Це особливо помітно з точки зору продуктивності в районах низької широти. По-друге, BDS забезпечує навігаційні сигнали декількох частот, і здатний підвищити точність обслуговування за допомогою комбінованих багато частотних сигналів. По-третє, BDS вперше інтегрує можливості навігації та зв'язку та має п'ять основних функцій - навігація в режимі реального часу, швидке позиціонування, точний час, звіт про місцезнаходження та послуги короткого повідомлення.

Для задоволення зростаючого попиту користувачів система BDS продовжує розвиватися та вдосконалюватися в технічних дослідженнях BDS та розвитку супутникової навігації в районах, розвитку атомних годинників та сигналів, позиціонування та хронометражу, також будуть вивчені технології для підвищення продуктивності обслуговування.

Для удосконалення глобальної навігації Китай запустить супутники нового покоління, розробляються атомні годинники з підвищеною точністю, додатково покращують продуктивність та термін експлуатації супутників та будуються більш стабільні та надійні між супутникові зв'язки. Будуть транслюватися додаткові національні навігаційні сигнали та підвищуватися

сумісність з іншими навігаційними супутниковими системами, щоб забезпечити кращі послуги для глобальних користувачів.

В системі BeiDou часова шкала часу (BDT) пов'язана з універсальним координованим часом та інформація про зсув часу транслюється в навігаційному повідомленні. Китай буде покращувати сумісність шкали часу з іншими навігаційними супутниковими системами.

Китай зобов'язаний забезпечити безпечну та надійну роботу BDS шляхом вжиття декількох заходів для забезпечення безкоштовної постійної, стабільної, надійної та відкритої послуги. Для цих цілей створюється мережа моніторингу та оцінки GNSS, яка широко використовує міжнародні ресурси, здійснюючи моніторинг та оцінку стану сузір'я, точності сигналу, якості сигналу та обслуговування. Використання додаткових резервних супутників для зменшення вірогідності відмови системи та підвищити надійність BDS.

Сигнали відкритого обслуговування B1I і B2I транслюються для надання відкритих послуг для Азіатсько-Тихоокеанського регіону безкоштовно. Послуги охоплюють територію, що простягається від 55° північної широти до 55° південної широти та від 55° восточної довготи до 180° восточної довготи, з точністю позиціонування менше 10 метрів, точність вимірювання швидкості менше 0,2 метра в секунду, а точність синхронізації за часом менше ніж 50 наносекунд.

Для забезпечення захисту радіонавігаційного супутникового спектра BDS в Китаї були прийняті ряд законів відповідно до вимог національного законодавства та положення про радіочастотний спектр.

Китай забороняє виробництво, продажу та використання незаконних перешкод, які впливають на системні операції та послуги.

Китай прагне покращити розробку програм BDS та побудувати промисловий ланцюжок BDS, що включає основні продукти: навігаційні приймачі користувачів, прикладні системи та інше, а також підтримку та просування системи BDS, постійно вдосконалюючи виробниче середовище

для інтегрованого розвитку та підвищуючи економічні та соціальні переваги в галузі супутникової навігації, як на внутрішньому так і на зовнішньому ринках.

Китай сформулював плани розвитку індустрії супутникової навігації, створюючи загальну схему для середньо- та довгострокового промислового розвитку супутникової навігації, і заохочує компетентні департаменти та органи місцевого самоврядування для прийняття відповідної політики підтримки застосування BDS в різних сферах економіки.

У 2014 році в Китаї був створений Національний технічний комітет по питанням управління та стандартизацією супутникової навігації BeiDou. Цей стандарт постійно вдосконалюється.

Великі зусилля докладаються для просування застосування технологій та продуктів BDS, які сумісні з іншими системами, в ключових галузях, пов'язаних з національною безпекою та економікою країни, щоб забезпечити гарантію стабільного та безпечного ходу національної економіки.

Також просувається інтеграція між супутниковою навігацією та кожною галуззю в національній економіці, проводячи демонстрації промислових додатків BDS, формулюючи комплексні прикладні рішення для галузей промисловості, та сприяння трансформації та вдосконаленню в галузі транспорту, земельних ресурсів, запобігання та зменшення наслідків катастроф, сільське господарство, збереження лісового та водного господарства, зйомки та розвідки місцевості, реагування на надзвичайні ситуації та порятунк. Це доводять такі проекти, наприклад, "Координований розвиток для регіона Пекіна-Тяньцзінь-Хебея", розробка "Економічної зони річки Янцзи" та застосування системи в проектах розумних міст та інше.

Китай заохочує та підтримує побудову та розвиток ключових лабораторій для супутникових навігаційних технологій, науково-дослідні центри інженерії, технологічні центри підприємств та інші інноваційні проекти, докладає зусилля для захисту прав інтелектуальної власності.

Також Китай заохочує інтегрований розвиток BDS та використання інтернет-технологій великих об'ємів даних та хмарних обчислень, підтримує комплексне позиціонування та інноваційне використання супутникової навігації разом з мобільним зв'язком, бездротовою мережею, псевдо супутниками. Надширокий діапазон та спеціальна мережа сигналів, сприяє інтегрованому розвитку супутникової навігації та застосуванню системи BDS в нових галузях, такі як супутникове дистанційне зондування земної поверхні, мобільний Інтернет та інше.

В міжнародному співробітництві Китай активно працює над сумісністю BDS та іншими навігаційними супутниковими системи в областях структури, обміну даними, спільного використання ресурсів, вдосконалення послуг навігаційних супутникових систем та надання користувачам більш кваліфікованих, різноманітних, безпечних та надійних послуг.

Зважаючи на те, що частотні та орбітальні ресурси обмежені Китай працює з Міжнародним союзом зв'язку (ITU) для полегшення координації частот BDS та орбітальних площин. Починаючи з 2000 року, Китай проводить ефективні координаційні заходи щодо багатьох інших понад 300 супутникових мереж з більш ніж 20 країнами, регіонами та міжнародними організаціями.

Ратифікація BDS за міжнародними стандартами є важливим етапом для інтеграції BDS в міжнародні системи. Китай не шкодує зусилля щодо ратифікації BDS Міжнародною організацією зі стандартів та іншими міжнародними організаціями в галузі промислового та професійного застосування. В даний час докладаються позитивні зусилля в сприянні визнанню BDS у Міжнародній цивільній авіації, Міжнародній морській організації (International Maritime Organization), Third-Generation Mobile Communication Standard Partnership Project та інші організації.

У листопаді 2014 року BDS отримало визнання від Міжнародної морської організації.

Китай прагне зробити систему BDS одним з головних постачальників GNSS, тому Китай активнобере участь у міжнародних справах супутникової навігації, бере участь у заходах, що проводяться Міжнародним комітетом із глобальної навігаційної супутникової системи (ICG) та іншими відповідними міжнародними організаціями, підтримує академічні обміни та співпрацю в цій галузі, а також просуває супутникові навігаційні доданки із застосуванням BDS. Китай активно бере участь у відповідних заходах в Організації Об'єднаних Націй, успішно було проведено Сьоме засідання ICG у 2012 році, були запропоновані пропозиції щодо міжнародного моніторингу та оцінки GNSS та BDS, а також ініційована кампанія з демонстрації та досвіду застосування GNSS.

Щорічно проводиться Китайська супутникова навігаційна конференція, яка відіграє позитивну роль у розвитку супутникової навігаційної технології по всьому світу. Просування міжнародних програм супутникової навігації допомагають створювати спільні центри BDS створені у багатьох країнах. Відкрито Міжнародний центр обміну та навчання у галузі супутникової навігації. Крім того, академічна освіта, літні школи, короткотермінові навчальні курси та симпозиуми та інші міжнародні навчання регулярно проводяться навчальні заходи.

Система BDS активно впроваджується в сферах транспорту, туризму, морської навігації, зменшення та ліквідація наслідків катастроф, а також сільського господарства та збільшення рівня застосування великому масштабі, через створення платформи експлуатації та обслуговування високоточної послуги супутникової навігації, позиціонування та синхронізації часу.

3.2 Космічний сегмент навігаційної супутникової системи BeiDou

Побудова та розвиток навігаційної супутникової системи BeiDou ділиться на три фази: BDS-1, BDS-2 та BDS-3.

На другому етапі розвитку BDS-2 номінальне космічне сузір'я складається з 5 супутників GEO, 5 супутників IGSO та 4 супутників MEO. Відповідно до фактичної ситуації, запасні супутники можуть бути розміщені на орбіті.

Геостаціонарні супутники розташовані на висоті 35786 кілометрів з координатами 58.75°E , 80°E , 110.5°E , 140°E і 160°E . В свою чергу, супутники IGSO працюють на орбіті на висоті 35786 кілометрів та мають кут нахилу орбітальних площин 55 градусів відносно до екваторіальної площини. Супутники MEO працюють на орбіті на висоті 21528 кілометрів та також мають кут нахилу орбітальних площин 55 градусів відносно до екваторіальної площини. Орбітальне сузір'я BeiDou представлено на рис. 3.1. [8]

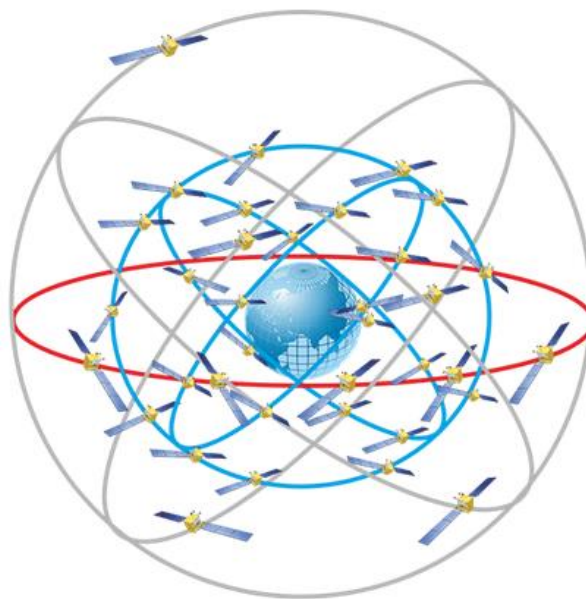


Рис. 3.1. Орбітальне сузір'я BeiDou

На третьому етапі розвитку BDS-3 номінальне космічне сузір'я складається з 3 супутників GEO, 3 супутників IGSO та 24 супутників MEO. Відповідно запасні супутники також можуть бути розміщені на орбіті. Супутники GEO розташовані на висоті 35786 кілометрів та мають

координати 80° E, 110.5° E та 140° E відповідно. Супутники IGSO працюють на висоті 35786 кілометрів та мають кут нахилу орбітальних площин у 55 градусів відносно до екваторіальної площини. Супутники MEO мають кут нахилу орбітальних площин 55 градусів відносно до екваторіальної площини та висоту орбіти 21528 кілометрів.

Космічний сегмент BDS поступово буде переходити від BDS-2 до BDS-3 та надавати відкриті послуги для користувачів у всьому світі.

Для розрахунку орбітальних площин в BeiDou використовується своя система координат BDCS. Визначення BDCS відповідає технічним умовам Міжнародної служби обертання та довідкової системи Землі (IERS), а також відповідає визначенню Китайської геодезичної системи координат 2000 року (CGCS2000). BDCS і CGCS2000 мають однакові параметри еліпсоїда. Координатна система BDCS має наступні визначення: геометричний центр еліпсоїда BDCS збігається із центром мас Землі, а вісь обертання еліпсоїда BDCS - це вісь Z. Параметри еліпсоїда показані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1- Параметри еліпсоїда BDCS

№	Параметр	Визначення
1	Велика піввісь	$a=6378137.0$ м
2	Геоцентрична гравітаційна константа	$\mu=3.986004418 \times 10^{14}$ $\text{м}^3/\text{с}^2$
3	Плескатість	$f=1/298.257222101$
4	Швидкість обертання Землі	$e=7.2921150 \times 10^{-5}$ рад/с

Центр відліку координатної системи починається в центрі маси Землі. Вісь Z – це напрямок опорного полюса IERS (IRP). Вісь X – перетин еталонного меридіана IERS (IRM) та площини, що проходить через початок та є нормаллю до вісі Z. Y-вісь, разом із Z-віссю та X-віссю, являє собою праву ортогональну систему координат. Для визначення одиниць довжин використовується міжнародна система одиниць вимірювання (SI). На рис. 3.2 зображена координатна система.

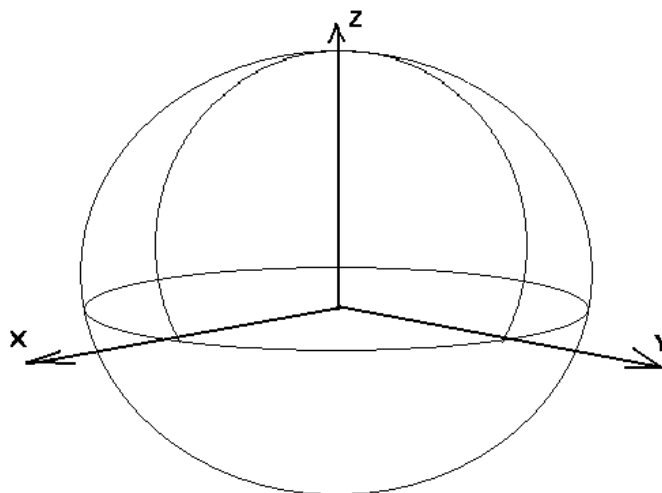


Рис. 3.2 Координатна система BeiDou

В навігаційній супутниковій системі BeiDou як шкалу часу системи визначено китайський Універсальний скоординований час, який підтримується атомними стандартами частоти, встановленими в центрі управління в Пекіні. Час системи BeiDouTime (BDT) пов'язаний з координованим всесвітнім часом (UTC) і синхронізований з ним з точністю 100 нс. Початком відліку шкали часу BDT є 0 год 0 хв 1 січня 2006 (UTC) [27]. В процесі розробки та вдосконалення системи також передбачена сумісність BDT згодом навігаційними супутниковими системами GPS/Galileo. Розбіжність між шкалами часу GPST/GST вимірюється і передається в повідомленнях.

3.3 Структура та характеристика навігаційного сигналу BeiDou

Космічні апарати системи BeiDou-2, що знаходиться в експлуатації, передають сигнали B1 і B2, що дозволяє надавати відкриті безкоштовні послуги в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні. Передбачається випромінювання навігаційних радіосигналів в трьох частотних діапазонах B1, B2 і B3, розташованих в тих же областях L-діапазону, що і сигнали інших ГНСС

Після запуску в 2015 році КА нового покоління керівництво програмою BeiDou повідомило про зміну структури навігаційного сигналу B1: зміщення центральної частоти с 1561,098 МГц на 1575,42 МГц (як у цивільних сигналів GPS L1 і GALILEO E1) і зміна модуляції QPSK на MBOC (аналогічну модуляції майбутнього сигналу GPS L1C і GALILEO E1). Це направлено на забезпечення взаємодоповнюваності системи BeiDou з системами ГНСС, GALILEO і GPS.

