

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____ Володимир ШУТКО
« ____ » _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 171 «ЕЛЕКТРОНІКА»
ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЇ ПРОГРАМИ «ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ»

Тема: «Мінімізація похибок позиціонування та навігації»

Виконавець
студент групи ЕС-407Б _____ Гриценко Владислав Сергійович

Керівник
к.т.н., доцент кафедри ЕРМІТ _____ Габрусенко Євген Ігорович

Нормоконтролер
к.т.н., доцент кафедри ЕРМІТ _____ Сініцин Рустем Борисович

КИЇВ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ
171 «ЕЛЕКТРОНІКА», ОПП«ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ»

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

_____ Шутко В.М.

«__»_____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

_____ Гриценко Владислав Сергійович _____

(П.І.Б., випускника)

1. Тема дипломної роботи: «Мінімізація похибок позиціонування та навігації» затверджена наказом ректора від «19»квітня 2023 р. № 398/ст.
2. Термін виконання роботи: з «18» травня 2023р. по «13»червня 2023р.
3. Вихідні дані до роботи: ВКАЗАТИ КОНКРЕТНІ ДАНІ!!! Наприклад:
 - Супутникова система навігації GPS
 - Довжина хвиль GPS 15-30 см
 - Максимальний радіус дії системи GPS 20 км
 - Нормальний розподіл випадкових похибок
 - Станадртне відхилення(σ)
4. Зміст пояснювальної записки: 1 Огляд існуючого стану проблеми, 2 Опис та аналіз похибок, 3 Мінімізація навігаційних похибок.
5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстрованого) матеріалу: таблиці, рисунки, формули, додатки.

6. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання етапів	Відмітка про виконання
1.	Затвердження теми бакалаврської роботи	28.03.2023р.	
2.	Вивчення літератури	29.03.2023р.- 17.05.2023р.	
3.	Теоретичні основи розробки	18.05.2023р.- 23.05.2023р.	
4.	Вибір технічних засобів	24.05.2023р.- 31.05.2023р.	
5.	Апаратно-програмна реалізація	01.06.2023р.- 06.06.2023р.	
6.	Оформлення та усунення недоліків дипломної роботи	07.06.2023р.- 13.06.2023р.	

Дата видачі завдання: «28» березня 2023 р.

Керівник дипломної роботи _____ Габрусенко Є.І.
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Гриценко В.С.
(підпис випусника) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Мінімізація похибок позиціонування та навігації» містить: 54 сторінок, 28 рисунків, 4 таблиці, 8 використаних джерела.

Актуальність теми полягає у аналізі похибок позиціонування та навігації різних систем; факторів, що впливають на їх точність і усунення похибок у вимірюваннях.

Мета роботи – мінімізація похибок позиціонування та навігації.

Об'єкт дослідження є процес позиціонування і навігації, який здійснюється за допомогою сучасних технологій.

Предмет дослідження – супутникова навігація (GPS, Galileo, ГЛОНАСС та ін.), позиціонування засобами GSM мереж, бездротові технології Bluetooth Low Energy, тощо.

Мета дипломної роботи – аналіз похибок позиціонування та навігації і їх мінімізація.

Основою даної роботи є аналіз існуючих похибок в навігації. Робота включає в себе огляд існуючого стану проблеми, опис похибок позиціонування та навігації та усунення цих похибок.

Матеріали даної дипломної роботи можуть бути використані для проведення наукових досліджень, у навчальному процесі, а також з можливістю використання в практичній діяльності.

Ключові слова: НАВІГАЦІЯ, ПОХИБКИ, СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ, ТОЧНІСТЬ, ПОЗИЦІОНУВАННЯ.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

Loran – Long Range Navigation

ELT – Електронно променева трубка

GPS – Global Positioning System

ГЛОНАСС – Глобальна Навігаційна Система

PTN –Position, Timing and Navigation

RTLS – Real-time Locating System

BS – Базова станція

A-GPS – Assisted GPS

GSM – Global System of Mobile communications

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1 Огляд існуючого стану проблеми	8
1.1. Супутникова навігація GPS і ГЛОНАСС.....	8
1.2. Майбутній розвиток систем орієнтування способом квантової акселерометрії.....	9
1.3. Принцип роботи системи навігації.....	11
1.3.1. Системи координат.....	12
1.3.2. Навігаційні радіосигнали.....	13
1.4 Методи позиціонування та навігації.....	14
1.4.1. Супутникові системи.....	14
1.4.2. WI-FI.....	15
1.4.3. Позиціонування засобами GSM мереж.....	16
1.4.4. Позиціонування за допомогою інфрачервоного та ультразвукового випромінювання.....	17
1.4.5. Бездротові технології Bluetooth Low Energy.....	18
1.4.6. Радіочастотна технологія UWB.....	19
1.5. Визначення місцезнаходження методом триангуляції.....	19
Розділ 2 Опис та аналіз похибок позиціонування та навігації	22
2.1. Фактори, що впливають на точність в навігації.....	22
2.2. Аналіз похибок позиціонування наземних об'єктів засобами супутникової навігації на прикладі системи GPS.....	23
2.3. Опис похибок позиціонування та навігації.....	30
Розділ 3 Мінімізація навігаційних похибок	33
3.1. Випадкові похибки.....	33
3.2. Комбінаційні похибки.....	37
3.3. Точність в навігації.....	40
3.4. Способи зменшення похибок позиціонування.....	50
Висновки	52
Список використаної літератури	53
Додатки.....	54

ВСТУП

У сучасному світі, де технологічний прогрес швидко розвивається, позиціонування та навігація є невід'ємною частиною нашого повсякденного життя. Від транспорту та логістики до робототехніки та мобільних додатків, точне визначення місцезнаходження та шляху до пункту призначення стає все більш важливим завданням.

Однак, незважаючи на значний прогрес у цій галузі, похибки позиціонування та навігації залишаються актуальною проблемою. Вони можуть виникати з різних причин, таких як помилки вимірювання, зіткнення з перешкодами або недостатня точність супутникових систем позиціонування.

Мета цієї дипломної роботи полягає в дослідженні та розробці методів та алгоритмів, спрямованих на мінімізацію похибок позиціонування та навігації. Наша робота буде зосереджена на використанні існуючих методів для поліпшення точності позиціонування та навігації у різних сферах застосування.

Перед нами стоїть завдання аналізу існуючих систем позиціонування та навігації: у цій роботі ми оглянемо різні методи, такі як супутникова навігація (GPS, Galileo, ГЛОНАСС та ін.), позиціонування засобами GSM мереж, бездротові технології Bluetooth Low Energy, тощо. Ми вивчимо їх переваги та недоліки, а також їхні можливості для поліпшення точності.

Очікується, що результати нашої дипломної роботи сприятимуть поліпшенню точності позиціонування та навігації, що має важливе значення для багатьох галузей, включаючи транспорт, логістику, рятувальні операції та робототехніку. Ми сподіваємося, що наші дослідження та розробки знайдуть широке застосування і внесуть позитивний вклад у сферу позиціонування та навігації.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧОГО СТАНУ ПРОБЛЕМ

1.1. Супутникова навігація GPS і ГЛОНАСС

Бурхливий розвиток аерокосмічної галузі в ХХ столітті зіграв ключову роль у створенні глобальної навігаційної системи та системи позиціонування. Розуміння основ ефекту Доплера допомагає вченим визначити вектор напрямку руху об'єкта відносно спостерігача. Саме цей принцип лежить в основі побудови супутникових навігаційних систем.

У 1973 році GPS (Global Positioning System), система позиціонування, яка використовує групу супутників як детектори для визначення положення об'єктів у просторі стала широко доступною. GPS почала працювати в 1978 році, коли на орбіту був виведений перший набір супутників, що складався з одинадцяти космічних апаратів.

Сигнали з них передаються на приймальну станцію Землі, забезпечуючи повну навігаційну картину об'єктів, які підключені до системи в режимі реального часу. GPS працює за принципом, що різниця в часі між сигналами з різних супутників, які надходять на приймальну станцію, синхронізує їх між собою.

Чим більша кількість супутників, тим вища точність системи глобального позиціонування. На даний час навігаційна система GPS складається з 24 супутників, що забезпечує похибку не більше 10 метрів.

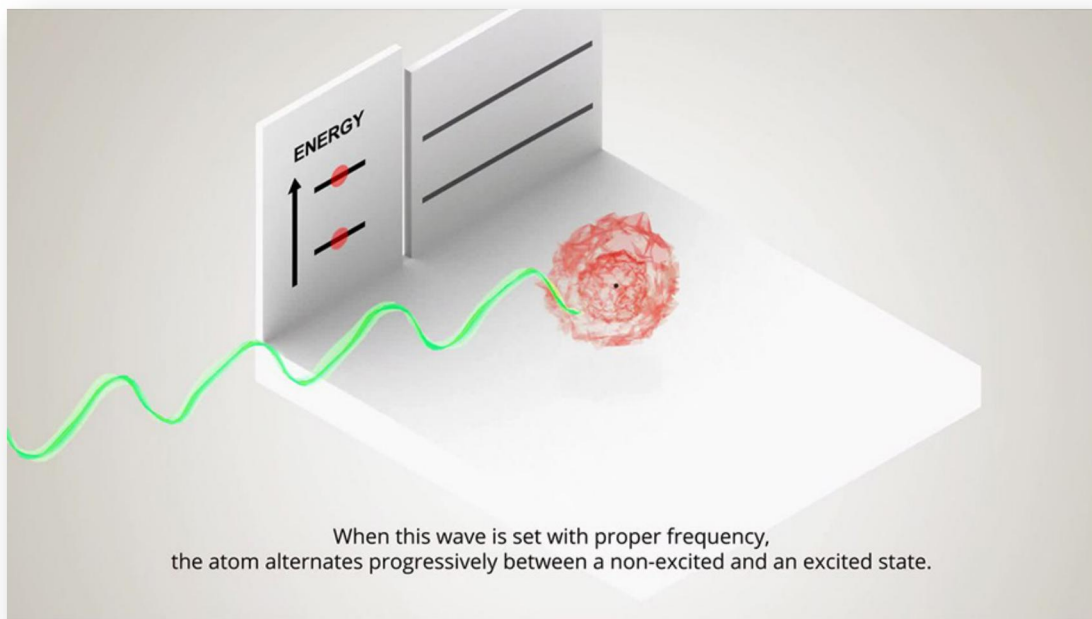
Також варто зазначити, що Global Positioning System є лише одною з навігаційних супутникових систем, які функціонують на даний момент. Такі країни, як Росія (ГЛОНАСС), КНР (Beidou), Європейський союз (Galileo) наразі мають функціонально схожі глобальні навігаційні системи.

З більш широким використанням стільникових пристроїв все більшої популярності набувають глобальні супутникові навігаційні системи. Сучасні стільникові пристрої зв'язку можуть бути підключені до кількох систем супутникового позиціонування одночасно, що дозволяє користувачам вільно пересуватися по всьому світу. Більша частина супутникових систем

зараз перейшли від державної до приватної експлуатації, що вплинуло на їхній розвиток в хорошу сторону.

1.2. Майбутній розвиток систем орієнтування способом квантової акселерометрії

Інноваційна техніка орієнтації квантових гіроскопів та акселерометрів базується на процесі атомної інтерференції. Це досягається охолодженням атомів речовини до стану трохи вище абсолютного нуля (найнижча межа температури, яку може мати об'єкт у космосі). Коли переохоложені атоми опромінюються пучками фотонів (лазерним світлом), вони переходять у "стан суперпозиції" - особливу властивість частинок - і набувають одразу дві просторові координати: рухому і нерухому.



Ри

с.1.4 Принцип квантової суперпозиції: корпускулярно - хвильовий дуалізм

З інженерної точки зору це означає можливість побудови автономних навігаційних систем, які миттєво отримують інформацію про зміну місцезнаходження об'єкта у просторі. Іншими словами, стан місцевості стане

динамічним у всіх сенсах цього слова, а вся *PTN* (Position, Timing & Navigation) картина об'єктів в зоні покриття буде відображатися в режимі реального часу. Ця технологія має потенціал замінити GPS, оскільки відсутня затримка сигналу через час повернення на землю з орбіти, що є основним недоліком GPS.

Наразі експерименти в галузі квантових навігаційних систем проводяться переважно в *Сандійській національній лабораторії (SNL)*. Квантові сенсори, створені командою вчених, пройшли випробування часом (пристрої успішно працюють вже понад 18 місяців) і показали чудові результати впрогнозуванні топології ландшафту і навігації об'єктів в ньому. Очікується, що технологія знайде застосування в системах навігації безпілотників і в сферах, де втрата сигналу GPS має серйозні наслідки (авіація і судноплавство).

