

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Кафедра аеронавігаційних систем

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри АНС

д-р техн. наук, проф.

_____ Ларін В.Ю.

« ____ » _____ 2023р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «МАГІСТР»

за освітньо-професійною програмою

«БЕЗПІЛОТНІ АВІАЦІЙНІ КОМПЛЕКСИ»

(Сертифікат про акредитацію освітньої програми № 3837 от 29.12.2022)

Тема:

**МОДЕЛІ СИСТЕМИ ПОСАДКИ НТОЛ ВАЖКИХ БПС ЗА СИГНАЛАМИ
ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ**

Виконавець:

Пархоменко Павло Павлович

Керівник:

д.т.н., проф. Конін Валерій Вікторович

Нормоконтролер:

д.т.н. проф. Шмельова Тетяна Федорівна

Київ-2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Кафедра аеронавігаційних систем
Спеціальність: 272 «Авіаційний транспорт»
Освітньо-професійна програма: «аБезпілотні авіаційні комплекси»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АНС

_____ В.Ю. Ларін

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Пархоменка Павла Павловича

1. *Тема дипломної роботи:* **«Моделі системи посадки НТОЛ важких БПС за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем»** від "22" серпня 2023р. № 1443/ст
2. *Термін виконання роботи:* 23.10.2023 – 31.12.2023
3. *Вихідні дані до роботи:* моделі системи посадки важких БПЛА, що базуються на використанні сигналів глобальних навігаційних супутникових систем.
4. *Зміст пояснювальної записки:* Системи посадки НТОЛ. Посадка по сигналам глобальних навігаційних супутникових систем. Характеристики точності, цілісності, безперервності обслуговування та експлуатаційної готовності SBAS. Експериментальні дослідження моделі системи посадки. Охорона праці. Охорона навколишнього середовища.
5. *Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:* графіки результатів даних, таблиці, формули, алгоритми.
6. *Календарний план-графік*

№ п/п	Завдання	Термін Виконання	Відмітка про виконання
1	Підготовка та написання 1 розділу «Системи посадки HTOL»	23.10.23-30.10.23	виконано
2	Підготовка та написання 2 розділу «Посадка по сигналам глобальних навігаційних супутникових систем»	1.11.23-7.11.23	виконано
	Підготовка та написання 3 розділу «Характеристики точності, цілісності, безперервності обслуговування та експлуатаційної готовності SBAS»	9.11.23-19.11.23	виконано
1.	Підготовка та написання 4 розділу «Експериментальні дослідження моделі системи посадки»	20.11.23-26.11.23	виконано
2.	Підготовка та написання 5 розділу «Охорона праці»	27.11.23-30.11.23	виконано
3.	Підготовка та написання 6 розділу «Охорона навколишнього середовища»	01.12.23-05.12.23	виконано
4.	Підготовка презентації та доповіді	06.12.23-31.12.23	виконано

8. Дата видачі завдання: «10 » жовтня 2023 р.

Керівник дипломної роботи _____ Конін Валерій Вікторович
(підпис керівника)(прізвище, ім'я, по батькові)

Завдання прийняла до виконання _____ Пархоменко Павло Павлович
(підпис студента)(прізвище, ім'я, по батькові)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Моделі системи посадки НТОЛ важких БПС за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем»: 97 сторінок, 26 рисунків, 5 таблиць, 17 використаних джерел.

Об'єкт розробки – моделі системи посадки важких БПЛА, що базуються на використанні сигналів глобальних навігаційних супутникових систем.

Предмет розробки – моделі системи посадки важких БПЛА, що базуються на використанні сигналів глобальних навігаційних супутникових систем.

Мета роботи – розробка моделей системи автоматичної посадки важких безпілотних літальних апаратів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем.

Метод дослідження – аналіз науково-технічної літератури з досліджуваної проблематики, моделювання у програмі MATLAB з використанням експериментальних даних, математична статистика, методи лінійної алгебри.

Наукова новизна – вперше були дослідженні супутникові системи посадки які складаються з трьох та чотирьох навігаційних супутникових систем.

В першому розділі представлений аналіз наявних традиційних систем посадки.

В другому розділі розглядаються методи посадки по сигналам глобальних навігаційних супутникових систем.