Згідно офіційній документації сигнали на B1 і B2 - це сума каналів I і Q, які знаходяться в фазовій квадратурі один одного. Код ранжирування та навігаційного повідомлення модулюється на частоті-носії. Тобто сигнал складається з несучої частоти, дальномірного коду та навігаційного повідомлення. Сигнали на B1 і B2 модулюються за наступною формулою [9]:

$$S_{B1}^j(t) = A_{B1I} \cdot C_{B1I}^j(t) \cdot D_{B1I}^j(t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t + \varphi_{B1I}^j) + A_{B1Q} \cdot C_{B1Q}^j(t) \cdot D_{B1Q}^j(t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t + \varphi_{B1Q}^j)$$

$$S_{B2}^j(t) = A_{B2I} \cdot C_{B2I}^j(t) \cdot D_{B2I}^j(t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t + \varphi_{B2I}^j) + A_{B2Q} \cdot C_{B2Q}^j(t) \cdot D_{B2Q}^j(t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t + \varphi_{B2Q}^j)$$

Де j - номер супутника, A_{B1I} , A_{B1Q} , A_{B2I} , A_{B2Q} - амплітуда сигналів B1I, B2I, B1Q та B2Q; C_{B1I}^j , C_{B1Q}^j , C_{B2I}^j , C_{B2Q}^j - псевдовідпадковий код сигналу B1I, B2I, B1Q та B2Q; D_{B1I}^j , D_{B2I}^j , D_{B1Q}^j , D_{B2Q}^j - моделювання даних сигналів B1I, B2I, B1Q та B2Q; f_1 , f_2 - несучі частоти сигналів B1I та B2I; φ_{B1I}^j , φ_{B1Q}^j , φ_{B2I}^j , φ_{B2Q}^j - несуча початкова частота сигналів B1I, B2I, B1Q та B2Q.

Номинальні частота сигналу B1I становить 1561.098 МГц, а номінальна частота B2I сигналу становить 1207.140 МГц. Модулюються сигнали B1I та B2I квадратурним фазовим зсувом (QPSK), з 2015 року сигнал B1I перейшов на моделювання бінарним фазовим зсувом (BPSK). Цей спосіб моделювання використовується також такими навігаційними супутниковими системами як GPS та GALILEO. Так само, як і в зазначених системах в китайській супутниковій системі використовується множинний доступ з поділом коду (CDMA). Це надає можливість краще синхронізувати сигнали між існуючими навігаційними системами.

Когерентність сигналу в фазових діапазонах (у т.ч. різниця затримок супутникового обладнання) між B1I, B2I та B3I менше 1нс.

Загальна затримка сигналу супутникового обладнання визначається як затримка між випромінюваним сигналом на виході конкретного супутника (вимірюється на фазовому центрі антени) та виході бортового частотного генератора цього супутника. Загальна затримка сигналу B3I в обладнанні супутника розглядається як загальний опір обладнання, який враховується в поправку часового параметру a_0 , що транслюється в навігаційному повідомленні. Невизначеність цієї затримки повинна бути менше 0,5 нс.

Різниця загальної затримки сигналу в обладнанні між сигналом B1I і B3I враховується в часовому параметрі T_{GD1} . Різниця затримки сигналу в обладнанні між сигналом B2I та сигналом B3I, яка враховується в часових параметрах T_{GD2} , T_{GD1} і T_{GD3} та транслюються в навігаційному повідомленні, невизначеність цих параметрів повинна бути меншою за 1нс.

Швидкість передачі елементів сигналу B1I відбувається в діапазоні коду (C_{B1I}) 2.046 Mcps, а довжина коду - 2046 елементів.

C_{B1I} генерується шляхом скорочення Золотого коду (Gold code) на один елемент. Збалансований Золотий код генерується за допомогою додавання Modulo-2. Послідовності G1 і G2, які відповідно отримані з двох

11-бітних лінійних регістрів за допомогою зсувів, визначаються наступними поліномами генератора для G1 та G2[10-11]:

$$G1(X) = 1 + X + X^7 + X^8 + X^9 + X^{10} + X^{11}$$

$$G2(X) = 1 + X + X^2 + X^3 + X^4 + X^5 + X^8 + X^9 + X^{11}$$

Початковими фазами G1 і G2 є:

G1: 01010101010;

G2: 01010101010.

Генератор СВ11 показаний на рисунку 4 [10] .

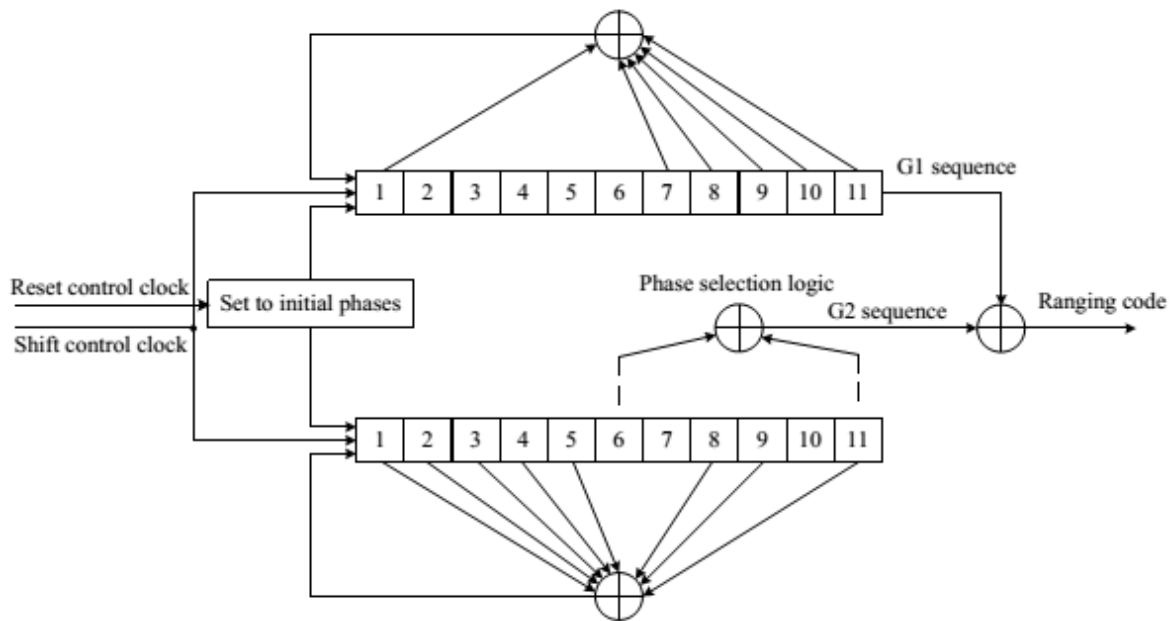


Рис. 3.3 Генератор СВ11

Різний зсув фази послідовності G2 здійснюється відповідними натисканнями на регістр зсуву, що генерує послідовність G2. За допомогою Модуло-2додавання G2 з різним зсувом фази та G1, генерується код для діапазону кожного супутника. Призначення фазової послідовності G2 показано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Призначення фазової послідовності G2

№	Тип супутника	Діапазон коду	Поетапне призначення послідовності G2
1	GEO satellite	1	1⊕3
2	GEO satellite	2	1⊕4
3	GEO satellite	3	1⊕5
4	GEO satellite	4	1⊕6
5	GEO satellite	5	1⊕8
6	MEO/IGSO satellite	6	1⊕9
7	MEO/IGSO satellite	7	1⊕10
8	MEO/IGSO satellite	8	1⊕11
9	MEO/IGSO satellite	9	2⊕7
10	MEO/IGSO satellite	10	3⊕4
11	MEO/IGSO satellite	11	3⊕5
12	MEO/IGSO satellite	12	3⊕6
13	MEO/IGSO satellite	13	3⊕8
14	MEO/IGSO satellite	14	3⊕9
15	MEO/IGSO satellite	15	3⊕10
16	MEO/IGSO satellite	16	3⊕11
17	MEO/IGSO satellite	17	4⊕5
18	MEO/IGSO satellite	18	4⊕6
19	MEO/IGSO satellite	19	4⊕8
20	MEO/IGSO satellite	20	4⊕9
21	MEO/IGSO satellite	21	4⊕10
22	MEO/IGSO satellite	22	4⊕11
23	MEO/IGSO satellite	23	5⊕6
24	MEO/IGSO satellite	24	5⊕8
25	MEO/IGSO satellite	25	5⊕9
26	MEO/IGSO satellite	26	5⊕10
27	MEO/IGSO satellite	27	5⊕11
28	MEO/IGSO satellite	28	6⊕8
29	MEO/IGSO satellite	29	6⊕9
30	MEO/IGSO satellite	30	6⊕10
31	MEO/IGSO satellite	31	6⊕11
32	MEO/IGSO satellite	32	8⊕9
33	MEO/IGSO satellite	33	8⊕10
34	MEO/IGSO satellite	34	8⊕11
35	MEO/IGSO satellite	35	9⊕10
36	MEO/IGSO satellite	36	9⊕11
37	MEO/IGSO satellite	37	10⊕11
38	MEO/IGSO satellite	38	1⊕2⊕7
39	MEO/IGSO satellite	39	1⊕3⊕4
40	MEO/IGSO satellite	40	1⊕3⊕6
41	MEO/IGSO satellite	41	1⊕3⊕8
42	MEO/IGSO satellite	42	1⊕3⊕10

Продовження табл.3.2

№	Тип супутника	Діапазон коду	Поетапне призначення послідовності G2
43	MEO/IGSO satellite	43	1⊕3⊕11
44	MEO/IGSO satellite	44	1⊕4⊕5
45	MEO/IGSO satellite	45	1⊕4⊕9
46	MEO/IGSO satellite	46	1⊕5⊕6
47	MEO/IGSO satellite	47	1⊕5⊕8
48	MEO/IGSO satellite	48	1⊕5⊕10
49	MEO/IGSO satellite	49	1⊕5⊕11
50	MEO/IGSO satellite	50	1⊕6⊕9
51	MEO/IGSO satellite	51	1⊕8⊕9
52	MEO/IGSO satellite	52	1⊕9⊕10
53	MEO/IGSO satellite	53	1⊕9⊕11
54	MEO/IGSO satellite	54	2⊕3⊕7
55	MEO/IGSO	55	2⊕5⊕7
56	MEO/IGSO satellite	56	2⊕7⊕9
57	MEO/IGSO satellite	57	3⊕4⊕5
58	MEO/IGSO satellite	58	3⊕4⊕9
59	GEO satellite	59	3⊕5⊕6
60	GEO satellite	60	3⊕5⊕8
61	GEO satellite	61	3⊕5⊕10
62	GEO satellite	62	3⊕5⊕11
63	GEO satellite	63	3⊕6⊕9

3.4 Структура навігаційного повідомлення в системі BeiDou

В супутниковій системі BeiDou навігаційні повідомлення поділяються на два типи D1 і D2. Від типу повідомлення залежить швидкість передачі та навігаційна інформація, яка міститься в повідомленні.

Повідомлення D1 має швидкість передачі 1 кбіт/с та швидкість кодування 50 біт/с. Навігаційним повідомленням D1 передається основна навігаційна інформація, а саме інформація супутників мовлення, інформація альманаху для всіх супутників, а також зміщення часу від інших систем. Навігаційне повідомлення D1 транслюється сигналами ВІІ супутників типу MEO/IGSO.

Навігаційне повідомлення D2 містить інформацію про цілісність BDS, диференціальні корекції та іоносферна сітку, яка використовується для розрахунків. Швидкість передачі повідомлення 500 біт/с. Навігаційне

повідомлення D2 транслюється за допомогою ВІІ-сигналів геостаціонарних супутники.

Тип інформації та зміст навігаційного повідомлення, який передається кожним супутником представлений в таблиці 3.3

Таблиця 3.3. - Зміст навігаційного повідомлення

Інформація	Кількість бітів	Схема передачі
Преамбула	11	Міститься в кожному підкадрі
ПідкадрID	3	
Секунди тижня (SOW)	20	
Номер тижня	13	D1: передається в підкадрах 1, 2 і 3,повторюються кожні 30 секунд. D2: передається в перших п'яти словах сторінки 1 ~ 10 підкадру 1, повторюється кожні 30 секунд. Швидкість оновлення: кожну 1 годину.
Індекс точності користувача (URAI)	4	
Мітка здоров'я (SatH1)	1	
Затримка сигналу в обладнанні (T _{GD1} , T _{GD2})	10	
Вік даних, годинник (AODC)	5	
Параметри корекції годинника (t _{0c} , a ₀ , a ₁ , a ₂)	74	
Вік даних, ефемериди (AODE)	5	
Параметри ефемерид	371	
Параметри моделі іоносфери (α _n , β _n , n=0~3)	64	
Номер сторінки	7	
Ідентифікація розширеного альманаху (AmEpID)	2	D1: передається на сторінках 1 ~ 24 підкадру 4 та сторінках 1 ~ 6 підкадру 5. D2: передається на сторінках 37 ~ 60, 95 ~ 100 підкадру 5.

продовження таблиці 3.3

Інформація	Кількість бітів	Схема передачі
Параметри альманаха	178	<p>D1: передається на сторінках 1 ~ 24 підкадру 4 та сторінки 1 ~ 6 підкадру 5 для SV ID 1 - 30; передається на сторінках 11 ~ 23 підкадру 5 для SV ID 31 по 63, використовуючи часовий метод розподілу та ідентифікований за допомогою AmEрID і AmID.</p> <p>D2: передається на сторінках 37 ~ 60, 95 ~ 100 підкадру 5 для SV ID 1 по 30; передається, використовуючи часовий розподіл на сторінках 103 ~ 115 підкадру 5 для SV ID 31 - 63 та ідентифікований за допомогою AmEрID і AmID.</p> <p>Період оновлення: менше 7 днів.</p>
Номер тижня альманаха (WN)	8	<p>D1: передача на сторінці 8 підкадру 5.</p> <p>D2: передача на сторінці 36 підкадру 5.</p> <p>Період оновлення: менше 7 днів.</p>
Інформація про здоров'я сузір'я (30 супутників)	9x43	<p>D1: передається на сторінках 7 ~ 8 підкадру 5 для SV ID 1 - 30; передається на сторінці 24 підкадру 5 для SV ID 31 по 63, використовуючи метод часового розподілу та ідентифікований за допомогою AmEрID і AmID. D2: передається на 35 ~ 36 підрамник 5 для SV ID 1 по 30; передається на сторінці 116 підкадру 5 для SV ID 31-63 за допомогою метод обміну часом та визначений через AmEрID та AmID. Період</p>

оновлення: менше 7 днів.