Група вчених з *Імперського коледжу Лондона* також успішно створила прототип квантового акселерометра. Британці також вивчають потенціал гравітаційного картографування, використовуючи подібні до квантової інтерферометрії принципи для сканування земного ґрунту і створення інтерактивних карт з 3-D візуалізацією родовищ корисних копалин з метою пошуку потрібних ресурсів (мінерали, нафта, тощо).

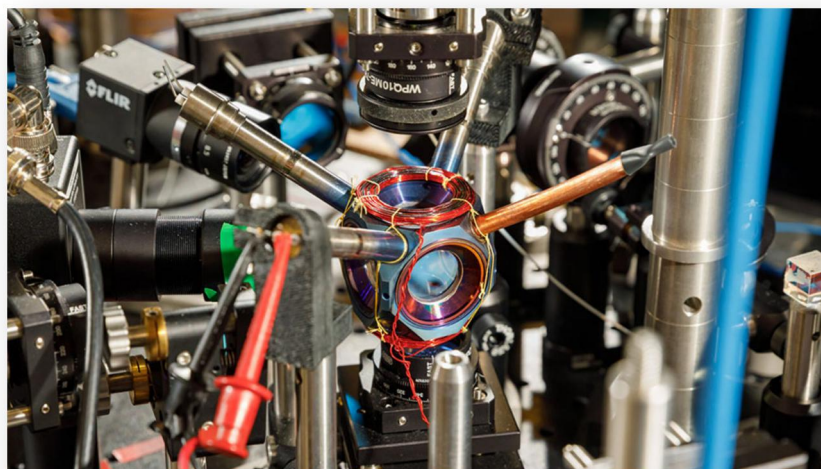


Рис 1.5 Спроектований вченими Sandia National Library компактний сенсор

1.3. Принцип роботи системи навігації

Сучасна супутникова навігація базується на принципі незапитуваного вимірювання відстані між навігаційним супутником і споживачем. Це означає, що споживач отримує інформацію про координати від супутника у складі навігаційного сигналу. Одночасно вимірюється відстань до навігаційного супутника. Метод вимірювання дальності базується на розрахунку часової затримки між сигналом, отриманим від супутника, і сигналом, згенерованим обладнанням споживача.

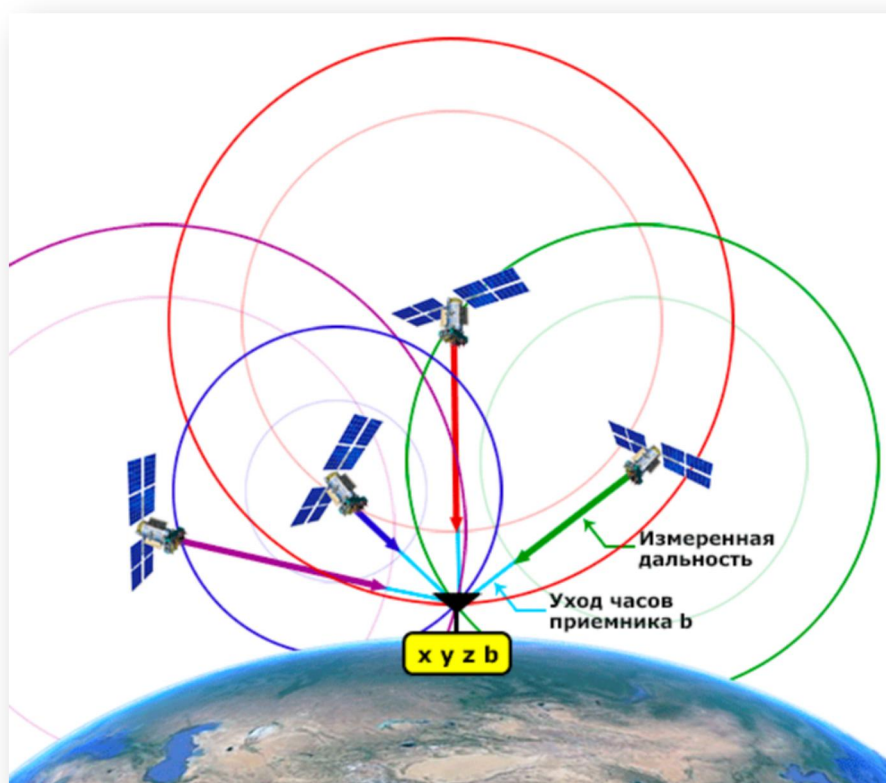


Рис 1.6 Схема визначень розташування

На рисунку показано виміряну відстань до чотирьох навігаційних супутників і позицію споживача в координатах x , y і z . Кольоровими жирними лініями позначено коло з центром на супутнику. Радіус кола відповідає істинній відстані, тобто дійсній відстані між супутником і споживачем. Тонка кольорова лінія - це коло з радіусом, що відповідає

діапазону вимірювання, відмінному від істинної відстані, і тому називається псевдодальністю.

Зсув у часі \mathbf{b} обумовлений часом поширення та обробки сигналів системи GPS. Цей тимчасовий зсув призводить до помилки вимірювання координат об'єктів, що рухаються. В ідеалі, до трьох вимірювань навігаційного супутника було б достатньо для визначення положення споживача в просторі, за умови, що вимірювання є точними, а годинники споживача та супутника збігаються. Годинники, що входять до складу NAR, відрізняються від годинників навігаційних супутників. Для вирішення навігаційної задачі, на додаток до раніше невідомих параметрів (трьох координат споживача), необхідно додати ще один зсув між годинником споживача і системним часом. Це означає, що в загальному випадку споживач повинен "бачити" щонайменше чотири навігаційні супутники, щоб вирішити навігаційну задачу.

1.3.1. Системи координат

Навігаційні супутникові системи потребують даних про параметри обертання Землі, основні планетарні і місячні ефемериди, дані з високою точністю про використовувані системи часу та координат, а також дані про гравітаційне поле нашої планети та модель атмосфери.

Геоцентрична система координат - це система координат, початком якої є центр тяжіння Землі, також відома як земна система координат або система координат Землі.

Чотири методи космічної геодезії використовуються для підтримки і побудови загальних систем координат Землі:

- ✓ Лазерна локація КА(SLR),
- ✓ Доплерівські системи вимірювань (DORIS),
- ✓ Навігаційні вимірювання КА ГЛОНАСС,
- ✓ Радіоінтерферометрія з наддовгою базою.

ITRF(Міжнародна система координат Землі) є моделлю земної системи координат.

ГЛОНАСС	Земні параметри 1990-их років (ПЗ-90)
GPS	World Geodetic System (WGS-84)
GALILEO	Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF)
Beidou	China Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000)
QZSS	Japanese geodetic system (JGS)
NavIC	World Geodetic System (WGS-84)

Табл. 1.1 Відношення супутникових систем і використовуваних карт

1.3.2. Навігаційні радіосигнали

При виборі типу сигналу і параметрів для використання в супутниковій радіонавігаційній системі враховуються всі вимоги. Сигнал повинен мати високу точність вимірювання часу затримки сигналу та доплерівської частоти, а також високу ймовірність того, що навігаційне повідомлення буде правильно декодовано. Сигнал також повинен мати низьку перехресну кореляцію, щоб гарантувати, що навігаційна система може надійно розрізняти сигнали різних НКА. Крім того, сигнал DSS повинен бути з низьким рівнем позасмугового випромінювання, оптимізоване використання виділеної смуги частот і висока завадостійкість.

Всі супутникові системи навігації, окрім NavIC(Індія), використовують сигнали L-діапазону, тоді як NavIC також передаватиме сигнали S-діапазону.

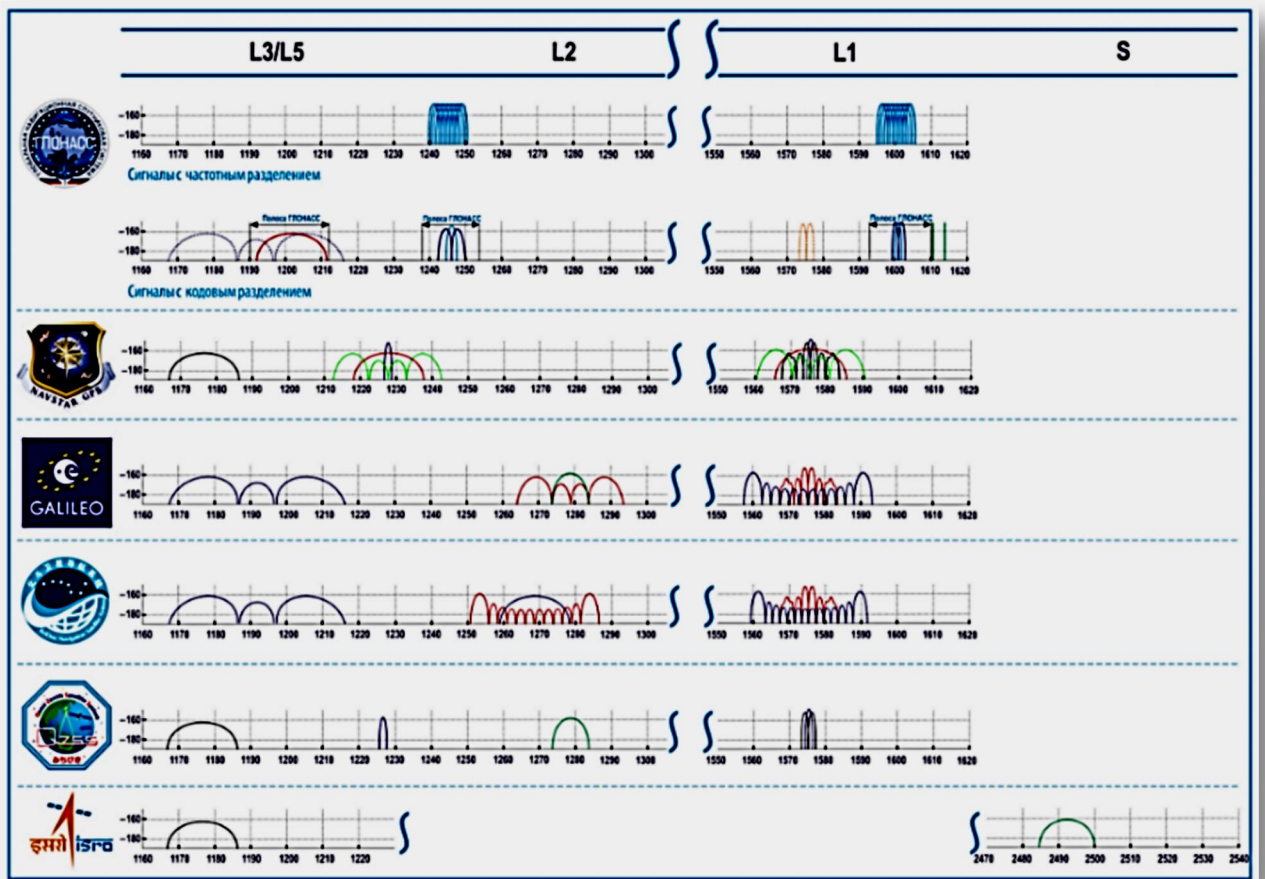


Рис 1.7 Діапазони різних видів супутникових систем

1.4. Методи позиціонування та навігації

1.4.1 Супутникові системи

Супутникові радіонавігаційні системи, такі як GPS і ГЛОНАСС розроблені спеціально для навігації і надають інформацію про положення людини в просторі (географічні координати і висоту). Принцип роботи заснований на вимірюванні відстані від супутника до антени пристрою за допомогою радіосигналів. Ефективність і точність таких пристроїв значною мірою залежить від навколишнього середовища. Супутникові системи працюють у дециметровому діапазоні хвиль, що ускладнює їхню локалізацію в залізобетонних будівлях або за несприятливих погодних умов. Похибка цього методу становить від 1 до 6 метрів, що неприйнятно для малих і середніх роботизованих систем. У місцях, де сигнали послаблюються,

блокуються або погіршуються, особливо в приміщеннях, можна використовувати транспондери, принцип роботи яких полягає в передачі сигналів із супутників. Але ціна даних систем є дуже високою .