В третьому розділі ми розглянули характеристики точності, цілісності, безперервності обслуговування та експлуатаційної готовності SBAS.

В четвертому розділі ми зробили експериментальні дослідження моделі системи посадки.

В п'ятому розділі ми дослідили охорону праці.

В шостому розділі ми підняли тему захисту навколишнього середовища.

**СУПУТНИКОВА СИСТЕМА НАВІГАЦІЇ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ
СТЕНД, СУПУТНИКОВИЙ НАВІГАЦІЙНИЙ ПРИЙМАЧ**

АРКУШ ЗАУВАЖЕНЬ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. СИСТЕМИ ПОСАДКИ NTOL.....	11
1.1 Система посадки ILS.....	11
1.2 Система посадки MLS.....	17
1.3 Система посадки VASI/PAPI.....	24
1.4 Радіолокатор точного заходу на посадку (PAR).....	27
1.5 Вибір напрямку дослідження.....	29
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	31
РОЗДІЛ 2. ПОСАДКА ПО СИГНАЛАМ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ.....	32
2.1 Вимоги до супутникових навігаційних систем при посадці.....	32
2.2 Посадка по сигналам космічних функціональних доповнень	34
2.3 Посадка по сигналам наземних функціональних доповнень.....	46
2.4 Можливості спільного застосування GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou для посадки	49
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	51
РОЗДІЛ 3.ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОЧНОСТІ, ЦІЛІСНОСТІ, БЕЗПЕРЕРВНОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ГОТОВНОСТІ SBAS	52
3.1 Характеристики точності, цілісності, безперервності обслуговування, експлуатаційної готовності SBAS.....	52
3.2 Концепція HPL – VPL.....	57
3.3 Метод і алгоритм розрахунку захисних рівнів.....	62
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	67
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ПОСАДКИ	68
ВИСНОВОКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	78
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ	80
5.1 Охорона праці при виконанні професійних обов'язків	80
5.2 Правила переміщення обладнання.....	81
5.3 Інструкції з техніки безпеки під час експлуатації електрообладнання	82
5.4 Охорона праці та безпека місцевого населення.....	85

ВИСНОВОКИ ДО РОЗДІЛУ 5	87
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	88
ВИСНОВОКИ ДО РОЗДІЛУ 6	91
ВИСНОВКИ.....	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	94

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ABAS - бортова система функціонального доповнення
- APAPI - Скорочений індикатор точного заходу на посадку (Abbreviated Precision Approach Path Indicator)
- APS - Диспетчер підходу (Approach Control Surveillance)
- APVI - Approach with Vertical Guidance (Захід на посадку з вертикальним наведенням)
- AZ - Азимутальна станція (Azimuth station)
- CDI - Індикатор курсового відхилення (Course Deviation Indicator)
- DH/DA - Висота прийняття рішення (Decision Height/Altitude)
- DME/P - Точний далекомір (Precise Distance Measuring Equipment)
- EGNOS - Європейська геостационарна навігаційна система накладання
- EL - Станція перевищення (Elevation station)
- FAS - дані кінцевої ділянки заходу на посадку
- FD - Fault Detection (Виявлення несправностей)
- FDE - Fault Detection and Exclusion (Виявлення та виключення несправностей)
- GAGAN - Індійська гео та GPS - розширена навігація
- GBAS - наземна система функціонального доповнення
- GES - наземні станції передавання даних
- GNSS - Global Navigation Satellite System (Глобальна навігаційна спутникова система)
- GPS - Global Positioning System (Глобальна система позиціонування)
- GRAS - наземна регіональна система функціонального доповнення
- HAL - Horizontal Alert Limit (Горизонтальний поріг тривоги)
- HMI - Hazardous Misleading Information (Небезпечна дезінформуюча інформація)
- HPL - Horizontal Protection Level (Горизонтальний захисний рівень)
- ILS - система заходу на посадку за приладами

ILS - Система посадки за приладами (Instrument Landing System)

LAAS - Система локального розширення

LNAV - Lateral Navigation (Бічне наведення)

LPV - Localizer Performance with Vertical Guidance (Характеристики місцевого маяка з вертикальним наведенням)

МЕНТ - Мінімальна висота польоту очей над порогом (Minimum Eye Height over Threshold)