продовження таблиці 3.3

Інформація	Кількість бітів	Схема передачі
Параметр часу відносно UTC (A0UTC, A1UTC, ΔtLS, ΔtLSF, WNLSF, DN)	88	D1: передається на сторінках 9 ~ 10 підкадру 5.
Параметр часу відносно часу GPS (A0GPS, A1GPS)	30	D2: передається на сторінках 101 ~ 102 підкадру 5.
Параметр часу відносно Galileo (A0Gal, A1Gal)	30	Період оновлення: менше 7 днів.
Параметр часу відносно часу GLONASS (A0GLO, A1GLO)	30	
Номер сторінки для основної навігаційної інформації (Pnum1)	4	D2: передається на сторінках 1 ~ 10 підкадра 1
Номер сторінки для інформації про цілісність та інформацію про диференційну корекцію (Pnum2)	4	D2: передається на сторінках 1 ~ 6 підкадра 2
Мітка про здоров'я супутника та цілісність і інформація про диференційну корекцію (SatH2)	2	D2: передається на сторінках 1 ~ 6 підкадру 2. Швидкість оновлення: кожні 3 секунди.
Ідентифікація розгорнутої системи BDS цілісність та диференціальна корекція інформація (BDErID)	2	D2: передається на сторінках 1 ~ 6 підкадру 4
Ідентифікація супутників BDS в інформації BDS диференціальної корекції (BDID _i , i=1~63)	1x63	D2: передається на сторінках 1 ~ 6 підкадру 2 для SV ID 1 - 30; передається на сторінках 1 ~ 6 підкадру 4 для SV ID 31-63. Швидкість оновлення: кожні 3 секунди.
Індекс точності регіонального споживчого діапазону (RURAI _i , i=1~24)	4x24	D2: передається на сторінках 1~6 підкадру 2, підкадру 3 та підкадру 4. Швидкість оновлення: кожні 18 секунд.

продовження таблиці 3.3

Інформація	Кількість бітів	Схема передачі
Еквівалентна корекція годинника ($\Delta t_i, i=1\sim 18$)	13x24	D2: передається сторінках 1~6 підкадру 2, підкадру 3 і підкадру 4. Швидкість оновлення: кожні 18 секунд.
Помилка диференціального діапазону користувача індекс ($UDREI_i, i = 1 \sim 18$)	4 × 24	D2: передається на сторінках 1 ~ 6 підкадру 2 та підкадру 4. Швидкість оновлення: кожні 3 секунди.
Вертикальна затримка іоносферної сітки в точці сітки (dt)	9x320	
Індекс затримки помилки вертикальної іоносферної сітки ($GIVEI$)	4x320	

Загальна структура навігаційного повідомлення типу D1 представлена на рис.3.4. Навігаційне повідомлення складається з суперкадру, кадру та підкадру. В свою чергу кожний суперкадр складається з 24 кадру або 24 сторінки та має довжину 36000 біт і триває 12 хвилин. Кожний кадр має довжину 1500 біт та триває 30 секунд. Структура одного кадру складається з 5 підкадрів, який має довжину 300 біт і триває 6 секунд.

Кожний підкадр складається з 10 слів, де кожне слово має довжину 30 біт та триває 0,6 секунди. В кожному слові міститься частина навігаційного повідомлення та парні біти. В кожному першому слові підкадру перші 15 біт не кодуються, а наступні 11 біт кодуються BCH (15,11,1) для виправлення помилок. Код BCH має довжину 15 біт, з яких 11 бітів містять інформацію, а 1 біт надається на виправлення помилки.

Так що є лише одна група BCH-коду, що містить в цілому 26 інформаційних бітів в слові. Для всіх інших 9 слів у підкадрі обидва BCH (15,11,1) кодування задіяні для контролю помилки та ущільнення інформації.

Кожне з 9 слів складається з 30 біт, містить два блоки BCH-кодів і 22 біти, в яких закладена інформація.

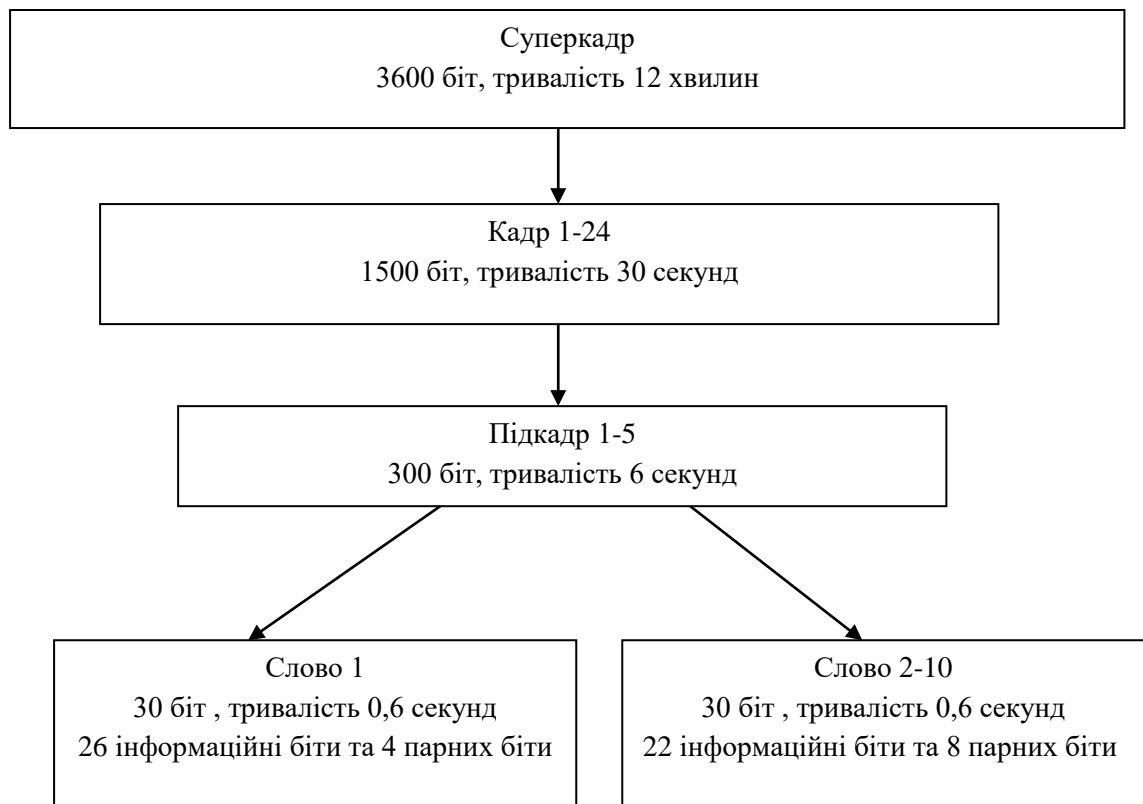


Рис. 3.4 Загальна структура навігаційного повідомлення типу D1

Навігаційне повідомлення D1 включає в себе основну навігаційну інформацію, яка передається супутниками (секунди тижня, номер тижня, індекс точності вимірювань користувача, відомості про здоров'я супутника, параметри моделі іоносферної затримки сигналу, параметри супутникових ефемерид та їх вік, дані корекції супутникового годинника та їх вік та затримка сигналу в обладнанні), альманах та BDT компенсує інші системи (UTC та інші навігаційні супутникові системи).

Основна навігаційна інформація супутника радіомовлення знаходиться в підкадрах 1, 2 і 3. Підкадри 4 і 5 діляться на 24 сторінки, в яких передаються дані альманаху та корекції часу з іншими системами для всіх супутники.

Навігаційне повідомлення D2 також складається з суперкадру, кадру та підкадру. Кожен суперкадр містить 180000 біт та має тривалість 6 хвилин.

Кожен суперкадр складається з 120 кадрів по 1500 біт і тривалістю 3 секунди. В свою чергу кожен кадр складається з 5 підкадрів, кожен з яких містить 300 біт і передається протягом 0,6 секунд. Кожний підкадр складається з 10 слів по 30 біт та тривалістю 0,06 секунд.

Відповідно кожне слово містить дані навігаційного повідомлення та парні біти. Перші 15 біт у слові 1 кожного підкадру не кодується, а останні 11 біт закодовано в BCH (15,11,1) для виправлення помилок. Для інших 9 слів підкадру обидва BCH (15,11,1) кодування задіяні для контролю помилки та ущільнення інформації. У кожному слові міститься 22 інформаційні біти і 8 парних бітів. Загальна структура навігаційного повідомлення типу D2 показано рис.3.5.

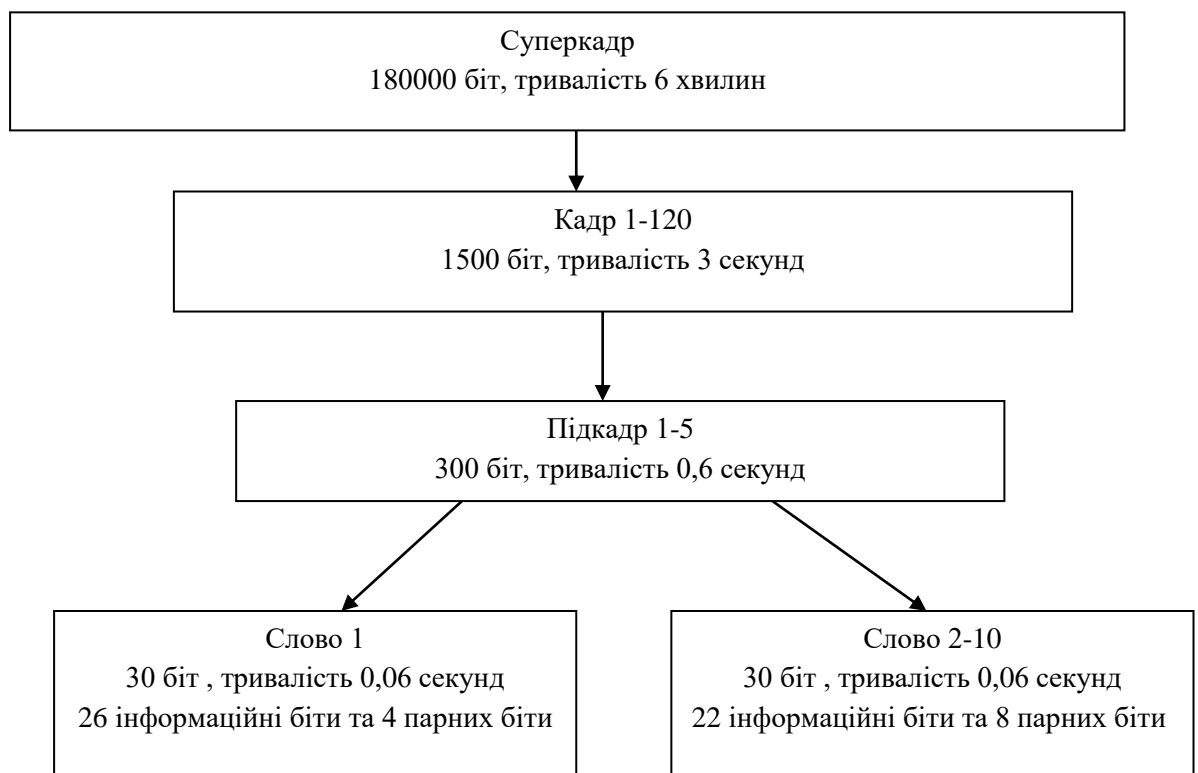


Рис.3.5. Загальна структура навігаційного повідомлення типу D2

Інформація у повідомленні типу D2 включає: основну навігаційну інформація, яка передається супутниками, альманах, корекцію часу відносно інших супутників, цілісність та інформацію про диференційну корекцію системи BDS, інформацію про іоносферну сітку.

Підкадр 1 має змінювати повідомлення 10 разів через 10 сторінок. Підкадр 2, підкадр 3 та підкадр 4 має змінювати повідомлення 6 разів через кожні 6 сторінок. Підкадр 5 повинен бути заміненим 120 разів через 120 сторінок.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

В розділі виконаний огляд процесу розгортання та розвитку китайської супутникової навігаційної системи BeiDou. Досліджено структуру космічного сегменту, якій включає в себе не тільки середньо орбітальні супутники, а і супутники розташовані на геостаціонарних орбітах, що дозволяє значно збільшити зону покриття. Розглянуто структуру та склад навігаційного повідомлення, яке передається користувачам.

РОЗДІЛ 4. АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ BEIDOU

В розділі описано порядок запису вхідних файлів для оцінки точності навігаційних визначень за даними супутників системи BeiDou та їх подальшої обробки програмними засобами у середовищі MatLab. Наводяться отримані цифрові результати та аналізуються графічні дані.

4.1 Методика запису навігаційного повідомлення BeiDou та налаштування приймача

Для проведення експериментальної оцінки точності навігаційних даних за допомогою системи BeiDou, використовуємо наявне діюче обладнання ГННС. Для запису даних використовується навігаційний приймач, який встановлений на кафедрі аеронавігаційних систем в аудиторії 11/322. Приймач приєднаний до антени, яка розташована в точці з відомими координатами. Розташування та вигляд апаратно-програмного комплексу представлений на рисунку 4.1.

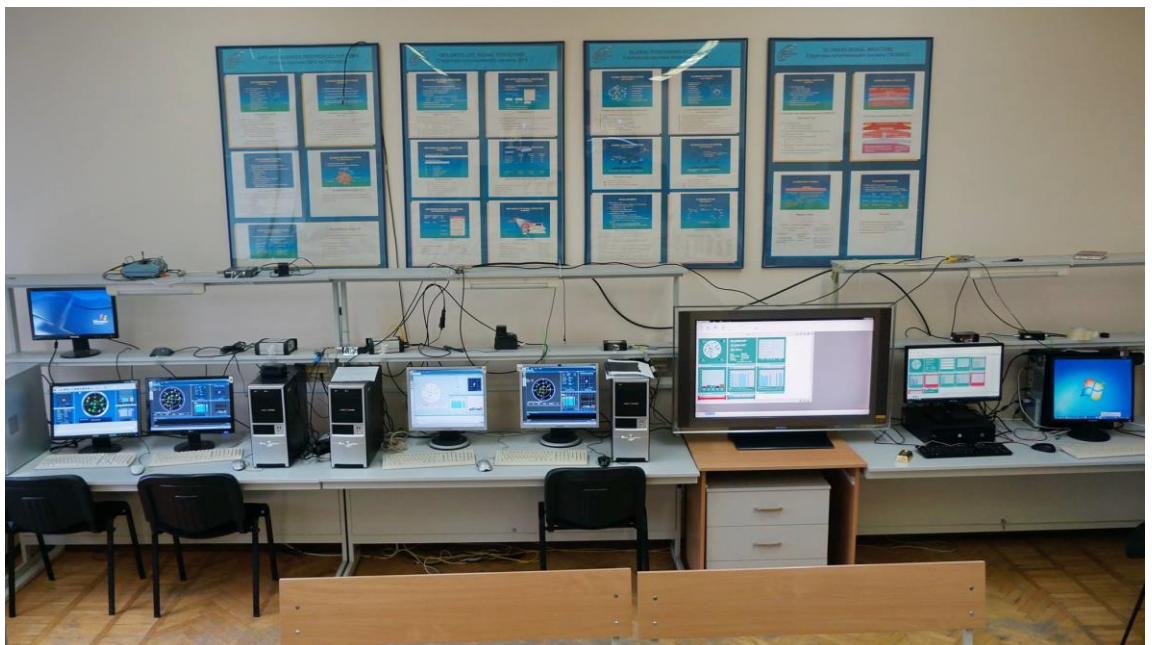


Рис. 4.1 Лабораторія супутникової навігації, де розташоване супутникове навігаційне обладнання.