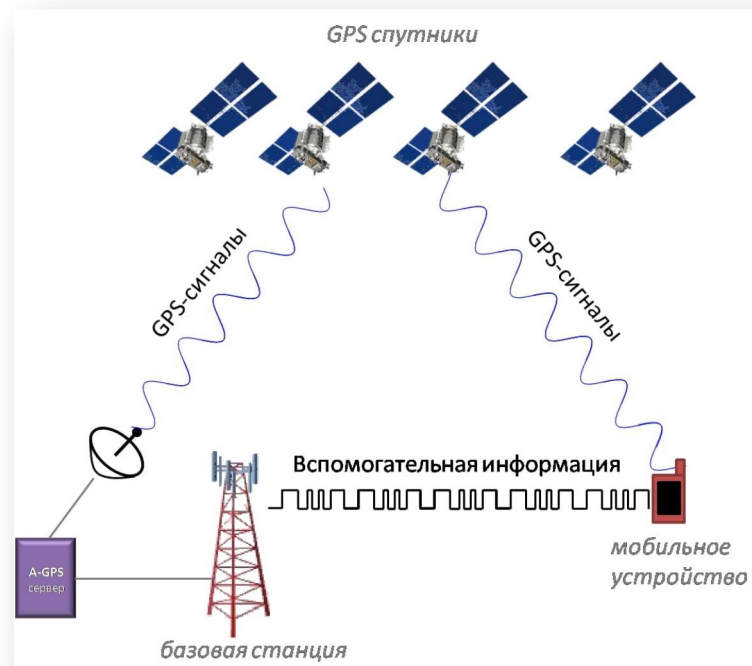


Рис 1.8 Супутникова навігація на прикладі GPS

1.4.2. Системи позиціонування WI-FI

Позиціонування за допомогою сигналів *Wi-Fi*, як і технологія *BLE*, вимірює відстань за рівнями сигналів. *RTLS* на базі цієї технології є найдоступнішим методом у зв'язку з розвинутою системою мереж на основі *Wi-Fi* точок доступу і не потребує додатково дороговартісного обладнання. Майже кожен бездротовий приймач вимірює рівень вхідного сигналу та повертає параметр індикатора сили отриманого сигналу, на основі якого розраховуються координати. Проблемою цього способу є те, що при слабкому сигналі в зоні доступу мережі неможливо визначити, що об'єкт знаходиться на великій відстані. Слабким сигналом може бути викликаний зовнішніми факторами: загорожденням, загасанням та іншими. Також точки

доступу можуть переміщатися, а отже, складання бази даних про точки доступу з можливістю динамічного оновлення – одна з зобов'язань, що накладаються на реалізацію навігації на базі телекомунікаційної технології *Wi-Fi*.

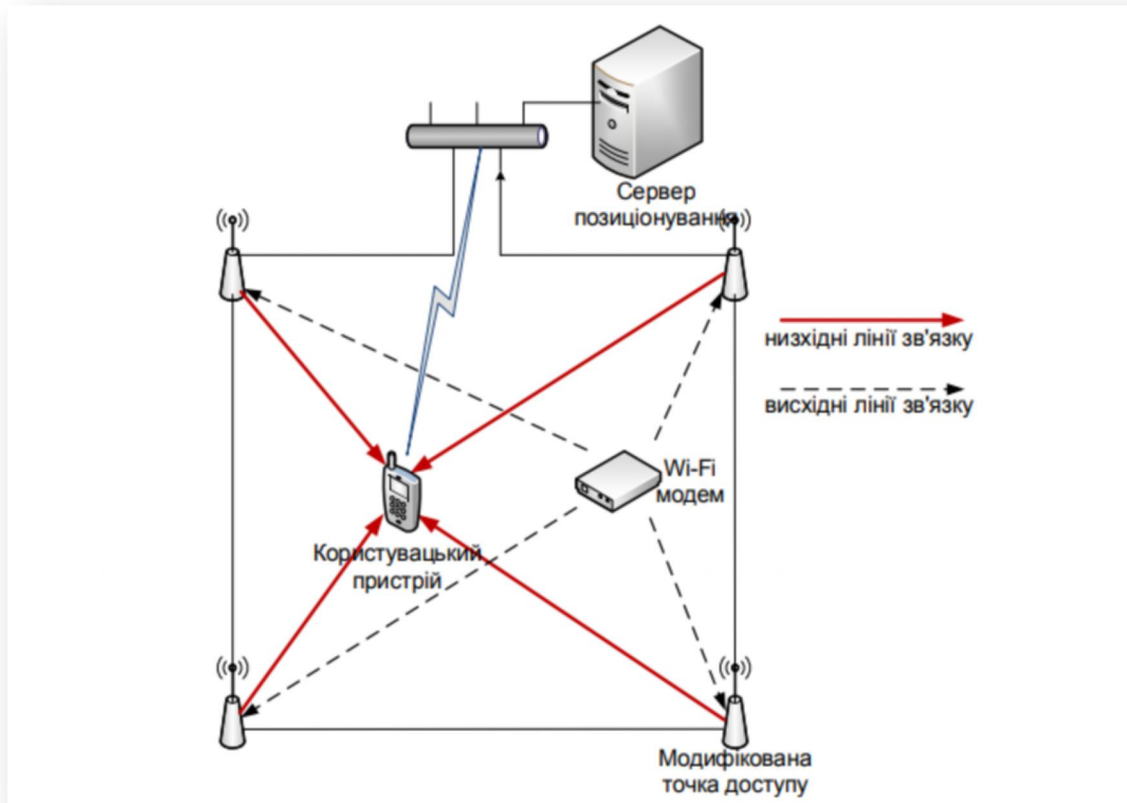


Рис 1.9 Загальна структура Wi-Fi позиціонування

1.4.3. Позиціонування засобами GSM мереж

Система *RTLS* – *Real-time Locating System* ґрунтується на визначенні поточного розташування мобільного терміналу користувача. Позиціонування в стільникових мережах широко поширене завдяки величезній кількості абонентів та реалізовано кількома методами. Перший і найпростіший метод базується на визначенні координат мобільного терміналу за допомогою *CellIdentifier* (відомого ідентифікатора стільника). Одним з переваг даного методу є те, що не потрібне оновлення клієнтського апарату, на базовій

станції (BS) встановлюється відповідне обладнання. Координати розраховуються на основі приблизного радіусу дії даної базової станції. Однак точність позиціонування падає до 100-150 м при високій щільності BS і до десятків кілометрів у передмістях міст і сільській місцевості. Інший метод заснований на оцінці часу прибуття сигналу, тобто вимірюванні часу, який потрібен для проходження сигналу від абонента до трьох найближчих BS. Його точність становить до 125 метрів. Існує також гібридний метод під назвою A-GPS (Assisted GPS), який використовує систему GPS і GSM разом для визначення координат. Однак цей варіант набагато складніший, і потребує певних витрат.

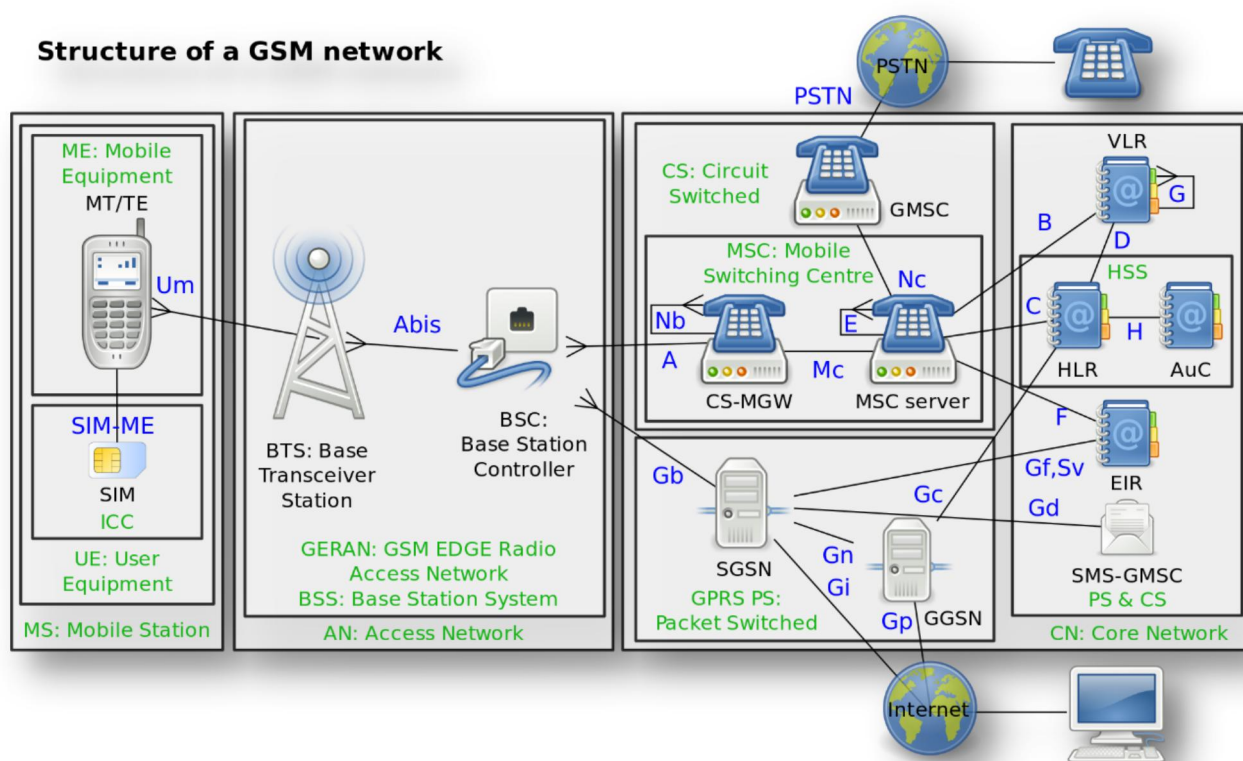


Рис. 1.10 Структура GSM-мережі

1.4.4. Позиціонування за допомогою інфрачервоного та ультразвукового випромінювання

Інфрачервоні системи локального позиціонування обчислюють координати на основі часу, необхідного для того, щоб періодичні імпульси, випромінювані об'єктом, досягли приймача від джерела. Недоліками даного

методу можуть бути викликані перешкодами від сонячних променів і низькою відносною точністю. Використання інфрачервоного лазера може підвищити точність вимірювання до десяти сантиметрів, але це дорога система. RTLS з ультразвуковим датчиком працює за схожим принципом "джерело-приймач". Джерело ультразвуку розміщується в об'єкті, а приймач розміщується в камері за певною схемою. Щоб обчислити дані координати на площині потрібно мати дані від трьох приймачів. Щоб отримати положення в просторі, беручи до уваги висоту, потрібно як мінімум 4 приймачі. За ідеальних умов точність вимірювань досягає від трьох до п'яти сантиметрів. Проблемою цього методу є те, що розміщення датчиків (ультразвукових приймачів) має бути строго сплановане.

1.4.5. Бездротові технології Bluetooth Low Energy

На базі бездротової технології *Bluetooth LE* реалізовано один із методів вимірювання відстані за рівнем радіосигналу. Основними перевагами даної технології є компактний розмір пристрою та надмале енергоспоживання. Як сенсори служать кишенькові Bluetooth-передавачі, координати яких постійні та відомі. Передавачі із заданою періодичністю проводять ширококомовну розсилку, що містить їх власний *ID*. Об'єкт отримує ці дані і на основі сили сигналу визначає своє місцезнаходження.

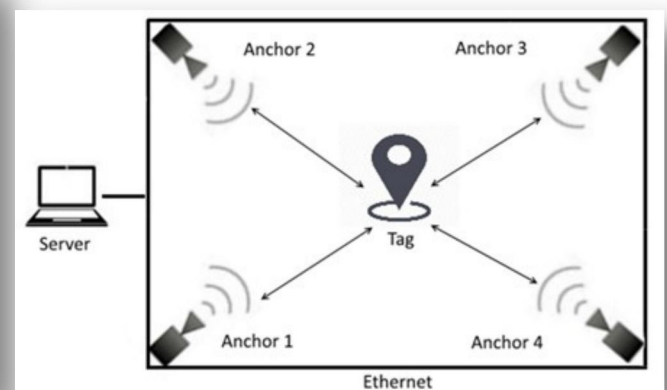
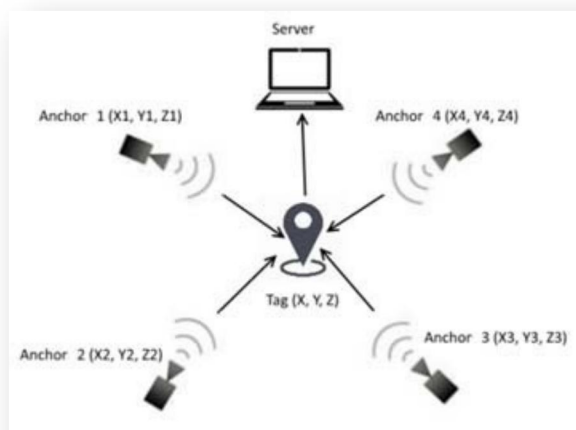


Рис 1.11 Варіанти архітектури системи позиціонування

А) Бездротова архітектура Б) Дротова архітектура

1.4.6. Радіочастотна технологія UWB

Технологія *UWB (Ultra-Wide Band)* - одна з радіочастотних технологій, що дозволяє створити систему позиціонування в режимі реального часу в приміщенні. Такі сигнали поширюються із частотою 3–10 ГГц і невеликою потужністю. Надширока смуга пропускання забезпечує більш точне вимірювання відстані порівняно з іншими радіочастотними технологіями. Точність визначення координат може досягати кількох сантиметрів, що необхідно для робототехнічних систем. Надширокосмугові сигнали не залежать від багатопроменевого поширення завдяки дуже коротким імпульсам, не більше 1 нс, тобто відбитий сигнал приходить після того, як був переданий основний. Практична реалізація є пристрій – передавач, закріплений на об'єкті, 3 і більше стаціонарних точок – приймачів сигналу. За відомими координатами точок – приймачів та часом отримання сигналу від передавача обчислюється місцезнаходження об'єкта.

1.5. Визначення місцезнаходження методом триангуляції

Метод триангуляції в навігації є одним із способів визначення місцезнаходження об'єкта шляхом вимірювання відстаней та кутів відносно двох або більше точок відомого місцезнаходження. Цей метод базується на геометричних принципах триангуляції та використовується в різних сферах, включаючи навігацію, геодезію та радіолокацію.

Принцип триангуляції полягає в вимірюванні кутів та відстаней між відомими точками, а потім використанні цих даних для визначення місцезнаходження невідомої точки. У навігації використовуються різні типи триангуляції, такі як трилатерація та мультлатерація.



Рис 1.12 Принцип триангуляції на прикладі супутникових антен в місті

Трилатерація є одним з найпоширеніших методів триангуляції в навігації. Для застосування цього методу потрібно мати як мінімум три точки з відомими координатами, наприклад, супутникові навігаційні системи (наприклад, GPS) використовують сигнали з трьох супутників для визначення місцезнаходження. Кожен супутник випромінює сигнал, який містить інформацію про його місцезнаходження та час випромінення сигналу. Приймаючи ці сигнали, приймач може виміряти час, який потрібен сигналу, щоб дійти до приймача. За допомогою цих вимірювань і відомих координат супутників, можна визначити місцезнаходження приймача шляхом трилатерації.

Процес трилатерації полягає в обчисленні відстаней від приймача до кожного супутника, використовуючи різницю між часом випромінення сигналу та часом його отримання. За допомогою цих відстаней та відомих координат супутників можна побудувати трикутник, де сторони відповідають

відстаням від приймача до супутників. Центр трикутника відповідає місцезнаходженню приймача.

Мультлатерація є іншим методом триангуляції, який використовується, наприклад, у мобільних мережах. У цьому випадку, замість вимірювання кутів і відстаней, використовуються вимірювання часу потрібного сигналу для проходження від виходу з передавача до приймача. Часові затримки, отримані від різних передавачів, використовуються для визначення місцезнаходження приймача шляхом мультлатерації.

У обох випадках триангуляції, точність визначення місцезнаходження залежить від точності вимірювань відстаней та кутів, а також від кількості використаних точок вимірювання. Звичайно, у реальних ситуаціях можуть бути інші фактори, які можуть впливати на точність, такі як помилки вимірювань, перешкоди або шум.

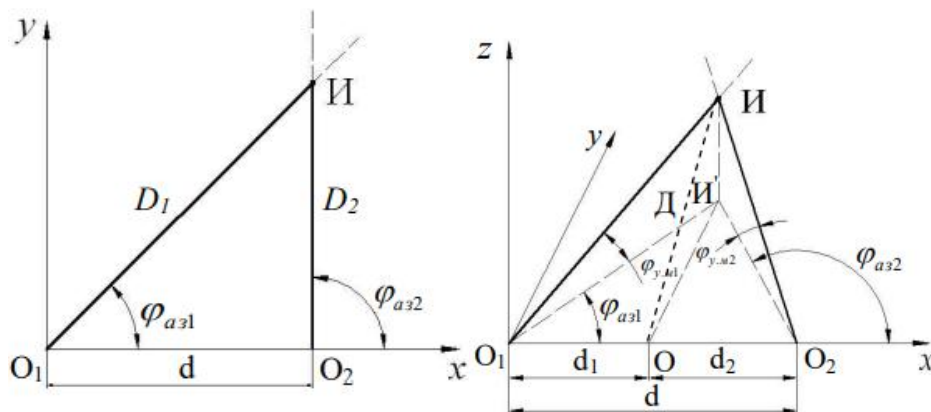


Рис 1.13 Триангуляційний метод визначення місцезнаходження

1 – в площині; 2 – в просторі.

Загалом, метод триангуляції в навігації є потужним і широко використовуваним засобом визначення місцезнаходження об'єктів. Він дозволяє використовувати геометричні принципи для отримання точних результатів, що робить його корисним у багатьох додатках, включаючи автономну навігацію, моніторинг транспорту та інші ситуації, де важливо визначити місцезнаходження об'єктів.

РОЗДІЛ 2. ОПИС ТА АНАЛІЗ ПОХИБОК

ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТА НАВІГАЦІЇ

2.1. Фактори, що впливають на точність в навігації

Точність у навігації визначає, наскільки точно виміряна чи розрахована позиція чи шлях відповідає фактичному місцезнаходженню чи маршруту. Величина точності вимірюється зазвичай в метрах чи інших одиницях відстані. Для досягнення високої точності у навігації потрібно враховувати різні явища, що можуть впливати на точність. Серед них:

- *Технологія позиціонування:* Вибір правильної технології позиціонування може впливати на точність. Наприклад, системи з використанням супутників, такі як GPS (Глобальна система позиціонування), GLONASS (Глобальна навігаційна супутникова система) або Galileo (Європейська система навігації зі супутників), зазвичай забезпечують високу точність, особливо при одночасному використанні кількох супутникових систем.
- *Геометрична конфігурація супутників:* Розташування супутників у просторі може впливати на точність позиціонування. Оптимальна геометрична конфігурація полягає в тому, щоб мати достатню кількість супутників у видимості, розташованих у різних напрямках. Це допомагає зменшити помилки, пов'язані з геометрією позиціонування.
- *Сигнальні помилки:* Сигнал, отриманий від супутників, може піддаватися помилкам, таким як іоносферна дисперсія, мультипат та шум. Ці помилки можуть бути скориговані за допомогою алгоритмів корекції та фільтрації сигналу.
- *Точність приймача:* Якість та точність самого приймача важливі для досягнення високої точності. Високоякісні приймачі забезпечують більш точне отримання сигналу і мають кращі алгоритми обробки сигналу.

- *Обробка сигналу та алгоритми:* Ефективність алгоритмів обробки сигналу та методів розрахунку позиції також впливає на точність навігації. Розроблені алгоритми, такі як фільтри Калмана, можуть допомогти врахувати помилки та виправити їх, підвищуючи точність.
- *Умови довкілля:* Певні умови довкілля, такі як погода (туман, дощ, сильний вітер), рельєф місцевості (гори, долини) або наявність високих будівель, можуть впливати на точність навігації. Ці умови можуть створювати перешкоди для сигналу супутників або впливати на роботу антени приймача.
- *Часові затримки:* Наявність затримок у передачі сигналу між супутником і приймачем може призводити до неточностей у визначенні часу прибуття сигналу і, отже, до неточностей у визначенні позиції.
- *Динамічні фактори:* Рух об'єкта, такий як прискорення, зміна швидкості або зміна напрямку руху, можуть впливати на точність вимірювання позиції.

Вказані фактори потрібно враховувати при проектуванні систем навігації та використанні вимірювальних приладів, щоб забезпечити високу точність визначення позиції. Виходячи із цього невід'ємною частиною є похибки позиціонування та навігації.

2.2. Аналіз похибок позиціонування наземних об'єктів засобами супутникової навігації на прикладі системи GPS.

Супутникові навігаційні системи - це космічні системи, здатні визначати поточне положення і швидкість об'єктів, що рухаються в глобальному масштабі, а також точно визначати їхній час.

Супутникові навігаційні системи можна розглядати як високотехнологічні інформаційні системи комплексної дії, що складаються з п'яти основних частин.



Рис 2.1 Розташування супутникових систем навігації

Технологія **GPS** (Global Positioning System) - це глобальна супутникова навігаційна система, яка вимірює відстань і час та визначає положення в глобальній системі координат WGS84. Система здатна визначати положення і швидкість об'єктів, що відслідковуються, в будь-якій точці земної кулі (крім Тихоокеанського регіону), за будь-яких погодних умов і в навколоремному космічному просторі. Ця навігаційна система була розроблена і впроваджена для використання Міністерством оборони США, а тепер доступна для широкої громадськості, дозволяючи визначати своє місцезнаходження за наявності навігаційної системи або іншого пристрою (смартфон, мобільний пристрій), оснащеного GPS-приймачем.

ЕВОЛЮЦІЯ СУПУТНИКІВ GPS



GPS IIR

Покращена версія першого супутника другої серії. GPS стає неодмінною частиною сучасного життя.

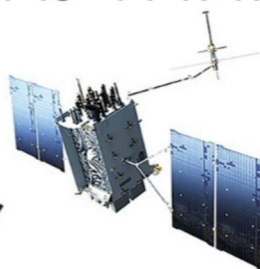
- 12 супутників (1994 – 2004 рр.)
- Частоти навігаційних сигналів L1 і L2
- Підвищено надійність сигналу
- Термін експлуатації 7,5 років



GPS IIR-M

Для покращення навігації було модернізовано 8 супутників. Вони отримали нові цивільні та військові сигнали, що надають додаткові можливості.

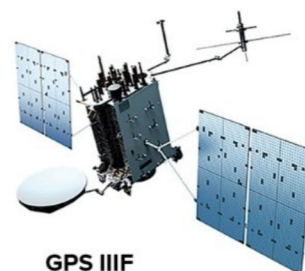
- 8 супутників (2005 – 2009 рр.)
- Додано цивільний сигнал L2C
- Додано військові сигнали L1M і L2M
- Підвищено потужність сигналу
- Термін експлуатації 7,5 років



GPS III

GPS III задовольнить нові потреби користувачів покращеною безпекою та неймовірною точністю.

- Планується запустити 10 супутників
- Втричі більша точність
- У 8 разів підвищено потужність сигналу
- Термін експлуатації 15 років



GPS III-F

Другий комплект супутників GPS III, що містить у собі до 22 космічних апаратів.

Очікується, що запуск III-F почнеться не раніше 2026 року і триватиме до 2034 року.

Рис. 2.2 Еволюція супутників GPS

Незважаючи на первинну військову мету винаходу, згодом навігаційні системи увійшли в повсякденне життя, а GPS-приймачі почали використовувати у повітряному транспорті, наземному транспорті, водному транспорті, мобільних пристроях та інших спеціалізованих пристроях. На додаток до апаратного забезпечення споживачам було запропоновано різноманітні програмні додатки, які дозволяли швидко визначати місцезнаходження об'єктів, оскільки дані оновлювалися в режимі реального часу.

Останніми роками все більше країн виявляють інтерес до розробки власних систем глобальної навігації і позиціонування. Прикладами є ГЛОНАСС в Росії, IRNSS в Індії, Galileo в Європі, BeiDou в Китаї. В основі цих швидких і значних змін лежить бажання бути повністю незалежними від американської супутникової навігаційної системи (GPS). Це пов'язано з тим, що вся система може бути дистанційно вимкнена з ініціативи її розробника, що може призвести до великих перебоїв у функціонуванні критично

важливих систем країн. У таких критично важливих стратегічних системах зазвичай використовують спарені системи, що складаються з двох і більше супутникових систем навігації, щоб підвищити надійність і точність.