На рисунку 4.2 представлений інтерфейс Novatel Connect для налаштування навігаційного приймача.

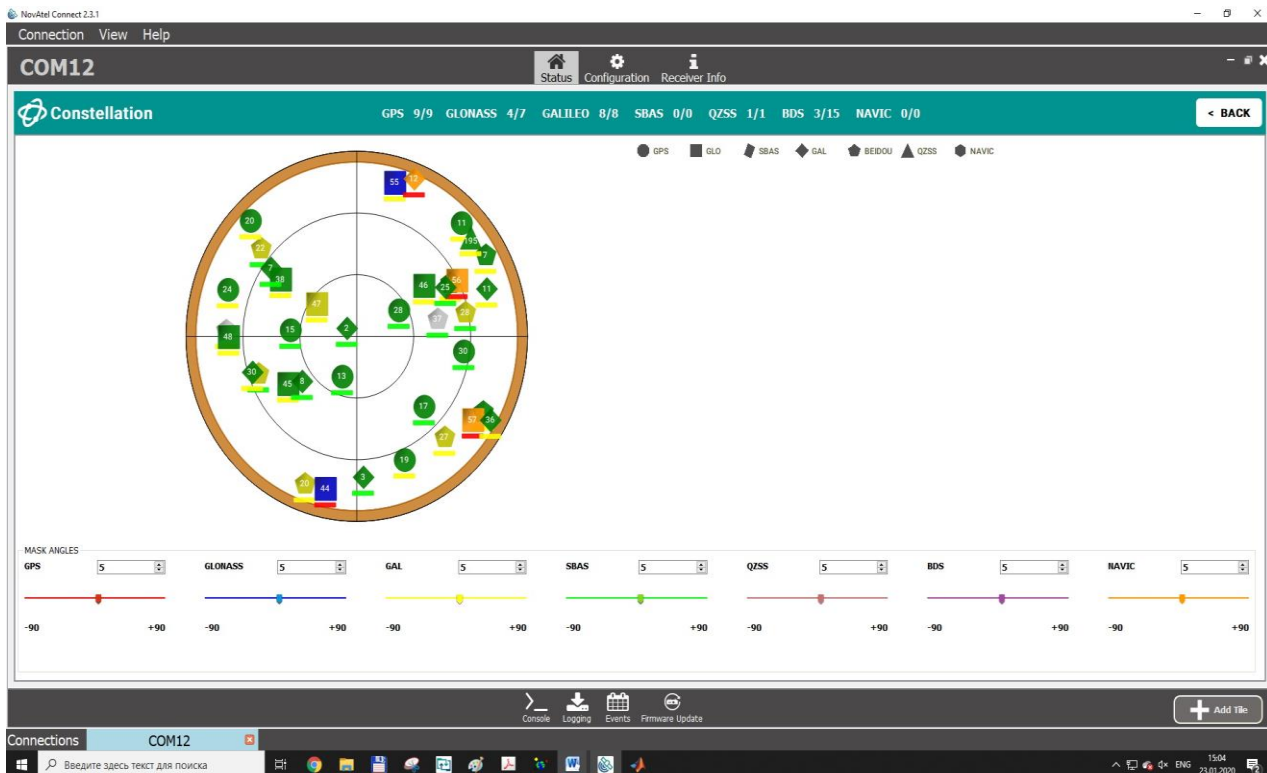


Рис. 4.2 Інтерфейс навігаційного обладнання Novatel Connect

Інтерфейс складається з вікна візуалізації розташування усіх існуючих навігаційних супутникових систем. За допомогою кута маски можливо налаштувати приймач тільки для прийому інформації конкретної супутникової системи (рис. 4.3).

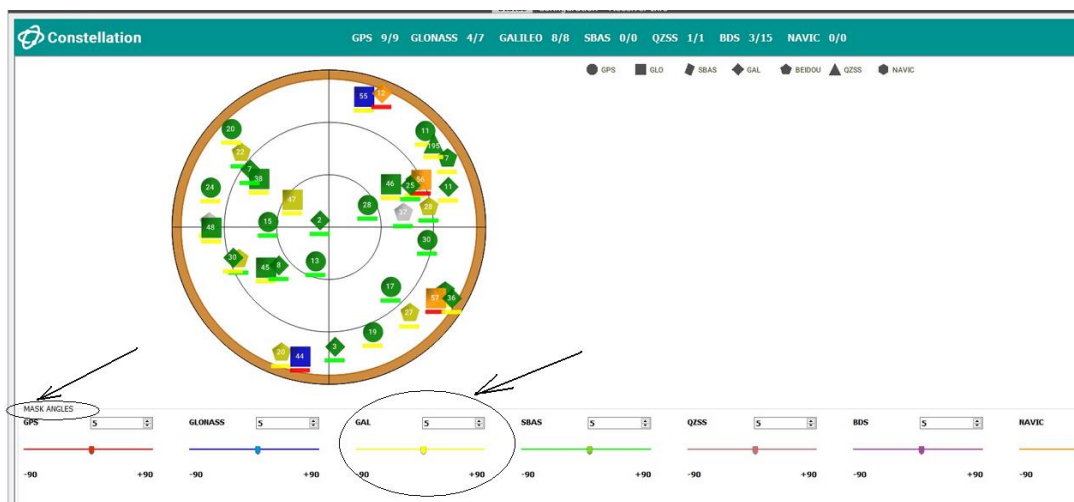


Рис. 4.3 Налаштування навігаційного приймача для конкретної системи

Для налаштування запису навігаційного повідомлення Message ID 42 BESTPOS необхідно обрати в інтерфейсі приймача опцію Logging та обрати потрібне повідомлення (рис. 4.4).

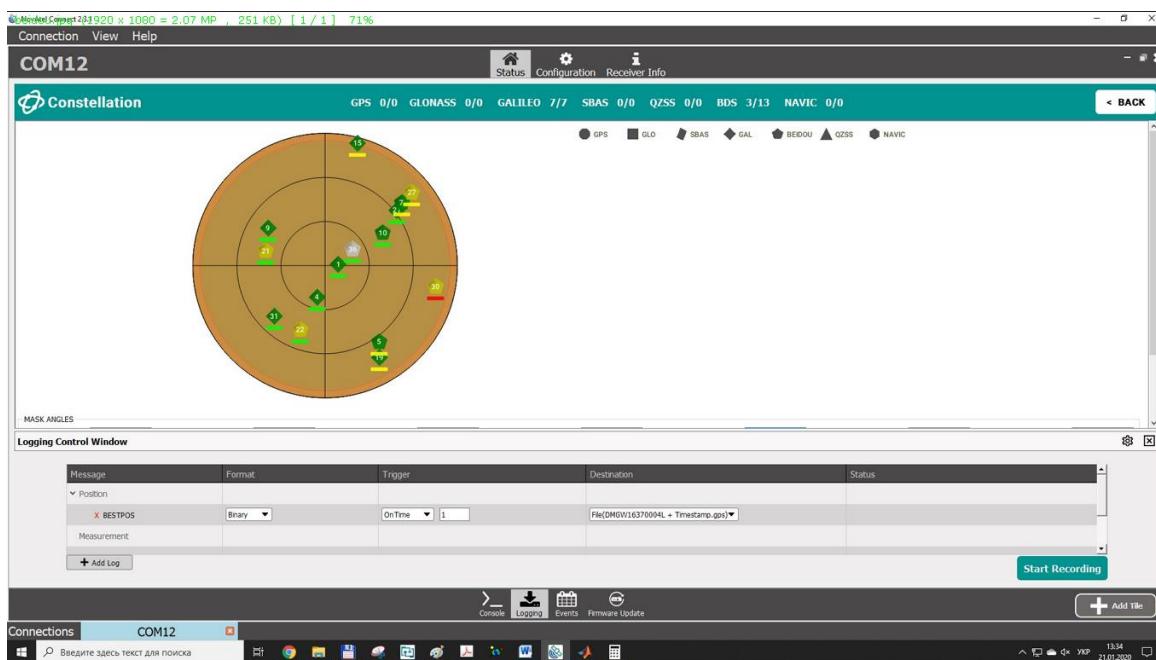


Рис. 4.4. Вибір повідомлення для запису

Наступним кроком є обрати формат та розмір повідомлення для запису.

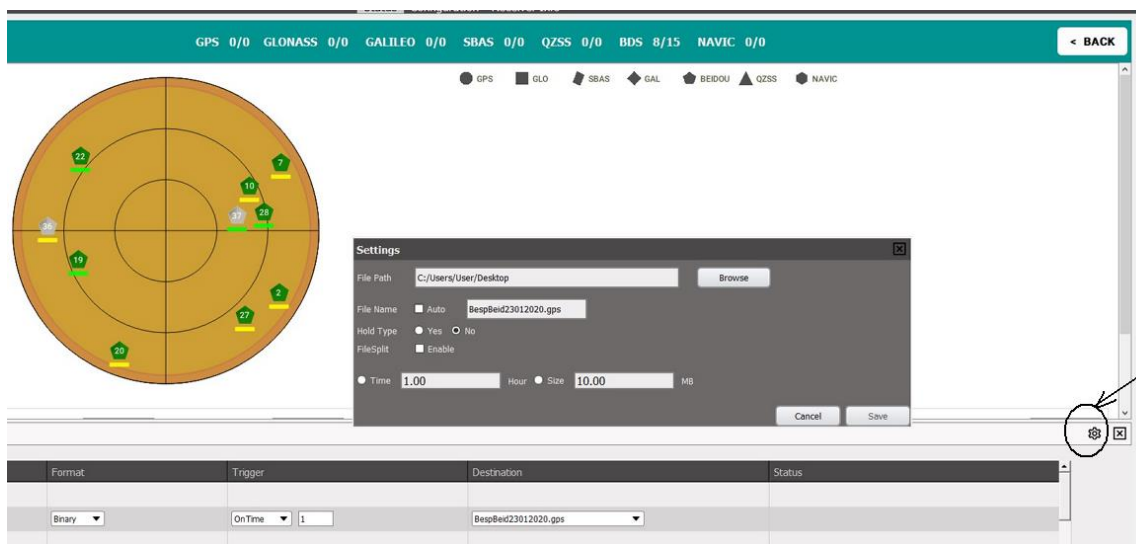


Рис. 4.5. Вибір формату, розміру та місця запису

4.2 Експериментальне дослідження точності системи BeiDou

За допомогою інтерфейсу Novatel Connect приймач супутникової навігації налаштовується на запис повідомлення Message ID 42 BESTPOS. Його формат наведено в табл. 4.1.

В повідомленні BESTPOS міститься наступна інформація, а саме дані про координати користувача, які розраховані за отриманими від доступних навігаційних супутників даними у вигляді довготи, широти та висоти. В цьому повідомленні також міститься інформація про кількість доступних супутників, дані від яких було прийнято, номер тижня супутникової системи, різниця між значеннями геоїда та еліпсоїда, значення середньо квадратичної помилки у визначенні широти, висоти та довготи, диференційна корекція, якщо супутникова система працює з космічним або наземним функціональним доповненням, а також перелік робочих частот. Приклад, вмісту повідомлення BESTPOS наведено на рис. 4.6

```
#BESTPOSA,COM1,0,78.5,FINESTEERING,1419,336208.000,00000040,6145,2724;  
SOL_COMPUTED,NARROW_INT,51.11635910984,-114.03833105168,1063.8416,-16.2712,  
WGS84,0.0135,0.0084,0.0172,"AAAA",1.000,0.000,8,8,8,8,0,01,0,03*3d9fbd48
```

Рис. 4.6 Вміст навігаційного повідомлення BESTPOS

Повідомлення, яке було записано 23.01.2020:

```
#BESTPOSA,SPECIAL_1,0,81.0,FINEBACKUPSTEERING,2089,376853.000,0  
2000000,b1f6,15823;SOL_COMPUTED,SINGLE,50.43906827730,30.429869868  
33,190.8655,25.4000,WGS84,2.9446,2.1383,5.5680,"",0.000,0.000,12,7,7,0,0,02,1  
0,00*17f06fa0
```

Аналізуючи це повідомлення можна отримати наступну інформацію: розраховані координати мають значення широта 50.43906827730 N, довгота 30.42986986833E, висота 190.8655 м; різниця між значеннями геоїда та еліпсоїда 25.4000; значення середньо квадратичної помилки у визначенні широти, висоти та довготи: 2.9446,2.1383,5.5680; загальна доступна кількість супутників – 12; кількість супутників, дані яких приймали участь у розрахунках – 7.

Таблиця 4.1 – формат повідомлення BESTPOS

Field #	Field type	Data Description	Format	Binary Bytes	Binary Offset
1	BESTPOS header	Log header		H	0
2	sol stat	Solution status, see <i>Table 45 on Page 229</i>	Enum	4	H
3	pos type	Position type, see <i>Table 44 on Page 228</i>	Enum	4	H+4
4	lat	Latitude	Double	8	H+8
5	lon	Longitude	Double	8	H+16
6	hgt	Height above mean sea level	Double	8	H+24
7	undulation	Undulation - the relationship between the geoid and the ellipsoid (m) of the chosen datum ^a	Float	4	H+32
8	datum id#	Datum ID number (see <i>Chapter 2, Table 21, Datum Transformation Parameters on Page 93</i>)	Enum	4	H+36
9	lat σ	Latitude standard deviation	Float	4	H+40
10	lon σ	Longitude standard deviation	Float	4	H+44
11	hgt σ	Height standard deviation	Float	4	H+48
12	stn id	Base station ID	Char[4]	4	H+52
13	diff_age	Differential age in seconds	Float	4	H+56
14	sol_age	Solution age in seconds	Float	4	H+60
15	#SVs	Number of satellite vehicles tracked	Uchar	1	H+64
16	#solnSVs	Number of satellite vehicles used in solution	Uchar	1	H+65
17	#obs	Number of single and multi frequency observations in solution	Uchar	1	H+66
18	#multi	Number of multi frequency observations in solution	Uchar	1	H+67
19	Reserved		Uchar	1	H+68
20	ext sol stat	Extended solution status (see <i>Table 47, Extended Solution Status on Page 230</i>)	Hex	1	H+69
21	Reserved		Hex	1	H+70
22	sig mask	Signals used mask - if 0, signals used in solution are unknown (see <i>Table 46 on Page 230</i>)	Hex	1	H+71
23	xxxx	32-bit CRC (ASCII and Binary only)	Hex	1	H+72
24	[CR][LF]	Sentence terminator (ASCII only)	-	-	-

4.3 Результати експериментальних досліджень оцінки точності BeiDou

В процесі дослідження було записано два повідомлення BESTPOS з різним часовим інтервалом.