Для визначення точної позиції потрібно мати дані із чотирьох супутників. Якщо взяти до уваги, що відстань між приймачем і супутником відома. Візуалізуючи коло з центром на супутнику, можна визначити положення приймача на сфері (рис. 1 а). Відстань до кожного супутника розраховується на основі затримки передачі сигналу. Просторові координати трьох точок та три відстані до потрібної точки потім використовуються для визначення положення приймача на площині. Оскільки супутникова навігація працює в просторі, а не на площині, для однозначного визначення координат точки в трьох вимірах потрібен четвертий супутник. Порівняно з розв'язанням теоретичних геометричних задач, практичне визначення відрізняється тим, що через похибки в обчисленні відстані до супутника результатом визначення є не конкретна точка, а область певного радіусу, де розташоване обладнання. Однак зі збільшенням кількості видимих супутників цей радіус стає меншим, а точність геолокації зростає. На практиці в побутових глобальних супутникових навігаційних системах досягається точність близько 3,6 м в радіусі.

Табл. 2.1 Точність позиціонування провідних навігаційних систем

Супутникова навігаційна система	GPS (США)	ГЛОНАСС (Росія)	GALILEO (Європа)	Baidou (Китай)	QZSS (Японія)	IRNSS (Індія)
Точність, м	3.6 метри	7 метрів	До 1 метра	10 метрів	До 1 метра	До 10 метрів

Після отримання даних з іншого супутника на перетині двох сфер, де знаходиться приймач, створюється геозона (рис. 1, б).

Це зменшує зону пошуку до перетину 2 кіл. На наступній ітерації накладається інформація з третього супутника: третій вимір дає 2 точки, одна з яких є приймачем (рис. 1, в).

Останнім етапом є використання четвертого виміру поверх попередніх. На рис. 1г показана точка координат, яка була отримана в результаті перетину чотирьох сфер.

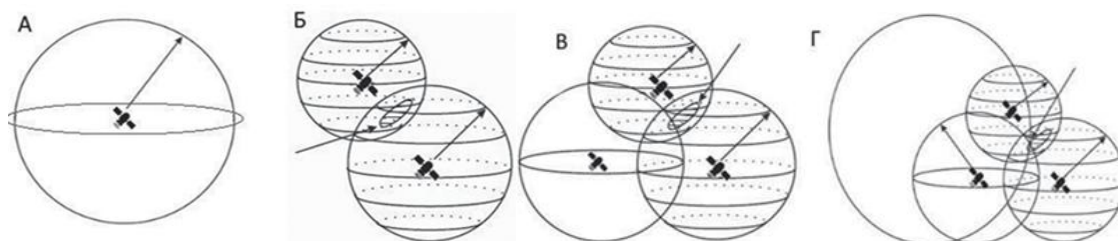


Рис. 2.3 Відображення накладання даних

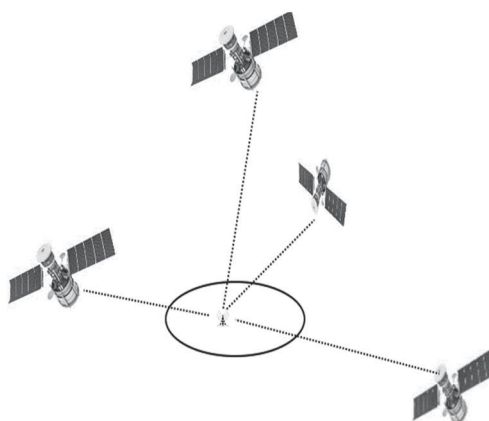


Рис 2.4. Відображення правильного розташування супутників

Найбільш очевидним недоліком використання інерціальних навігаційних систем є те, що сигнали, отримані від супутників, не доходять до приймача або надходять у спотвореному вигляді. Все це відбувається за певних умов. Наприклад, у будівлях із залізобетонним каркасом, тунелях або підвалах мало можливостей визначити точне місцезнаходження безпосередньо. Сильна хмарність і густа рослинність також можуть перешкоджати прийому супутникових сигналів; GPS-сигнали також можуть спотворюватися перешкодами від магнітних бур і наземних джерел. У периполярних регіонах Землі точність погіршується через малий нахил

орбіти, по якій рухаються супутники. Ще однією особливістю GPS є те, що система повністю залежить від умов сигналу, які надаються Міністерством оборони США. Це робиться без урахування того, що наразі не відбувається навмисного погіршення сигналу.

Проект планувався протягом тривалого часу, і зараз система GPS повністю оновлена. Старі супутники знаходяться в процесі заміни на нові супутники, розроблені компаніями Boeing та Lockheed Martin. Згідно з наданими технічними даними, супутник зможе визначати ваше точне місцезнаходження з похибкою лише 0,5 м.

Основні помилки, які вносять похибки в розрахунках точності навігаційних повідомлень в навігаційній системі GPS:

- *Іоносферна затримка сигналу* – це затримка, пов'язана з поширенням сигналу, яка спричиняє похибки порядку 10-20 м вдень 2-5 м вночі;
- *Похибка зміщення шкали часу супутників* - викликані розбіжностями між часовими шкалами різних супутників. виправляються за допомогою наземних станцій моніторингу;
- *Тропосферна затримка сигналу* - похибки безпосередньо залежать від метеорологічних параметрів (тиск, вологість, температура) та висоти над горизонтом супутника. Тропосферна затримка компенсується шляхом розрахунку математичної моделі цього шару атмосфери. Похибка не перевищує 30 м;
- *Похибка у визначенні відстані до супутника* - ця помилка не пов'язана з іншими існуючими типами похибок. Її значення не більше 10 м;
- *Ефемеридна похибка* - помилки зумовлені розбіжністю між фактичним положенням супутника і його розрахунковим положенням. Значення похибки зазвичай не більш як 3 м; помилки обчислення орбіт — з'являються внаслідок неточностей прогнозу і розрахунку ефемерид супутників, виконуваних в апаратурі приймача. Похибка призводить до помилки вимірювання координат близько 1-2 м;

- *Похибка неточного визначення часу* - призводить до виникнення систематичної помилки визначення координат близько 0,6 м. Усувається за допомогою встановлення сервера точного часу на приймачі;
- *Інструментальна помилка приймача* - зумовлена наявністю шумів в електронному тракті приймача. Відношення сигнал/шум приймача визначає точність процедури порівняння, прийнятого від супутника і опорного сигналу, тобто похибка обчислення псевдодальності. Призводить до виникнення координатної помилки майже 1,2 м;
- *Багатопроменевий прийом* - з'являється в результаті вторинних відображень сигналу супутника від великих перешкод, розташованих в безпосередній близькості від приймача. Виникає явище інтерференції і вимірювана відстань виявляється більше дійсної. Найкращим способом боротьби вважається раціональне розміщення антени приймача щодо перешкод;
- *Геометричне розташування супутників* - при обчисленні сумарної помилки необхідно врахувати взаємне положення приймача і супутників. Для цього вводиться спеціальний коефіцієнт геометричного зниження точності *GDOP (Geometric Dilution Of Precision)*, на який необхідно помножити всі перелічені вище помилки, щоб отримати результуючу помилку. Вона обернено пропорційна обсягу фігури, яка буде утворена, якщо провести поодинокі вектори від приймача до супутників. Велике значення GDOP свідчить про невдале розташування сателіта і велике значення помилки.

2.3. Опис похибок позиціонування і навігації

Похибки позиціонування і навігації можуть бути класифіковані за різними критеріями. Найбільш поширеною класифікацією є відносно до джерела їх виникнення. Згідно з цією класифікацією, можна виділити три основні категорії похибок: систематичні, невинпадкові та випадкові.

Систематичні похибки виникають через невідповідність між реальним значенням величини та значенням, яке використовується в системі позиціонування. Ці похибки мають постійний характер і відстежуються впродовж тривалого періоду часу. Серед систематичних похибок можна виділити похибки у вимірюваннях, похибки у визначенні координат станцій, похибки у визначенні часу тощо.

Невинпадкові похибки виникають через нестабільність параметрів, які використовуються в системі позиціонування. Ці похибки залежать від змінливих умов довкілля і звичайно виявляються у вигляді дрейфу вимірювань. Наприклад, похибка вимірювання висоти може змінюватися на відмінні від нуля значення через зміну температури повітря.

Випадкові похибки виникають через випадкові фактори, такі як шум вимірювань, дрейф чутливості сенсорів, вплив електромагнітних полів тощо. Ці похибки залежать від випадкових факторів і можуть бути визначені лише за допомогою статистичного аналізу.

Для досягнення високої точності, необхідно враховувати та коригувати різні види похибок позиціонування та навігації. Розглянемо детальніше основні види похибок.

1. *Похибки сигналу*: вони можуть бути викликані різними факторами, такими як розсіювання, відбиття, розтягування та прогинання сигналів від радіонавігаційних супутників, що може призвести до великої похибки у визначенні місця розташування.
2. *Похибки засобу вимірювання*: вони можуть бути пов'язані з різними факторами, такими як неточне калібрування сенсорів, шуми

вимірювального пристрою, неточне положення та орієнтація пристрою, а також інші системні та випадкові помилки, що можуть вплинути на точність вимірювань.

3. *Похибки даних*: вони можуть виникати через неточність вимірювань, затримки в передачі даних, нестабільність системи збору даних, а також інші фактори, що можуть призвести до неточності визначення місцезнаходження.
4. *Похибки алгоритмів*: вони пов'язані з неточністю самого алгоритму обробки даних, який використовується для визначення місцезнаходження та навігації. Це може бути викликано нестачею достатньої інформації або недостатнім аналізом вхідних даних.
5. *Похибки ефекту мультипатів*: це відображення сигналу від радіонавігаційних супутників від різних поверхонь та перешкод, що можуть призвести до додаткових сигналів, які перешкоджають точному визначенню місцезнаходження. Ця похибка може бути важкою для усунення, оскільки вона залежить від рельєфу місцевості, кута падіння сигналу та інших факторів. Щоб зменшити вплив мультипатів, можуть використовуватися антени зі зменшеним рівнем відбивання, а також алгоритми корекції мультипатів, які базуються на статистичних методах або аналізі спектра сигналу.
6. *Похибки ефекту затухання*: це зменшення рівня сигналу на шляху від супутника до приймача через різні перешкоди, такі як будівлі, дерева або інші перешкоди. Ця похибка може бути компенсована за допомогою корекційного алгоритму, який враховує відстань та характер перешкоди.
7. *Похибки чутливості приймача*: це похибки, що виникають в результаті характеристик самого приймача, таких як частотні характеристики або ефектів термічного шуму. Ці похибки можуть бути усунені за допомогою калібрування приймача та застосування електронної корекції.
8. *Похибки розташування супутника*: це похибки, що виникають через неправильну інформацію про розташування супутника, наприклад, через

неправильний ефемеридний запис. Ці похибки можуть бути виправлені за допомогою корекційних даних, які надаються базовою станцією або іншими джерелами.

9. *Похибки синхронізації*: це похибки, що виникають через неправильну синхронізацію часу між приймачем та супутником.

РОЗДІЛ 3. МІНІМІЗАЦІЯ НАВІГАЦІЙНИХ ПОХИБОК

3.1 Випадкові похибки

Випадкові похибки - які відносять до похибок з непередбачуваною величиною або знаком. Вони регулюються законами ймовірності. Якщо спостерігати за висотою небесного тіла, то розрахунок може бути надто великим, правильним або надто малим. Якщо кількість спостережень проводиться, а систематичності немає, то ймовірність позитивної помилки точно дорівнює ймовірності негативної помилки. Це не означає, що кожне друге спостереження з похибкою буде занадто великим.

Табл. 3.1. Нормальний розподіл випадкових похибок

Похибка	Кількість спостережень	Відсоток спостережень
-10'	0	0.0
-9'	1	0.2
-8'	2	0.4
-7'	4	0.8
-6'	9	1.8
-5'	17	3.4
-4'	28	5.6
-3'	40	8.0
-2'	53	10.6
-1'	63	12.6
0	66	13.2
+1'	63	12.6
+2'	53	10.6
+3'	40	8.0
+4'	28	5.6
+5'	17	3.4
+6'	9	1.8
+7'	4	0.8
+8'	2	0.4
+9'	1	0.2
+10'	0	0.0

0	500	100.0
---	-----	-------

Однак, чим більша кількість спостережень, тим більша ймовірність того, що відсоток позитивних помилок дорівнюватиме відсотку негативних, і що їх величини будуть відповідними.

Припустимо, що зроблено 500 спостережень із повторними результатами, наведені в табл. 3.1. Наближений графік цих помилок показано на мал.3.1. Розрахунки були дещо змінені, щоб створити нормальну криву випадкових похибок, яка є такою ж, як фактична крива, за винятком того, що нормальна крива наближається до нуля в міру збільшення похибки, тоді як фактична крива досягає нуля при +10' і -10'.

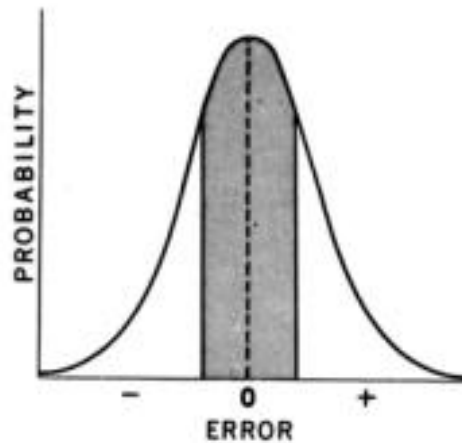


Рис. 3.1. Нормальна крива випадкових похибок

Висота кривої в будь-якій точці являє собою відсоток спостереження який матиме вказану помилку цієї точки. Ймовірність будь-якого подібного спостереження подібної заданої похибки є пропорцією кількості спостережень із цією похибкою до загальної кількості спостережень або відсоток, виражений десятковим дробом. Таким чином, ймовірність того, що спостереження має помилку -3' становить

$$\frac{40}{500} = \frac{1}{12.5} = 0.08(8\%)$$

Якщо площа під кривою становить 100 відсотків від спостереження, половина площі (заштрихована частина мал. 3.2.) становить 50 відсотків спостережень. Значення похибки на межах цієї заштрихованої частини часто називають 50-відсотковою похибкою» або ймовірною похибкою.

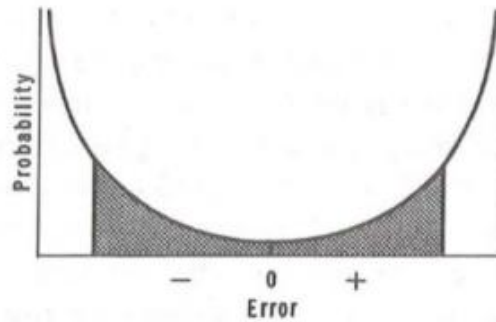


Рис.3.2. Періодична помилка

Відсоток похибки визначається математично. Для нормальної кривої кожна похибка є квадратом суми квадратів і ділиться на одиницю менше, ніж кількість спостережень і визначається квадратний корінь частки. Це значення називається стандартним відхиленням або стандартною похибкою (грецька буква сигма).

$$\sigma = \frac{0 \times (-10)^2 + 1 \times (-9)^2 + 2 \times (-8)^2 + 4 \times (-7)^2 + 9 \times (-6)^2}{499} =$$

$$= \frac{4474}{\sqrt{499}} = \sqrt{8.966} = 2.99\%$$

Стандартне відхилення становить 68,27% похибки. Ймовірність появи похибки рівна або менша а питома величина може бути приблизно визначена наступним відношенням:

$$\text{Похибка } 50\% = \frac{2}{3} \times \sigma = 2'$$

$$\text{Похибка } 68\% = 1 \times \sigma = 3'$$

$$\text{Похибка } 95\% = 2 \times \sigma = 6'$$

$$\text{Похибка } 99\% = 2 \frac{2}{3} \times \sigma = 8'$$

$$\text{Похибка } 99.9\% = 3 \frac{1}{3} \times \sigma = 10'$$

Багато помилок навігації не відповідають нормальному розподілу, описаному вище. Значення висоти можна приймати лише з точністю до 0,1'. Похибка табличної висоти може мати будь-яке значення від + 0,05' до -0,05', і будь-яке значення в цих межах є таким, що може статися як і будь-яке інше з такою ж точністю. Те ж саме стосується секстанта, який не можна прочитати точніше, ніж 0,1', і різниці в часі, яку не можна виміряти точніше, ніж 1 мкс. Ці значення стосуються окремих зазначених похибок, а не повної похибки, яка може бути задіяна. Це прямокутна похибка, яка називається так через форму її ділянки, як показано на мал. 3.3. 100-відсоткова похибка - це половина різниці між вимірюваннями. 50-відсоткова похибка становить половину цієї суми, 95-відсоткова похибка дорівнює 0,95 помноженої на цю величину і т. д. У деяких випадках може бути доречніше називати прямокутну похибку похибкою роздільної здатності.

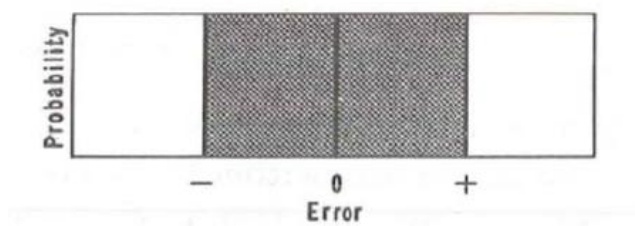


Рис. 3.4. Прямокутна похибка

Ще один тип випадкової похибки зустрічається під час навігації. Якщо компас періодично коливається через поворот корабля, його рух сповільнюється в міру наближення до кінця гойдання, коли похибка наближається до максимального значення. Якщо вимірювання знімали безперервно або через рівні проміжки часу, причому цей інтервал становив

би невеликий відсоток від загального періоду коливань, крива похибок мала б характерну U-подібну форму, як показано на мал. 3.2. Така ж похибка виникає при вимірюванні висоти небесного тіла з крила містка судна, що сильно котиться, коли крен викликає великі зміни висоти ока. Цей тип помилки називається періодичною. Ефект підсилюється схильністю робити вимірювання поблизу одного з екстремальних значень, оскільки в цей час приклад показує найбільш стабільні значення. Якщо непрактично робити вимірювання в центрі періоду, похибку можна усунути або зменшити шляхом усереднення вимірів, знятих безперервно або через короткі проміжки часу, як зазначено вище. Цей метод використовується в секстантах типу штучного горизонту усереднення. Як правило, кращі результати можна отримати, знявши максимум позитивних і максимум негативних вимірів і усереднивши результати.

Крива будь-якого типу випадкової похибки симетрична відносно лінії, що представляє нульову похибку. Це означає, що на ідеальному графіку кожна точка з одного боку кривої є похибкою однакової величини. Середнє значення всіх вимірів з урахуванням знаків дорівнює нулю. Чим більша кількість зроблених вимірів, тим більша ймовірність, що вони відповідають ідеальній кривій. Інший спосіб стверджувати це полягає в тому, що зі збільшенням кількості вимірювань можна очікувати зменшення похибки середнього значення.

3.2. Комбінаційні похибки

Багато результатів, отриманих під час навігації, містять кілька похибок. Деякі з них мають кілька компонентів. При визначенні висоти й азимута виникає ряд можливих помилок. При знаходженні різниці висот можлива прямокутна похибка. Кілька додаткових помилок можуть вплинути на точність обчислення. Таким чином, остаточно нанесена лінія позиції може містити 30 і більше похибок. Поправки застосовуються до деяких більших, так що в кожному з цих випадків застосовна похибка є різницею між

застосованою поправкою та фактичною похибкою. Таким чином, поправка на падіння може бути застосована для висоти ока 30 футів, тоді як фактична висота на момент спостереження може бути більшою. Навіть якщо висота ока дорівнює рівно 30 футах, прямокутна похибка може бути залучена до корекції падіння.

Якщо дві або більше похибок застосовні до результату, сумарна похибка дорівнює алгебраїчній сумі всіх похибок. Таким чином, якщо дане число має помилки +4, - 2, - 1, + 3, + 2, 0 і - 2, загальна помилка дорівнює + 4. Систематичні похибки можна об'єднати шляхом додавання кривих індивідуальних похибок. Таким чином, магнітний компас може мати квадратичну похибку, як показано верхньою кривою на мал. 3.4, і напівкруглу похибку, як показано другою кривою. Сума цих двох похибок показана на нижній кривій. Якщо, крім того, компас має постійну похибку, нижня крива переміщується вертикально вгору або вниз на величину постійної похибки, не зазнаючи зміни форми. Якщо постійна похибка перевищує максимальне значення комбінованих кривих, усі похибки є додатними або від'ємними, але мають різну величину.

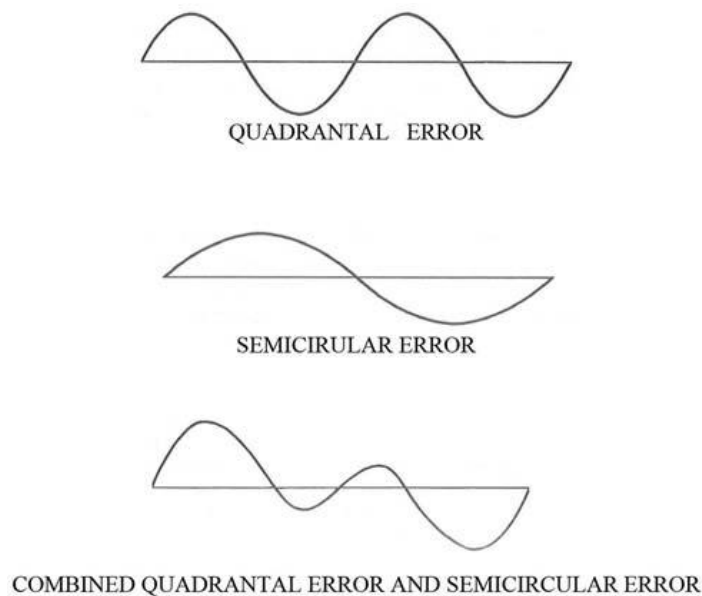


Рис. 3.4. Комбінована системна похибка

Якщо ряд випадкових похибок поєднати, результат має тенденцію слідувати нормальній кривій незалежно від форми індивідуальних помилок, і

чим більше число, тим більше можна очікувати, що результат наблизиться до нормальної кривої (мал. 3.1). Якщо даний результат підлягає похибкам плюс-мінус 3, 2, 1, 2, 4, 2, 1, 8, 1 і 2, загальна похибка може бути до 26. Це тому, що ймовірність будь-якої позитивної або негативної похибки дорівнює половині одиниці. За тими ж міркуваннями, приблизно половина позитивних або негативних матимуть будь-яку конкретну додаткову позитивну або негативну корекцію.

Ймовірність виправлень, що мають позитивний або негативний знак:

$$\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}$$

Ймовірність з усіх 10 виправлень, що мають позитивний або негативний знак:

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{10} = \frac{1}{1024}$$

Якщо ймовірність з 20 виправлень, що мають позитивний або негативний знак:

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{20} = \frac{1}{1048576}$$

При наявності як систематичних, так і випадкових похибок в процесі, присутні обидва ефекти. Збільшення в кількості відліків зменшує залишкову випадкову похибку, але незалежно від кількості показань систематична помилка є присутня в повному обсязі. Таким чином, якщо показання ряду різниці фаз зроблені у фіксованій точці, середнє повинно бути наближене до існуючого значення, якщо це несистематична похибка. Але якщо обладнання вийшло з ладу в такій мірі, що смуга невірно визначена, то кількість зчитувань не виправить цю помилку. Тому на мал.3.4 постійна помилка поєднується з нормальною випадковою похибкою. Нормальна крива має правильну форму, але зсувається від нульового значення.

За деяких умов можливі систематичні похибки виключаються з результатів, навіть якщо величина не відповідає дійсності. Таким чином, якщо два небесних тіла відрізняються за азимутом на 180° , і спостерігається висота кожного, лінія посередині між позиціями, що впливають із неї вільна

від будь-якої постійної похибки у висоті(наприклад, аномальна рефракція або провал,). Це могло б не бути вільним від такої постійної похибки, як одна в часі (якщо тільки тіла були на небесному меридіані). Так само виправлення отримані спостереженнями трьох зірок, що відрізняються за азимутом на 120° , або чотири зірки, що відрізняються на 90° , вільна від постійної похибки у висоті, якщо в центрі фігури використовуються позиційні лінії. Центр фігури, утворений колами положення з відстаней рівновіддалених предметів азимута вільний від постійних похибок в дальності. Константа похибки в опорних лініях не вносить помилку у виправлення, якщо об'єкти розташовані однаково за азимутом. У всіх цих прикладах, правильна позиція поза фігурою, утвореною лінією є положення, якщо всі об'єкти які спостерігаються знаходяться на одній стороні спостерігача (тобто, якщо вони лежать в межах дуги менше ніж 180°).