Повідомлення BESTPOS записане 21.01.2020 протягом години.

На рисунках 4.7-4.13 представлена візуалізація даних декодованих з повідомлення BESTPOS.

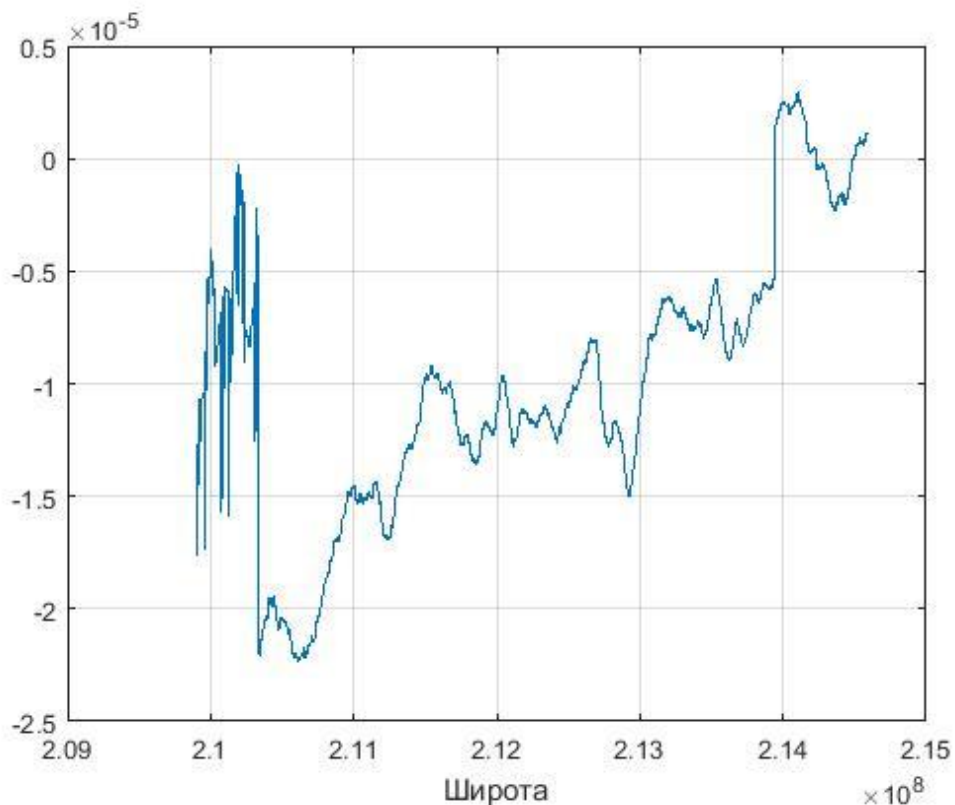


Рис. 4.7 Визначення широти

На графіку по вісі абсцис відкладено час вимірювання в секундах, а по вісі ординат визначення широти. Визначення розраховувалися як різниця між еталонним значенням та вимірюваним. Відповідно широта має не значну похибку вимірювання в межах $-2 \cdot 10^{-5}$ градуси, що не є критичним для користувачів системи BeiDou.

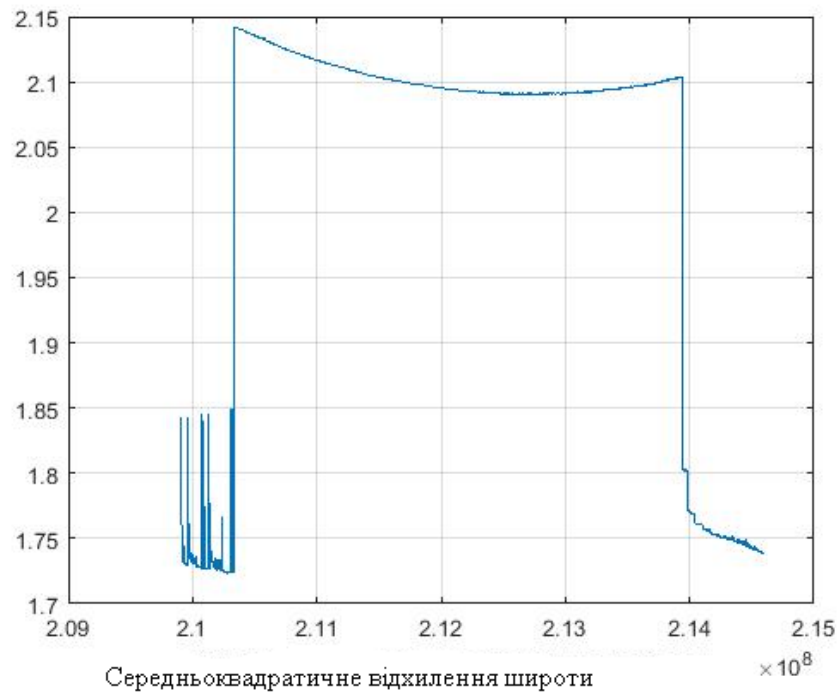


Рис. 4.8 Середньоквадратичне відхилення широти

На графіку по вісі абсцис відкладено час вимірювання в секундах, а по вісі ординат визначення середньоквадратичного відхилення широти. Аналізуючи графік відзначаємо, що найменше середньоквадратичне відхилення на початку та в кінці вимірювання та становить відповідно 1.85 градусів та 1.73 градусів, в інший період часу середньоквадратичне відхилення збільшується в межах від 2.15 до 2.1 градуса. Це пов'язано з кількістю та рухом супутників в небесній сфері над користувачем.

На графіках (рис. 4.9-4.10) представлені визначення довготи та середньоквадратичне відхилення довготи. Аналізуючи графіки відзначаємо, що найменше середньоквадратичне відхилення на початку та в кінці вимірювання та становить відповідно 2.35 та 2.82 градуси, в інший період часу середньоквадратичне відхилення збільшується в межах від 3.1 до 2.82 градуси.

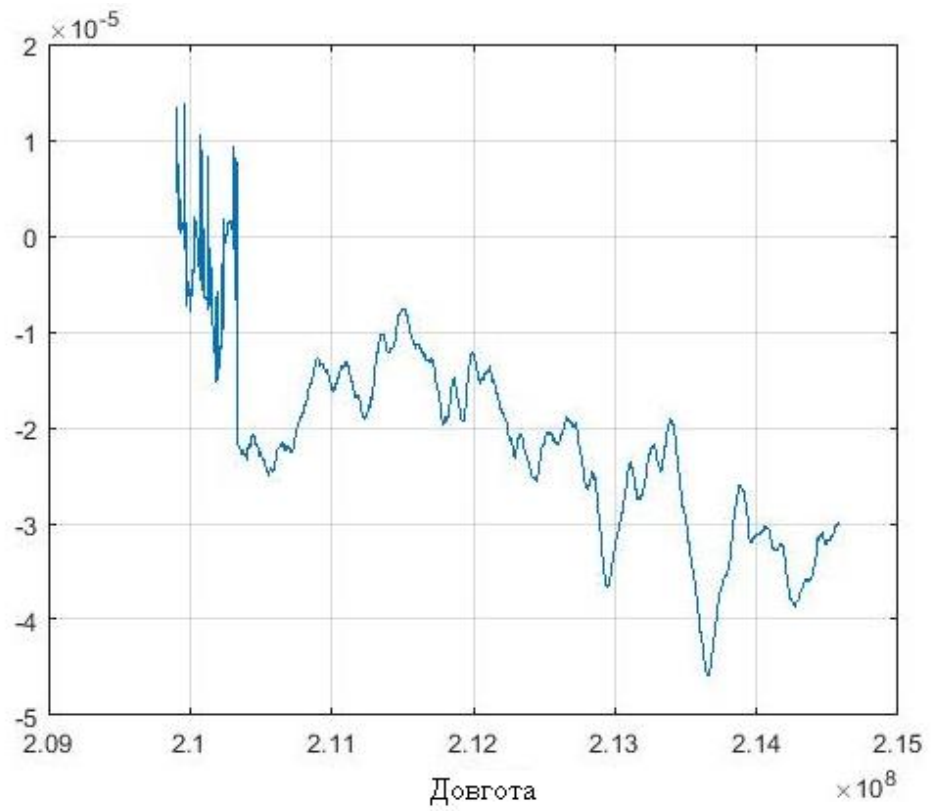


Рис. 4.9 Визначення довгота

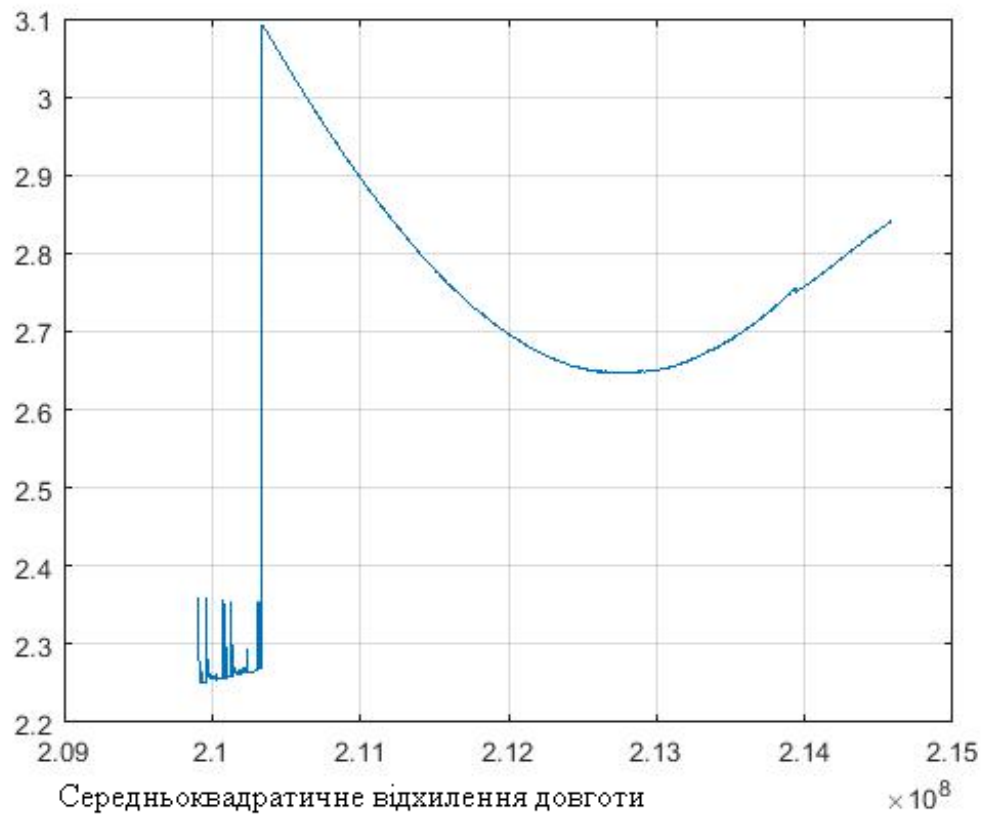


Рис. 4.10 Середньоквадратичне відхилення довготи

На графіках (рис. 4.11-4.12) представлені визначення висоти та середньоквадратичне відхилення висоти. Аналізуючи графіки визначення висоти відзначаємо, що похибка визначення більше ніж в горизонтальній площині. Це пов'язано з затримкою при проходженні сигналу крізь атмосферу. Відповідно вклад похибки в розрахунок координат користувача в вертикальній площині буде більший, ніж в горизонтальній.

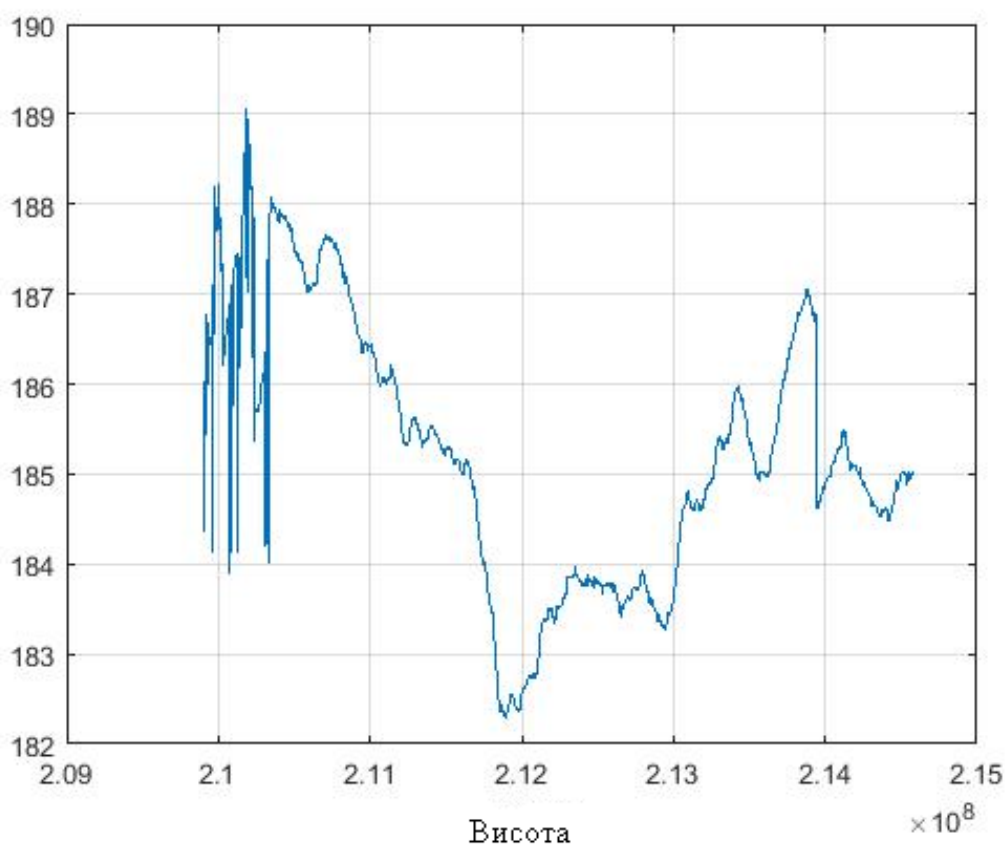


Рис. 4.11 Визначення висоти

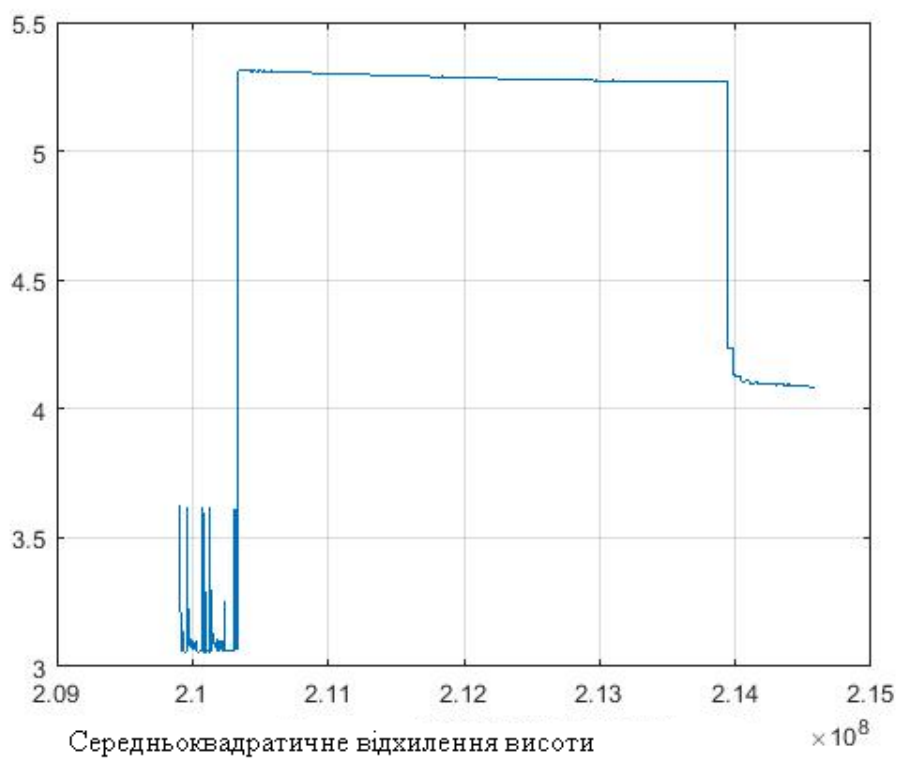


Рис. 4.12 Середньоквадратичне відхилення висоти

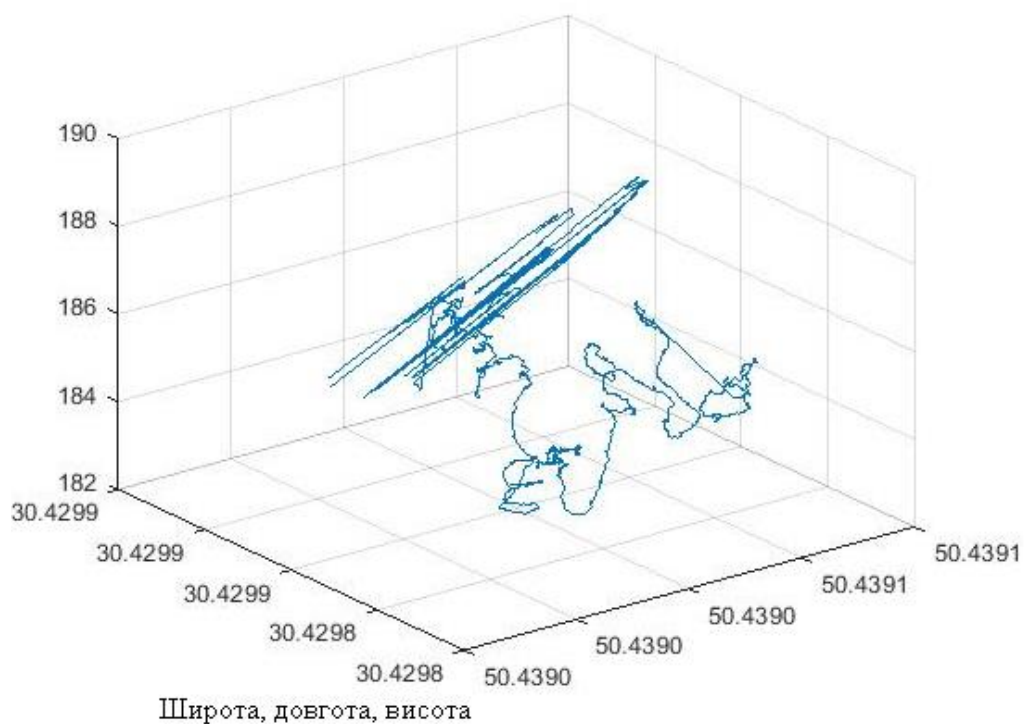


Рис. 4.13 Визначення широти, довготи та висоти в декартових координатах

На рис. 4.13 представлені визначення широти, довготи та висоти в декартових координатах, по вісі X відкладена координата широти в градусах, по вісі Y відкладена координата в градусах та по вісі Z відкладена висота в метрах.

Повідомлення BESTPOS записане 23.01.2020 протягом чотирьох години.

На рисунках 4.14-4.21 представлена візуалізація даних декодованих з повідомлення BESTPOS.

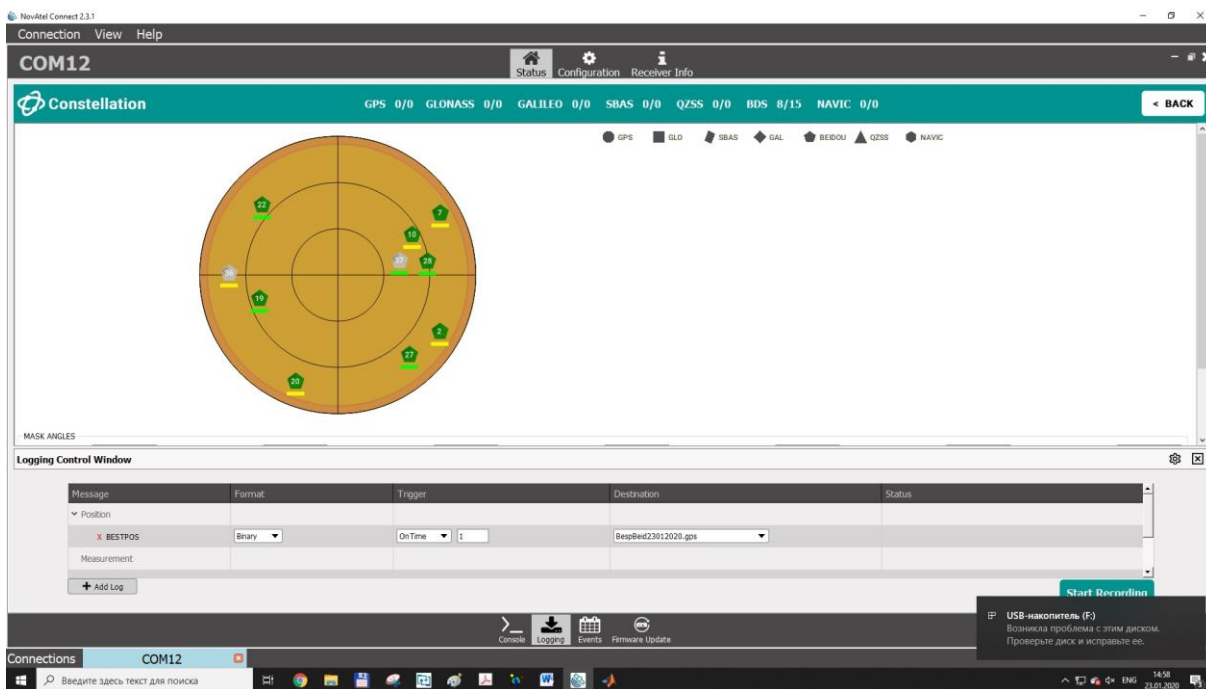


Рис. 4.14 Розташування супутників системи BeiDou

Розташування супутників системи BeiDou на небесній сфері над координатами користувача представлено на рис. 4.14.

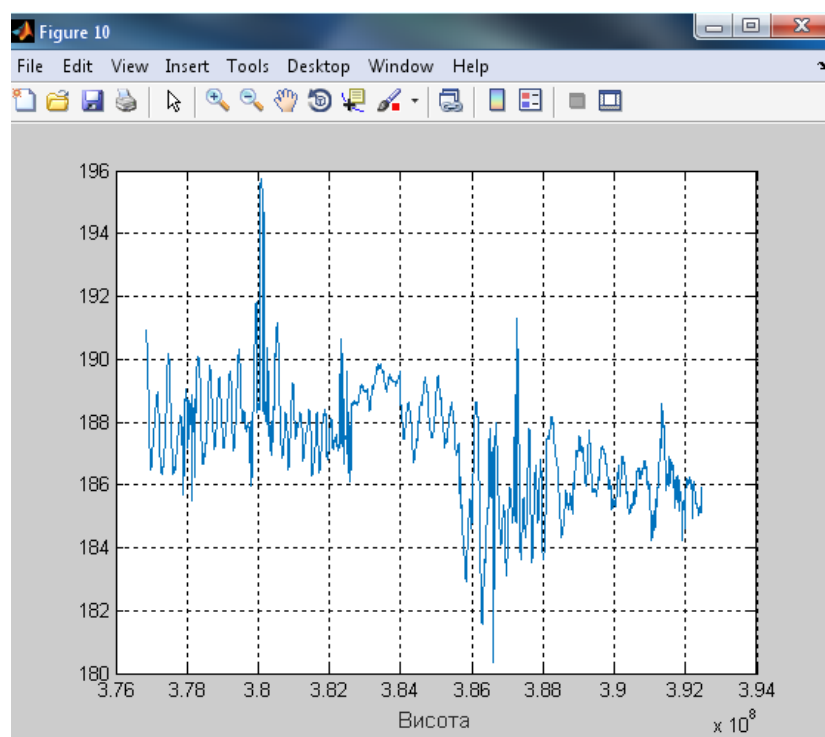


Рис. 4.15 Визначення висоти

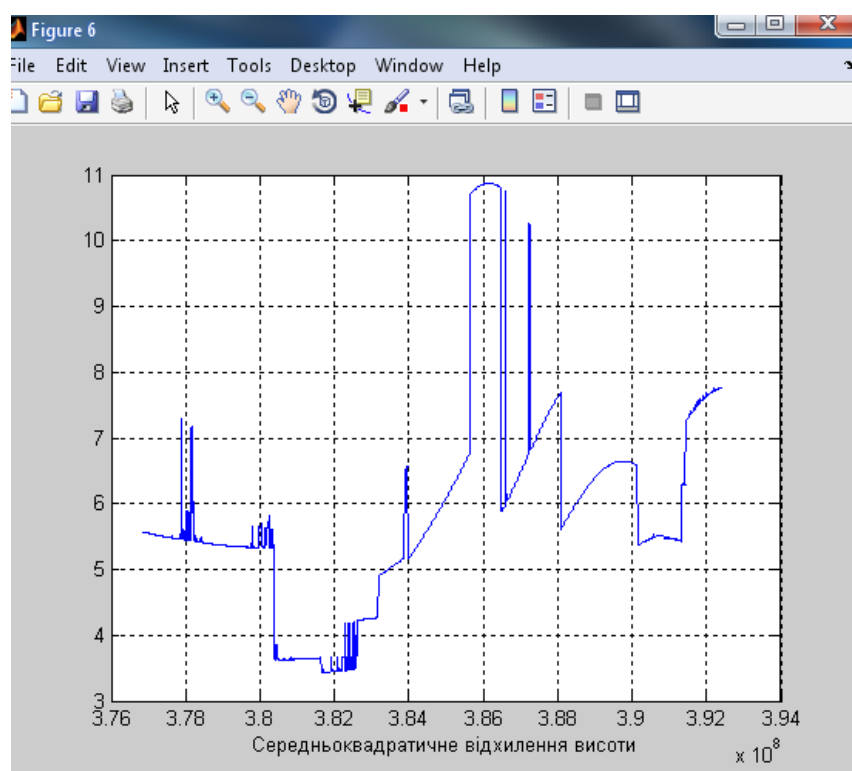


Рис. 4.16 Середньоквадратичне відхилення висоти

На графіках (рис. 4.15-4.16) представлені визначення висоти та середньоквадратичне відхилення висоти. Аналізуючи графіки визначення висоти відзначаємо, що похибка визначення більше ніж в горизонтальній

площині. Це пов'язано з затримкою при проходженні сигналу крізь атмосферу та кількістю супутників на момент визначення координат.