3.3. Точність в навігації

Точність навігації зазвичай виражається термінами ймовірності перебування на заданій відстані від потрібної точки під час навігації.

Якщо враховувати точність лише однієї лінії позиції, то вказану відстань можна виразити як стандартне відхилення або деяке кратне йому, припускаючи, що помилки позиційної лінії йдуть заодно осьовим нормальним розподілом. Відстань для стандартного відхилення позиційної лінії вимірюється як середнє арифметичне позицій, які могли бути встановлені з великої кількості спостережень за заданим місцем і часом. Тому ця відстань не вказує відстань між лінією позиції та лінією спостерігача, хіба що випадково. Якщо помилка вказана як 1σ , 68.27 відсотка випадків має призвести до позиції зсувів від середнього арифметичного в будь-яку сторону немає перевищення відстані, зазначеної для 1σ . Якщо похибка встановлена як 2σ , 95,45 відсотка рядків позиції не повинно бути зміщене від середнього арифметичного в будь-якому напрямку на більше ніж відстань, визначену для 2σ . Якщо похибка вказана як ймовірна похибка, то 50

відсотків ліній позиції повинні не бути зміщеними від середнього арифметичного в жодному напрямку більше, ніж відстань, визначена для $0,6745 \sigma$.

Стандартне відхилення також використовується при розробці виразів для ймовірності знаходження фіксованої позиції в межах заданої відстані середнього значення позицій, які могли б встановити з великої кількості спостережень за заданим місцем та часом за допомогою системи, що використовується для встановлення похибок.

У наступному прикладі виправлення встановлені перетином двох позиційних ліній, кожна з яких може бути похибкою. Лінії положення (мал. 3.5) є вимірюваннями дальності від двох точок на кінцях базової лінії відомої довжини. Через неточності у вимірюваннях фактичні діапазони відрізняються від виміряних значень і можуть збігатися десь між межами, які показані як додаткові дуги по обидві сторони від виміряної дуги. Перетин двох ліній положення разом зі стандартними відхиленнями, пов'язаними з кожним у розширеному масштабі на малюнку 3.6. Це показано як контури рівної щільності, ймовірністю навколо такого перетину є еліпс з центром на перетині. Таким чином, еліпс, показаний на малюнку 3.6, може складати 75 відсотків ймовірності еліпса, що означає, що виправлення буде лежати в межах такого еліпса з центром на основі позицій, які було б встановлено з великою кількістю спостережень за заданим місцем та часом за допомогою системи, що використовується для встановлення виправлень.

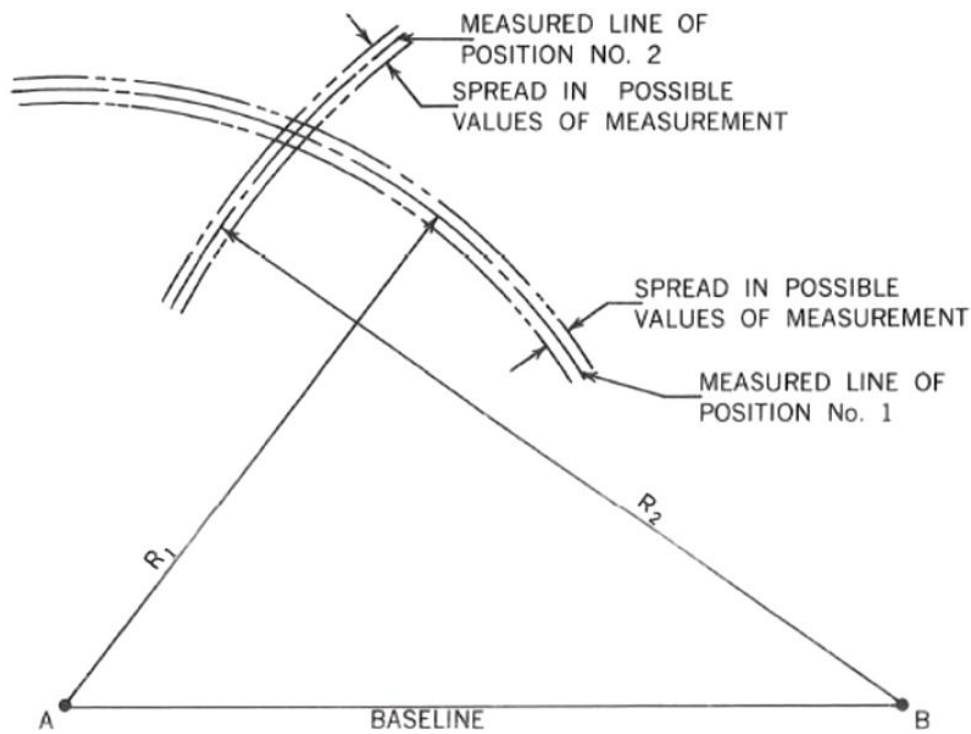


Рис. 3.5. Фіксація встановлена на перетині двох ліній положення з різними значеннями похибки.

Для спрощення обговорення точності навігації зробимо наступні припущення:

1. Всі постійні похибки або похибки зсуву були вилучені, залишивши лише випадкові похибки. Таким чином, середня похибка вважається рівною нулю.
2. Ці випадкові похибки вважаються нормально розподіленими.
3. Похибки, пов'язані з двома пересічними лініями, що перетинаються, вважаються незалежними. Це припущення означає, що зміна похибки однієї лінії положення не впливає на іншу.
4. Вважається, що лінії положення є прямими лініями в невеликій області в безпосередній близькості від їх перетину. Це припущення справедливе до тих пір, поки середньоквадратичне відхилення порівняно з радіусом кривизни лінії положення мале.

5. Похибки положення обмежуються двовимірним випадком. Як показано на мал. 3.6, загальний випадок перетину двох ліній положення під будь-яким кутом зрізу і з різними значеннями похибок, пов'язаних з кожною лінією положення призводить до еліптичної фігури похибок. На малюнку 3.7 показано еліпс спрощено до геометричних термінів.

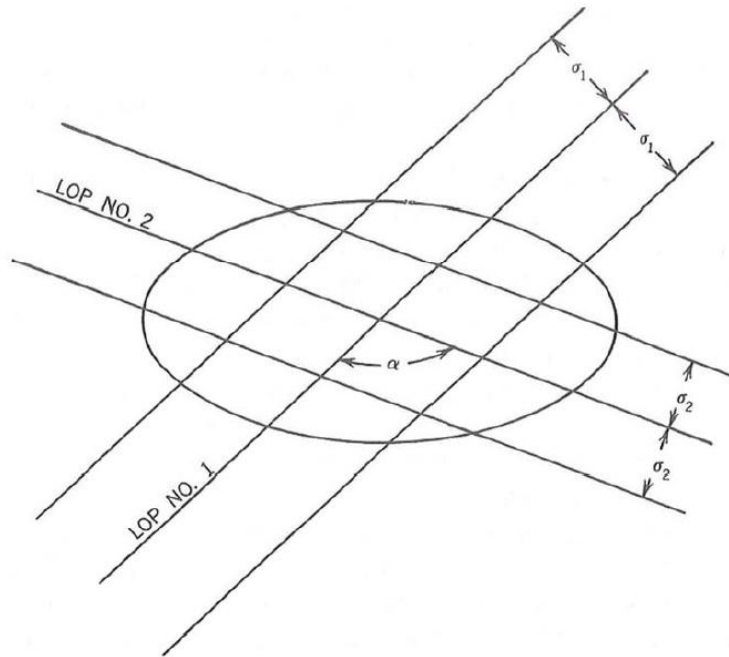


Рис. 3.6. Розгорнутий вигляд перетину двох ліній положення

З малюнку 3.7 можна легко припустити, що точна форма фігури похибки залежить від величин двох одновимірних похибок входу, 1σ і 2σ , а також від кута зрізу. Кут також є кутом між двома значеннями сигми, оскільки середньоквадратичні відхилення взаємно перпендикулярні до відповідних лініям положень. Ці відхилення можна обчислити для того, щоб надати ймовірність того, що точка знаходиться в межах кола зазначеного радіуса.

Коли це зроблено, похибка вказана в термінах має більше значення для практикуючого навігатора. Основа цієї концепції можна найкраще побачити, спочатку розглянувши випадок, коли обидві похибки рівні, і кут перетину ліній положення є прямим кутом. В цьому випадку, і тільки в цьому випадку

цифра помилки стає колом і описується круговим нормальним розподілом. Ця ситуація наведена на малюнку 3.8. У цьому випадку горизонтальна вісь вимірюється через R/σ , де R є встановленим радіусом кола і σ є мірою похибки.

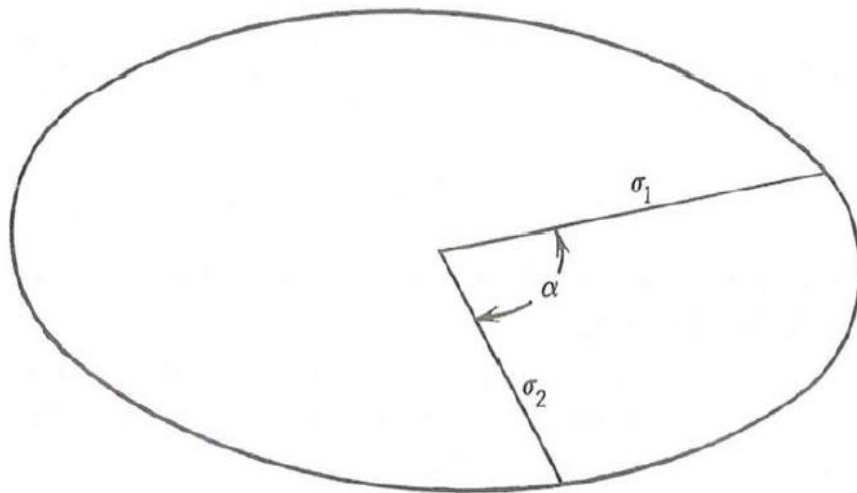


Рис. 3.7. Еліпс базової похибки

Міра похибки надається просто як σ , для в цьому циркулярі випадок $1\sigma = 2\sigma$. Система вимірювання дає кругову похибку фігури і має значення $\sigma=100$ метрів, а ймовірність фактичного знаходження в колі зі 100 метровим радіусом, коли $R/\sigma= 1,0$ можна зчитувати по вертикалі осі 39,3%. Щоб отримати радіус кола в межах якого з 50-відсотковою ймовірністю, відповідне значення R/σ з графіка становить 1.18.

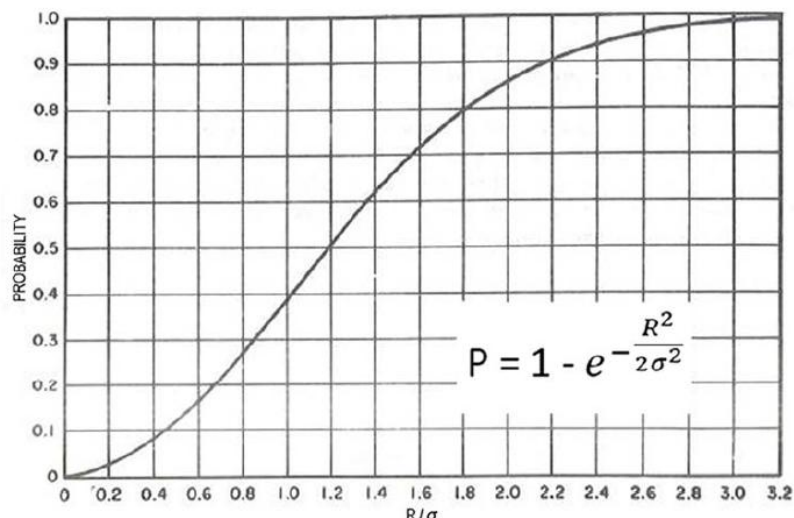


Рис. 3.8. Круговий нормальний розподіл

Таким чином, для цього прикладу циклічна ймовірна похибка становитиме 118 метрів. В одному методі використання еліпсів помилок для отримання радіусів кіл еквівалентної ймовірності, нові значення знаходяться вздовж великої та малої осей еліпса (мал. 3.10), використовуючи такі рівняння:

$$\sigma x^2 = \frac{1}{2 \sin^2 \alpha} \left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^2 - 4 \sigma_1 \sigma_2 \sin \alpha} \right]$$

$$\sigma x^2 = \frac{1}{2 \sin^2 \alpha} \left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^2 - 4 \sigma_1 \sigma_2 \sin \alpha} \right]$$

Тоді співвідношення $c = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$ де σ_x більший з двох нових стандартних

відхилень, використовується для введення таблиці 3.2 яка пов'язує еліпси різних значень еліптичності з радіусами кіл еквівалентної ймовірності.

$$\sigma_1^2=225; \sigma_2^2=400; \sin \alpha^2 = 0.5868$$

Підставляючи в рівняння для σx^2 і σy^2 , σx і σy обчислюються як 29,9 метрів і 13,1 метрів відповідно. Оскільки функція К помножена на більшу з двох стандартних відхилень, отриманий шляхом перетворення метод дає значення радіуса кола відповідно значенню ймовірності, наведене в таблиці 3.2, $K=1.003$. Після входу в таблицю 3.2 з $K=1.0$ і $c=0.44$, ймовірність виявилася 62 відсотки.