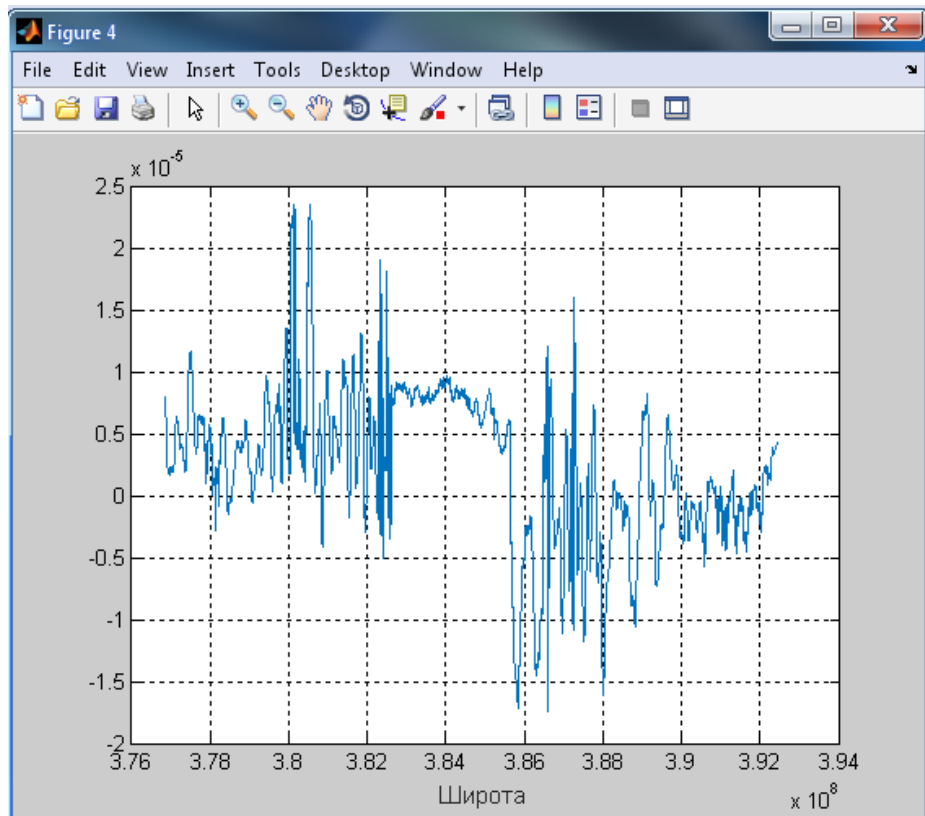


Рис. 4.17 Визначення широти

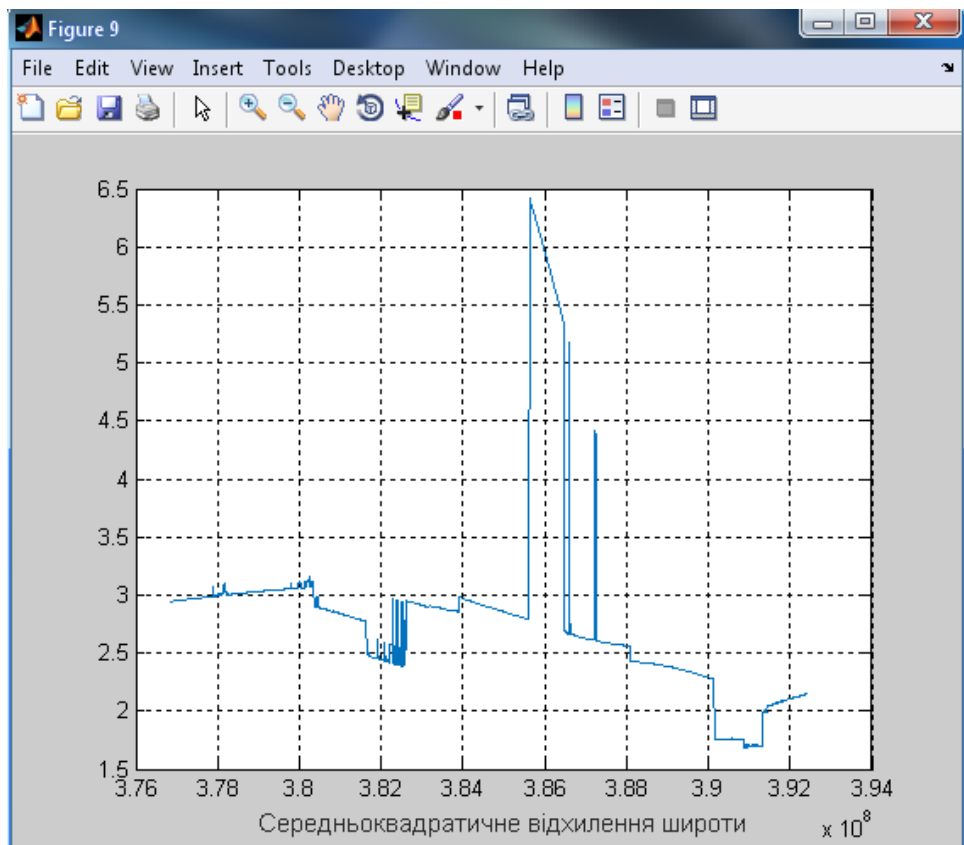


Рис. 4.18 Середньоквадратичне відхилення широти

На графіку по вісі абсцис відкладено час вимірювання в секундах, а по вісі ординат визначення широти. Аналізуючи графіки визначення широти та середньоквадратичного відхилення широти відзначаємо, що при довготривалому накопиченні даних точність визначення збільшується.

Відповідно широта має не значну похибку вимірювання в межах $0.5 \cdot 10^{-5}$ градуса, що є добрим показником для користувачів системи Veidou.

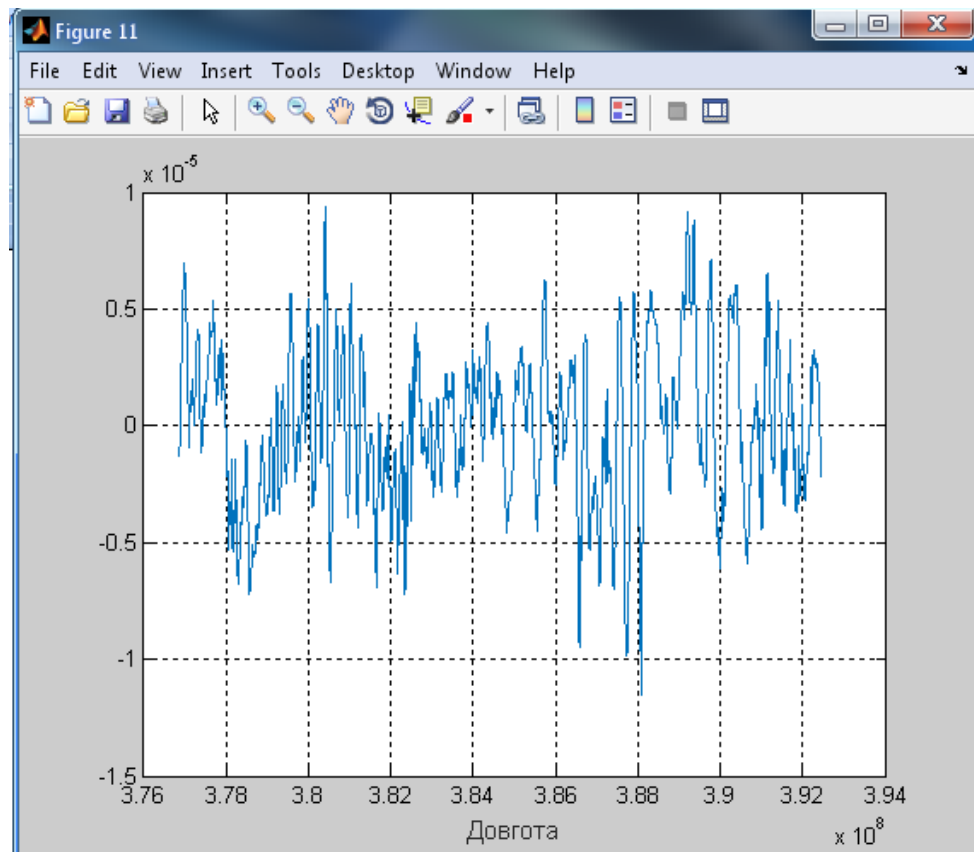


Рис. 4.19 Визначення довгота

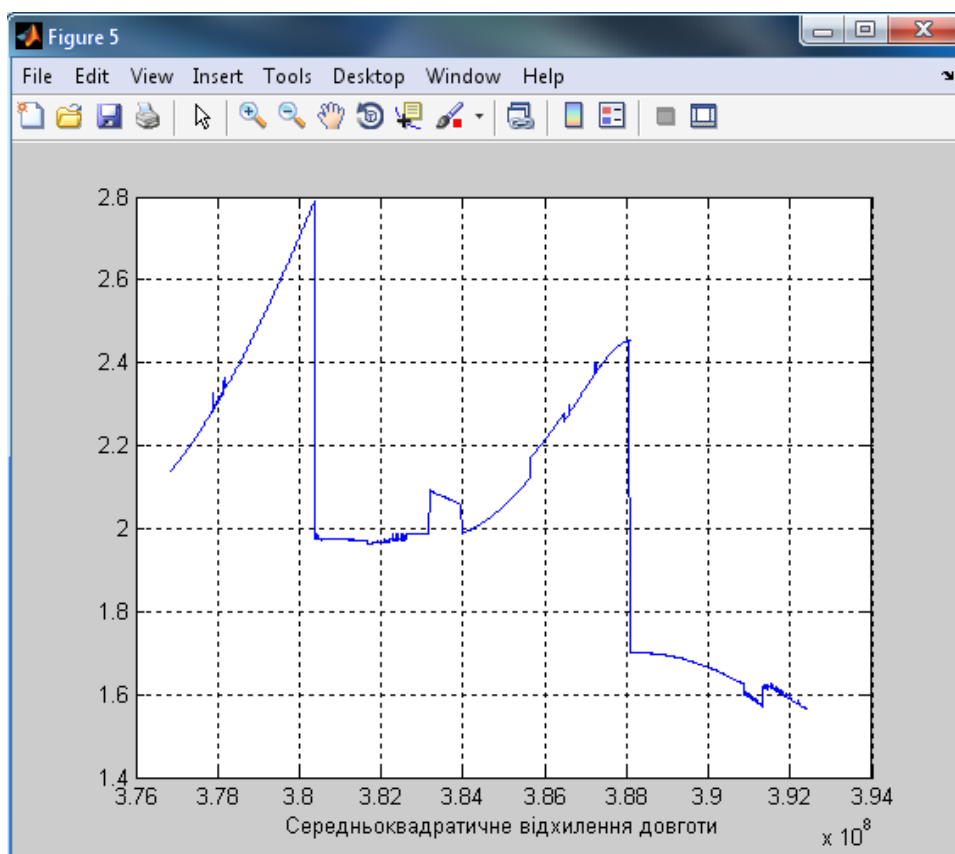


Рис. 4.20 Середньоквадратичне відхилення довготи

На графіках (рис. 4.19-4.20) представлені визначення довготи та середньоквадратичне відхилення довготи. Аналізуючи графіки відзначаємо, що найменше середньоквадратичне відхилення в кінці вимірювання та становить відповідно 1.5 градуса.

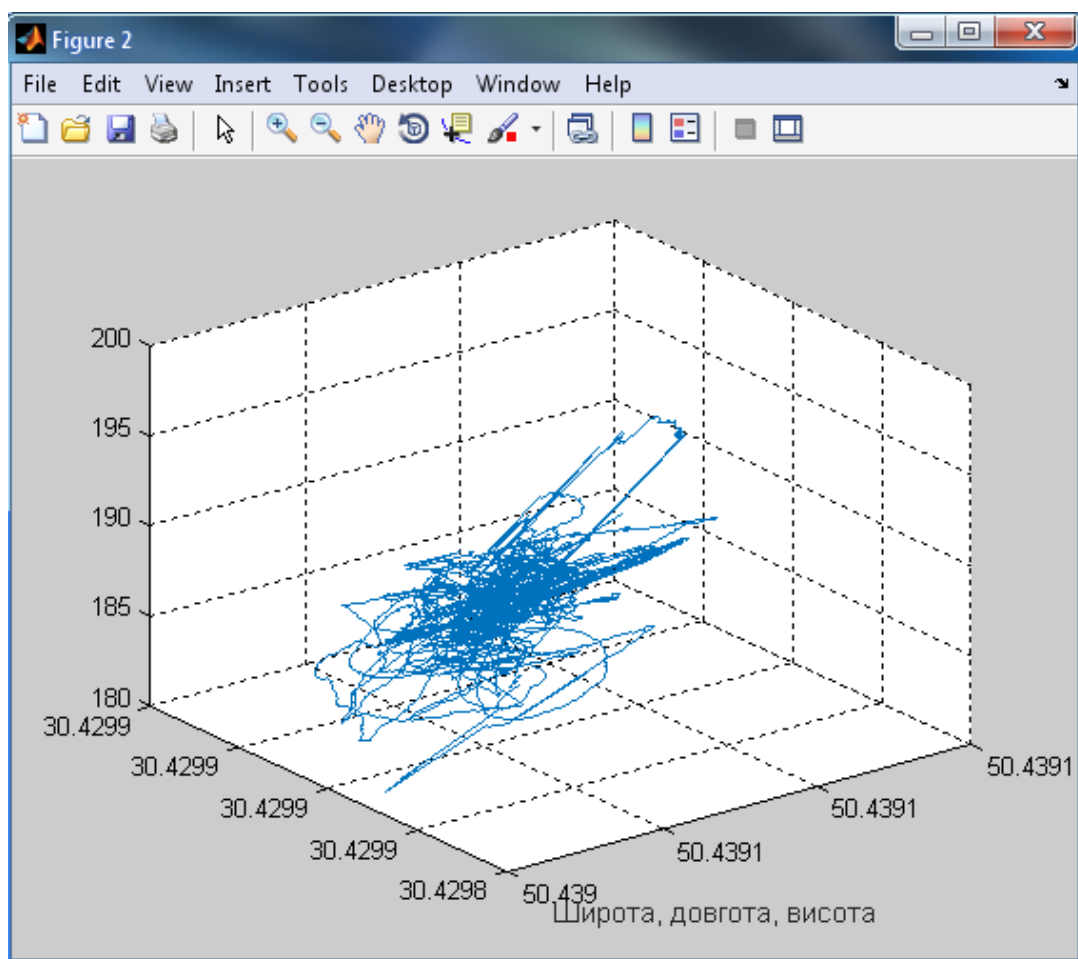


Рис. 4.21 Визначення широти, довготи та висоти в декартових координатах

На рис. 4.21 представлені визначення широти, довготи та висоти в декартових координатах, по вісі X відкладена координата широти в градусах, по вісі Y відкладена координата в градусах та по вісі Z відкладена висота в метрах. Скупчення вимірювань в центрі графіку дозволяє сказати, що розкид вимірювань визначень не значний.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 4

У розділі наведено теоретичні основи для проведення натурального експерименту. Описані кроки налаштування приймача для отримання навігаційного повідомлення від однієї конкретної системи.

Запропонована методика запису навігаційного повідомлення BESTPOS, яка містить інформацію про координати користувача в форматі широта, довгота, висота, дозволила одержати дані, які необхідні для оцінки точності визначень координат користувача.

Для візуалізації результатів застосовувалося середовище Matlab. В результаті обробки даних отримали середньоквадратичні похибки по трьом координатам, що дало можливість оцінити точність визначення координат супутникової навігаційною системою Beidou.

Зважаючи на результати визначень середньоквадратичних похибок, система Beidou задовольняє необхідні вимоги для систем GNSS та може використовуватися самостійно при визначенні координат користувача.

Але необхідно зважати на те, що система Beidou ще розгорнута неповністю і при зміні кількості супутників можливе погіршення точності, особливо в вертикальній площині.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

На початковому етапі виконання дипломного дослідження було проаналізовано існуючі навігаційні супутникові систем. Прагнення багатьох країн світу мати власну незалежну супутникову систему доводить, що космічна інфраструктура може задовольнити попит на отримання навігаційної інформації. Навігаційні супутникові системи сприяють розвитку економіки та соціальної сфери, все більше входячи в сучасне життя людства.

Міжнародними організаціями були розроблені стандарти та вимоги до складу та технічних характеристик супутникових навігаційних систем. На даний час модернізація та удосконалення систем GNSS продовжується.

На наступному етапі було виконано огляд процесу розгортання та розвитку китайської супутникової навігаційної системи BeiDou. Досліджено структуру космічного сегменту, яка в своєму складі різні типи орбітальних площин, тобто середньоорбітальні супутники, супутники розташовані на геостаціонарних орбітах та супутники розташовані на геосинхронних орбітах. Розглянута структура та склад навігаційного повідомлення, яке передається користувачам, відповідає усім вимогам для передачі супутникової навігаційної інформації.

В подальшому приведена методика налаштування навігаційного приймача для отримання повідомлення від китайської супутникової навігаційної системи BeiDou.

Не зважаючи на те, що для отримання координат користувача система Beidou забезпечує гарну точність, при зміні кількості супутників можливе погіршення точності в даний момент часу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Конин В.В., Харченко В.П. Системы спутниковой радионавигации; Национальный авиационный университет.-К.:Холтех,2010.-520 с.
2. BeiDou Navigation Satellite System Interface Control Document «Signal In Space Open Service Signal B1I (Version 3.0)», 2019.
3. Б. Гофман – Велленгоф, Г. Ліхтенеггер та Д. Коллінз, «Основи визначення місцеположення та скеровування», Київ: Наук. Думка, 1996.
4. Global Positioning Systems directorate, «Interface specification IS-GPS-200: Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interface», 2013.
5. Qin, Z.; Huang, G.; Zhang, Q.; Wang, L.; Yan, X.; Xie, S.; Cao, Y.; Wang, X. Precise Orbit Determination for BeiDou GEO/IGSO Satellites during Orbit Maneuvering with Pseudo-Stochastic Pulses [Електронний ресурс]/ Qin, Z.; Huang, G.; Zhang, Q.; Wang, L.; Yan, X.; Xie, S.; Cao, Y.; Wang X. - Remote Sens, 2019. – Режим доступу URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/21/2587>. - доступ 20.10.2019.
6. Офіційний сайт європейської навігаційної супутникової системи Galileo. - Режим доступу URL: <https://galileognss.eu/four-new-galileos-join-europes-largest-constellation/#more-3542> – доступ 20.01.2020.
7. Офіційний сайт навігаційної супутникової системи GPS. . - Режим доступу URL: <https://www.gps.gov> – доступ 15.12.2019.
8. Офіційний сайт російської навігаційної супутникової системи ГЛОНАСС. . - Режим доступу URL: <https://www.glonass-iac.ru> – доступ 14.01.2020.
9. Офіційний сайт індійського космічного агентства ISRO. - Режим доступу URL: <https://www.iso.gov.in/pdf>. - доступ 27.11.2019.
10. Офіційний сайт китайської навігаційної супутникової системи Beidou. - Режим доступу URL: <https://www.beidou.gov.cn> – доступ 14.01.2020.
11. China's BeiDou Navigation Satellite System The State Council Information Office of the People's Republic of China, June, 2016.

- 12.OEMV Family Firmware Version 3.200 OM-20000129 Rev 4, August, 2013.
- 13.Lachepelle G. GPS theory and application // ENGO 625 Lecture Notes, Department of Geomatics Engineering, the University of Calgary, 2000.
- 14.Langly R.B. GPS Receivers and the observables // GPS for Geodesy, Eds P.J.G. Teunissen, A. Kleusberg, Springer, 1996.
- 15.Hedgley D.R. An Exact Transformation from Geocentric to Geodetic Coordinates for Non zero Attitudes// NASA Technical Report: TR R – 458, 1976.
- 16.Strong G., Borre K. Linear algebra, Geodesy and GPS, Wellesley – Cambridge Press, Wellesley, MA, USA.
- 17.Гофман-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д., Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика. – К.: Наукова думка, 1996.
- 18.Lachapelle G. Advanced GPS – Theory and Application, ENGO 625, Lectures Notes, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, 2004.
- 19.El. Mowafy. Using Reference Station GPS Network for Aircraft Precision Approach and Airport Surface Navigation // Journal of Global Positioning Systems, vol. 4, no 1-2, 2005.
- 20.Seeber G. Satellite geodesy: Foundation, Methods and Applications, Walter de Gruer, 1993/
- 21.Lachapelle G., Cannon M.E., Ericson C. High precision C/A code technology for rapid static DGPS survey // Proc. of 6-th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, 17-20 March, 1992.
- 22.Grewal M.S., Andrews A.P. Kalman Filtering: Theory and Practice using MATLAB, Prentice-Hall, 2-nd Edition, 2001.
- 23.Phalke S. GPS and Gallileo Performance Evaluation for Multiple Reference station Network Positioning [Електронний ресурс] / Phalke S.. // ION NTM 2006, January 18-20, 2006. – Режим доступу URL: <https://schulich.ucalgary.ca/labs/position-location-and->

[navigation/files/position-location-and-navigation/phalke2006_conference.pdf](#)

- доступ 23.11.2019.

24. Fotiou A., Pigridas C. Evaluation of the potential accuracy of real time GPS positioning using the Internet Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields, Sofia, 06..07 November, 2008.
25. Ong R. Reliability of Combined GPS/GLONASS Ambiguity Resolution // [Электронный ресурс] / Ong R.. // July 2010. – Режим доступа URL: https://schulich.ucalgary.ca/labs/position-location-and-navigation/files/position-location-and-navigation/ong2010_msc.pdf - доступ 22.12.2019.
26. Евстафьев О.В. Наземная инфраструктура ГНСС для точного позиционирования // Геопрофи, № 1-4, 2008.
27. Chen A GNSS over China. The Compass MEO satellite codes / A. Chen, D. de Lorenzo, P. Enge, GX. Gao, S. Lo // Inside GNSS.-2007.- Issue 2(5).- P. 36-43.
28. De Wilde W. More Compass points. Tracking China's MEO satellite on a hardware receiver / De Wilde W., F. Boon, J-M. Sleewaegen, F. Wilms // Inside GNSS.-2007.- Issue 2(5) .- P. 44-48.
29. Teunissen P.J.G. Adjustment theory : an introduction . Delft University, Press, Delf, 2000.

Лістинг програми декодування

```

clear all
close all
%Програма декодування повідомлення навігаційного приймача
%"Message ID: 42" позиція приймача
name_in = 'In_dat\BespBeid23012020.gps';
fid = fopen(name_in,'rb') %

f_Lat = fopen('Out_dat\Lat_BespBeid23012020.txt','Wt');%запис
f_Lon = fopen('Out_dat\Lon_1BespBeid23012020.txt','Wt');%запис
f_H = fopen('Out_dat\H_BespBeid23012020.txt','Wt');%запись
Sigma_Lat = fopen('Out_dat\SigmaLat_BespBeid23012020.txt','Wt');%запис
Sigma_Lon = fopen('Out_dat\SigmaLon_BespBeid23012020.txt','Wt');%запис
Sigma_H = fopen('Out_dat\SigmaH_BespBeid23012020.txt','Wt');%запис
T_ime = fopen('Out_dat\Time_BespBeid23012020.txt','Wt');%запис

kol=i;
i=0;
while ( ~feof(fid))
% for i=1:kol
i=i+1;
Hear_d= fread(fid,4,'uchar'); %B OEM-4 'Uchar'
if ( ~feof(fid))
%%%%%%%%%%
fread(fid,1,'uint16'); % Message_ID
fread(fid,1,'uchar'); %Message_Typ
fread(fid,1,'uchar'); %Port_Address
fread(fid,1,'uint16'); %Message_Length
fread(fid,1,'uint16');%Sequenc_e
fread(fid,1,'uchar');% Idle_Time
fread(fid,1,'uchar'); % Time_Status
fread(fid,1,'uint16');% week_1

TimeGPS_j(i) = fread(fid,1,'uint');
fread(fid,1,'uint');%Res_Status
fread(fid,1,'uint');%Rezerv
fread(fid,1,'uint16');%d_fcc

```

```

%d_fcc = dec2hex(d_fcc)
s1 = fread(fid,1,'uint16');%e1
s2(i) = fread(fid,1,'uint16') ;%n_sv
s3 = fread(fid,2,'uchar');% N_ul
%%%%%%%%%%
    Lat(i) = fread(fid,1,'double');
    Lon(i) = fread(fid,1,'double');
    H_h(i) = fread(fid,1,'double');
fread(fid,1,'float'); %Und = волна геоїда
fread(fid,4,'uchar');%Datum_ID - система координат
Lat_sigma(i) = fread(fid,1,'float');
Lon_sigma(i) = fread(fid,1,'float');
H_sigma(i) = fread(fid,1,'float');

fread(fid,4,'uchar');% Stn_ID
fread(fid,1,'float');%Diff_age
fread(fid,1,'float');%Sol_age
fread(fid,1,'uchar');%N_SVs
fread(fid,1,'uchar');%N_solnSVs
fread(fid,1,'uchar');%N_obs
fread(fid,1,'uchar');%N_multi
fread(fid,1,'uchar');%R_eserv
fread(fid,1,'uchar');%HEX_C
HEX_CRC=fread(fid,6,'uchar');% HEX_CRC
CRC= dec2hex(HEX_CRC) ;
end
end

TimeGPS_j;
figure(1)
plot(TimeGPS_j,Lat-50.4390605), grid on
xlabel('Широта')
figure(2)
plot(TimeGPS_j,Lon-30.4298711), grid on
xlabel('Довгота')
figure(3)
plot(TimeGPS_j,H_h), grid on
xlabel('Висота')
figure(4)

```

```

plot(TimeGPS_j,Lat_sigma), grid on
xlabel('Середньоквадратичне відхилення широти')
figure(5)
plot(TimeGPS_j,Lon_sigma), grid on
xlabel('Середньоквадратичне відхилення довготи')
figure(6)
plot(TimeGPS_j,H_sigma), grid on
xlabel('Середньоквадратичне відхилення висоти')

```

```

figure(7)
plot3(Lat,Lon,H_h ), grid on
xlabel('Широта, довгота, висота')

```

```

figure(8)
plot(TimeGPS_j,s2, '-'), grid on
xlabel('тип')

```

```

fprintf(f_Lat , '%f\n', Lat)
fclose(f_Lat)
fprintf(f_Lon, '%f\n', Lon)
fclose(f_Lon)
fprintf(f_H, '%f\n', H_h)
fclose(f_H)

```

```

fprintf(Sigma_Lat , '%f\n', Lat_sigma)
fclose(Sigma_Lat)
fprintf(Sigma_Lon, '%f\n', Lon_sigma)
fclose(Sigma_Lon)
fprintf(Sigma_H, '%f\n', H_sigma)
fclose(Sigma_H)

```

```

fprintf( T_ime, '%f\n', TimeGPS_j)
fclose(T_ime)
fclose(fid);

```

Додаток 2

*Таблиця 1-Числові значення для візуалізації оцінки точності системи VeIDou
(повідомлення від 21.01.2020)*

№	ЧАС, секунда	Широта, градус	Довгота, градус	Висота, метр	СКВ, широта	СКВ, довгота	СКВ, висота
1	209910000.000000	50.439043	30.429885	184.356541	1.842572	2.360677	3.622837
2	209911000.000000	50.439046	30.429878	185.543716	1.773455	2.292468	3.281840
3	209912000.000000	50.439047	30.429877	185.853226	1.760801	2.280039	3.217715
4	209913000.000000	50.439048	30.429874	186.294064	1.758433	2.277838	3.205667
5	209914000.000000	50.439049	30.429873	186.512514	1.750952	2.270610	3.166854
6	209915000.000000	50.439047	30.429877	185.877305	1.754165	2.273788	3.183314
7	209916000.000000	50.439046	30.429879	185.433992	1.752629	2.272313	3.175136
8	209917000.000000	50.439050	30.429872	186.764729	1.731539	2.252020	3.061017
9	209918000.000000	50.439047	30.429877	185.756733	1.749256	2.269238	3.156495
10	209919000.000000	50.439048	30.429875	185.988771	1.745350	2.265463	3.136512
11	209920000.000000	50.439047	30.429876	185.910082	1.746615	2.266677	3.143720
12	209921000.000000	50.439047	30.429877	185.708181	1.754201	2.273813	3.183670
13	209922000.000000	50.439047	30.429876	185.815110	1.744081	2.264497	3.129062
14	209923000.000000	50.439048	30.429875	185.966014	1.744195	2.264491	3.131232
15	209924000.000000	50.439048	30.429875	186.112829	1.736998	2.257473	3.094930
16	209925000.000000	50.439048	30.429874	186.163620	1.739569	2.259963	3.107863
17	209926000.000000	50.439048	30.429874	186.212657	1.742197	2.262685	3.121387
18	209927000.000000	50.439048	30.429874	186.212639	1.739817	2.260411	3.109060
19	209928000.000000	50.439049	30.429873	186.275668	1.738039	2.258734	3.099629
20	209929000.000000	50.439050	30.429871	186.687477	1.730416	2.251441	3.059540
21	209930000.000000	50.439048	30.429874	186.129267	1.744436	2.264922	3.133784

Додаток 3

*Таблиця 1-Числові значення для візуалізації оцінки точності системи Veidou
(повідомлення від 23.01.2020)*

№	ЧАС, секунда	Широта, градус	Довгота, градус	Висота, метр	СКВ, широта	СКВ, довгота	СКВ, висота
1	376852000.000000	50.439068	30.429870	190.905416	2.944505	2.138172	5.568070
2	376853000.000000	50.439068	30.429870	190.865505	2.944553	2.138302	5.567956
3	376854000.000000	50.439068	30.429870	190.851765	2.944698	2.138467	5.568290
4	376855000.000000	50.439068	30.429870	190.834755	2.944741	2.138575	5.568159
5	376856000.000000	50.439068	30.429870	190.825810	2.944752	2.138676	5.567883
6	376857000.000000	50.439068	30.429870	190.787223	2.944672	2.138742	5.567360
7	376858000.000000	50.439068	30.429870	190.763608	2.944718	2.138867	5.567234
8	376859000.000000	50.439068	30.429870	190.752467	2.944827	2.139016	5.567225
9	376860000.000000	50.439068	30.429870	190.734979	2.945097	2.139246	5.567683
10	376861000.000000	50.439068	30.429870	190.712808	2.945037	2.139329	5.567426
11	376862000.000000	50.439067	30.429870	190.696464	2.944852	2.139336	5.566582
12	376863000.000000	50.439067	30.429870	190.684578	2.944776	2.139419	5.566281
13	376864000.000000	50.439067	30.429870	190.665456	2.944806	2.139517	5.566113
14	376865000.000000	50.439067	30.429870	190.663269	2.944872	2.139658	5.566092
15	376866000.000000	50.439067	30.429870	190.647475	2.944841	2.139736	5.565788
16	376867000.000000	50.439067	30.429870	190.622686	2.944905	2.139875	5.565821
17	376868000.000000	50.439067	30.429870	190.604542	2.944987	2.140001	5.565705
18	376869000.000000	50.439067	30.429870	190.588815	2.945033	2.140120	5.565630
19	376870000.000000	50.439067	30.429870	190.551787	2.945117	2.140245	5.565504
20	376871000.000000	50.439067	30.429870	190.542084	2.945162	2.140359	5.565340
21	376872000.000000	50.439067	30.429870	190.543286	2.945176	2.140488	5.565176