Табл. 3.3. Фактори перетворення еліпса ймовірності в коло еквівалентної ймовірності

$P \backslash e$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
.5000	0.67449	0.68199	0.70585	0.74993	0.80785	0.87042	0.93365	0.99621	1.05769	1.11807	1.17741
.7500	1.15035	1.15473	1.16825	1.19246	1.23100	1.28534	1.35143	1.42471	1.50231	1.58271	1.66511
.9000	1.64485	1.64791	1.65731	1.67383	1.69918	1.73708	1.79152	1.86253	1.94761	2.04236	2.14597
.9500	1.95996	1.96253	1.97041	1.98420	2.00514	2.03586	2.08130	2.14598	2.23029	2.33180	2.44775
.9750	2.24140	2.24365	2.25053	2.26255	2.28073	2.30707	2.34581	2.40356	2.48494	2.58999	2.71620
.9900	2.57583	2.57778	2.58377	2.59421	2.60995	2.63257	2.66533	2.71515	2.79069	2.89743	3.03485
.9950	2.80703	2.80883	2.81432	2.82899	2.83830	2.85894	2.88859	2.93347	3.00431	3.11073	3.25525
.9975	3.02334	3.02500	3.03010	3.03898	3.05234	3.07144	3.09871	3.13969	3.20586	3.31099	3.46164
.9990	3.29053	3.29206	3.29673	3.30489	3.31715	3.33464	3.35949	3.39647	3.45698	3.55939	3.71692

Таблиця 3.3 і малюнок 3.9 надають готову інформацію про розміри кіл конкретного значення ймовірності пов'язані з еліпсами різного ексцентриситету. В іншому методі фіктивні значення сигми ідентичні, припускається, що значення, позначені σ^* , замінюють обидва нерівні значення, задані спочатку (1σ і 2σ). Вигаданий кут зрізу α^* також передбачається замість кута зрізу (α) надано спочатку (мал 3.9).

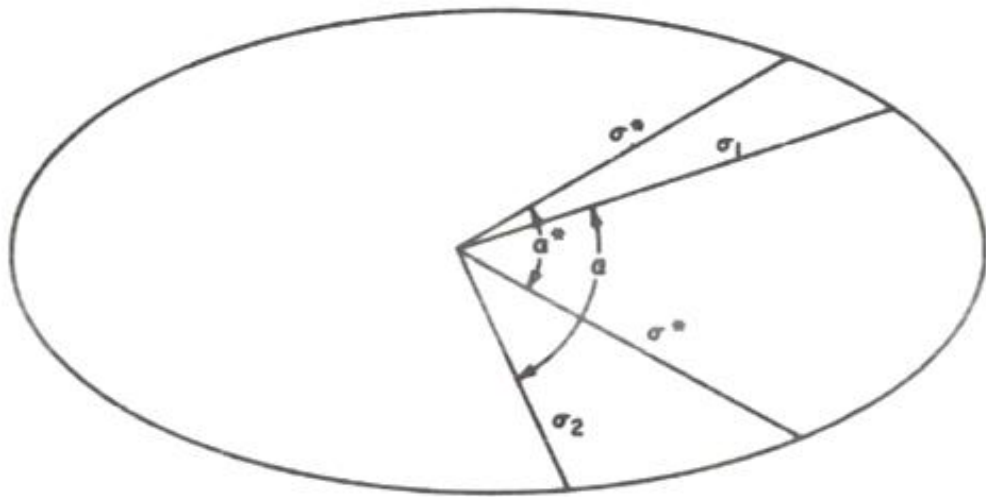


Рис. 3.9. Перетворені параметри похибок еліпса

У цьому методі використовується набір кривих ймовірності і окрема крива для кожного значення кута зрізу α . Ці криві можна використовувати лише тоді, якщо дві міри похибок рівні і необхідність здійснення перетворення до фіктивного σ^* .

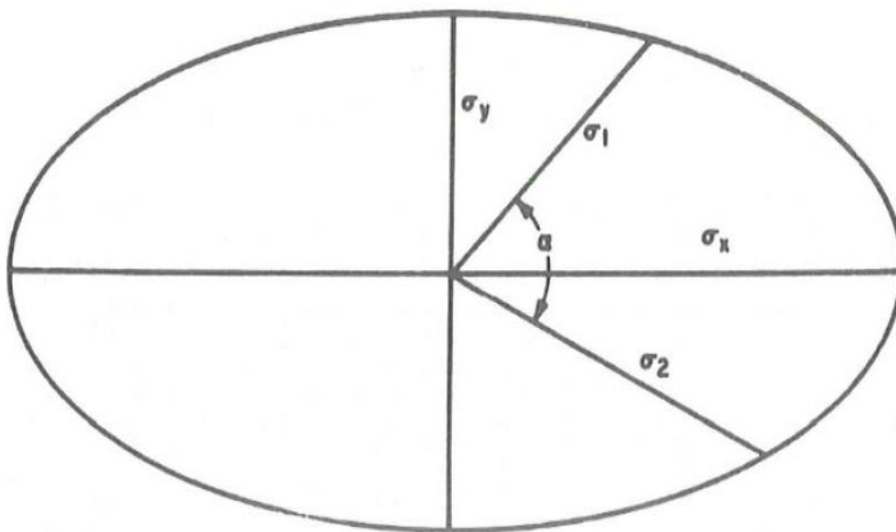


Рис. 3.10. Перетворення в стандартні відхилення по осях еліпса

Значення σ^* і α^* , необхідні для використання ймовірностей можуть бути визначені за допомогою наступних рівнянь:

$$\sigma^* = \frac{\sin \beta \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}{\sqrt{2}}$$

$$\alpha^* = \arcsin(\sin 2\beta \sin \alpha)$$

$$\text{де } \beta = \arcsin \tan \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)$$

Тоді,

$$\sin 2\beta = \frac{2\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

Для використання кривої та номограми для отримання σ^* та α^* , необхідно спочатку обчислити відношення. Значення, завжди береться як більше з двох у співвідношенні $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ так, щоб відношення завжди було менше 1.0. З цим співвідношенням вводимо криву і отримуємо фактор σ^* . Помножимо на σ_1 цей множник, щоб отримати фіктивну функцію σ^* .

Розглянемо числовий приклад, що ілюструє метод розрахунку, припустимо, що кут зрізу 50° , σ_1 , становить 20 метрів, а σ_2 - 15 метрів, щоб визначити ймовірність розташування в колі радіусом 30 метрів.

Розрахуємо співвідношення:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{15}{20} = 0.75$$

Введемо криву на малюнку з цим співвідношенням і отримуємо коефіцієнт σ^* фактор (0.845). Помножимо цей коефіцієнт на σ_1 , щоб отримати σ^* , яке дорівнює 16,9 метрів. Обчислимо співвідношення:

$$\frac{R}{\sigma^*} = \frac{30}{16.9} = 1.78$$

Використовуючи номограму кутів зрізу (Додаток 1) зі співвідношенням $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ і з заданим кутом α^* отримуємо фіктивний кут зрізу $\alpha^* = 47^\circ$.

Значення $\frac{R}{\sigma^*} = 1.78$ і $\alpha^* = 47^\circ$ потім використовуються для введення кривої ймовірностей для отримання $P = 0,62$ або 62 відсотки, інтерполюючи між кривими 40° і 50° для отримання $\alpha^* = 47^\circ$.

3.4. Способи зменшення похибок позиціонування

Існують різні способи усунення або зменшення впливу цих похибок на точність позиціонування та навігації. Один з них - використання антен зі спеціальними фільтрами та алгоритмами, що дозволяють виділяти сигнал прямого поширення та ігнорувати сигнали, що приходять з різних поверхонь та перешкод. Інший спосіб - використання корекційних сигналів, таких як корекції часу та положення супутників, корекції іоносфери та атмосферних похибок, які дозволяють покращити точність визначення позиції. Також можуть бути використані методи геометричного розрахунку, що дозволяють враховувати розташування та орієнтацію антен, а також використання додаткових датчиків, наприклад, акселерометрів та гіроскопів, для покращення точності позиціонування та навігації в режимі реального часу. В додаток важливим є підтримання та оновлення баз даних та карт, які використовуються для навігації, що дозволяє уникнути похибок, пов'язаних з помилками в даних.

Узагальнюючи, точність позиціонування та навігації залежить від багатьох факторів, тому її покращення вимагає постійного вдосконалення технологій та методів, а також підтримки та оновлення баз даних та карт.

До прикладу в даний час ІКАО як елементи GNSS допускає як об'єднані сузір'я навігаційних супутників GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, так і окремі сузір'я навігаційних супутників.. Ці функціональні доповнення мають забезпечити режим диференціальної супутникової навігації, без якого похибка визначення розташування становить десятки метрів. В результаті є не виконані вимоги щодо точних заходів на посадку. Крім високої точності місцезнаходження, повинен також забезпечуватися безперервний контроль цілісності (нормального функціонування) навігаційних супутників. Диференціальний режим супутникової навігації дозволяє в десятки разів зменшити похибку визначення місця розташування.

У функціональних доповненнях вирішуються завдання безперервного контролю цілісності, експлуатаційної готовності та доступності. Внаслідок

впровадження диференціального режиму, методів контролю точності, цілісності, безперервності обслуговування та експлуатаційної готовності супутникова навігація може стати основним засобом аеронавігації у глобальному масштабі.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи:

- розглянуто принцип роботи системи навігації як цілісної структури.
- проведено аналіз методів позиціонування та навігації (більшу увагу було приділено визначенню місцезнаходження методом триангуляції).
- розглянуто фактори, які тим чи іншим чином впливають на точність навігації.
- проведено аналіз похибок позиціонування наземних об'єктів засобами супутникової навігації (на прикладі супутникової системи GPS).
- проведено аналіз, мінімізацію та розрахунки випадкових похибок, комбінацій похибок та навігаційної точності систем позиціонування.

Мета роботи цілком досягнута оскільки було розглянуто принцип роботи навігаційних систем і методів позиціонування та навігації. А також було проведено аналіз і розрахунок похибок позиціонування та навігації. Для досягнення цієї мети було зроблено наступне:

- вивчено існуючі методи позиціонування та навігації;
- опрацьовано різні типи похибок в навігації;
- проведено розрахунки окремих видів похибок та точності навігації;
- запропоновано порядок мінімізації впливу похибок різного роду на точність вирішення задач позиціонування та навігації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бабак В. П., Конін В. В., Харченко В. П. Супутникова радіонавігація. – К.: Техніка, 2014. – 328 с.
2. Гофман-Велленгоф В. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика/ В. Гофман-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз / Пер. з англ.; За ред. акад. Я. С. Яцківа. – К.: Наук. думка, 2016. – 391 с.
3. Interface Control Document Global Positioning System (ICD-GPS-200C). Wash., 2021. – 160 p.
4. Kirichek R. V., Kucheryavy A. E., Paramonov A. I., Prokop'ev A. V. Evolution of Research in the Field of Wireless Sensor Networks // Telecom IT. 2014. no. 4. pp. 29–41.
5. Kostyk I. N., Kucheryavy A. E., Prokop'ev A. V. Comparison of the Effectiveness of Positioning for Bluetooth Networks, Wi-Fi and ZigBee // Telecom IT. 2019. no. 2. pp. 53–61.
6. Kostyk I. N., Kucheryavy A. E., Prokop'ev A. V. Comparison of the Effectiveness of Positioning for Bluetooth Networks, Wi-Fi and ZigBee // Telecom IT. 2015. no. 2. pp. 53–61.
7. GPSSystem Control Segment(Monitor Stations). 20090419. www.kowoma.de/en/gps/control_segment.htm.
8. International Earth Rotation and Reference Systems Service. www.iers.org.

Додаток 1. Номограма визначення кутів зрізу