MI - Misleading Information (Дезінформуюча інформація)

MLS - Мікрохвильова система посадки (Microwave Landing System)

MOPS - Minimum Operational Performance Standards (Стандарти мінімальних експлуатаційних характеристик)

MSAS - багатофункціональна супутникова система доповнення

NPA - Non-Precision Approach (Неточний захід на посадку)

NSE - Navigation System Error (Похибка навігаційної системи)

PA - Precision Approach (Точний захід на посадку)

PAPI - Індикатор траєкторії точного заходу на посадку (Precision Approach Path Indicator)

PAR - Радіолокатор точного заходу на посадку (Precision Approach Radar)

PSR - Первинний оглядовий радіолокатор (Primary Surveillance Radar)

QDM - Магнітний пеленг

RAIM - Receiver Autonomous Integrity Monitoring (Автономний контроль цілісності приймача)

SBAS - Satellite Based Augmentation System (Супутникова система функціонального доповнення)

SBAS - Супутникова система функціонального доповнення (Satellite Based Augmentation System)

SPS - служба стандартного визначення місця розташування

TRSB - Скануючий промінь із прив'язкою за часом (Time Referenced Scanning Beam)

TTA - Time To Alert (Час спрацювання тривоги)

UHF - Ультрависокі частоти (Ultra High Frequency)

VAL - Vertical Alert Limit (Вертикальний поріг тривоги)

VASI - Візуальна система індикації глісади (Visual Approach Slope Indicator)

VHF - Дуже високі частоти (Very High Frequency)

VNAV - Vertical Navigation (Вертикальне наведення)

VPL - Vertical Protection Level (Вертикальний захисний рівень)

WAAS - Wide Area Augmentation System (Система широкомасштабного функціонального доповнення)

ГЛОНАСС - глобальна навігаційна супутникова система

ЗПС - Злітно-посадкова смуга

ІКАО - Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO - International Civil Aviation Organization)

ВСТУП

Стрімкий розвиток галузі безпілотної авіації вимагає удосконалення технологій, що забезпечують безпечне функціонування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у повітряному просторі. Однією з ключових задач є розробка ефективних систем автоматичної посадки, здатних з високою точністю вивести БПЛА у задану точку приземлення.

Перспективним підходом для побудови систем посадки є використання навігаційних можливостей глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС). За рахунок точного визначення просторових координат на основі сигналів навігаційних супутників можна забезпечити необхідну навігаційну точність на етапах заходження на посадку та приземлення.

Актуальною науковою задачею є дослідження потенційної точності визначення місцеположення БПЛА при використанні різних комбінацій глобальних навігаційних систем та аналіз можливості досягнення необхідної точності посадки.

Метою даної роботи є розробка моделей системи автоматичної посадки важких безпілотних літальних апаратів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем.

У роботі проводиться аналіз сигналів зазначених систем, моделювання похибок визначення координат та порівняльний аналіз точності, досяжної за допомогою двох навігаційних рішень.

Результати дослідження дозволять обґрунтувати оптимальну конфігурацію глобальних навігаційних систем для забезпечення заданої точності автоматичної посадки безпілотних літальних апаратів.

РОЗДІЛ 1. СИСТЕМИ ПОСАДКИ НТОЛ

1.1 Система посадки ILS.

Система посадки за приладами (ILS) використовується понад 40 років. ILS, в даний час, є однією з найточніших систем заходу на посадку, яка регулярно використовується авіалайнерами у всьому світі. Система надає пілотам точну інформацію і вказівки з пілотування в горизонтальній і вертикальній площині для виконання заходу на посадку за приладами в складних метеорологічних умовах. ILS також дозволяє виконувати автоматичні посадки ПС.

ILS надає пілоту в кабіні екіпажу візуальну індикацію, яка дозволяє керувати літаком за заздальгідь визначеною глісадою і вздовж продовженої осьової лінії ЗПС до висоти прийняття рішення - DH/DA. На висоті прийняття рішення пілот приймає рішення про посадку, якщо у нього є необхідні візуальні орієнтири і досить простору для маневрування повітряного судна для безпечного приземлення, або він робить вихід на друге коло згідно з опублікованою процедурою.[15]

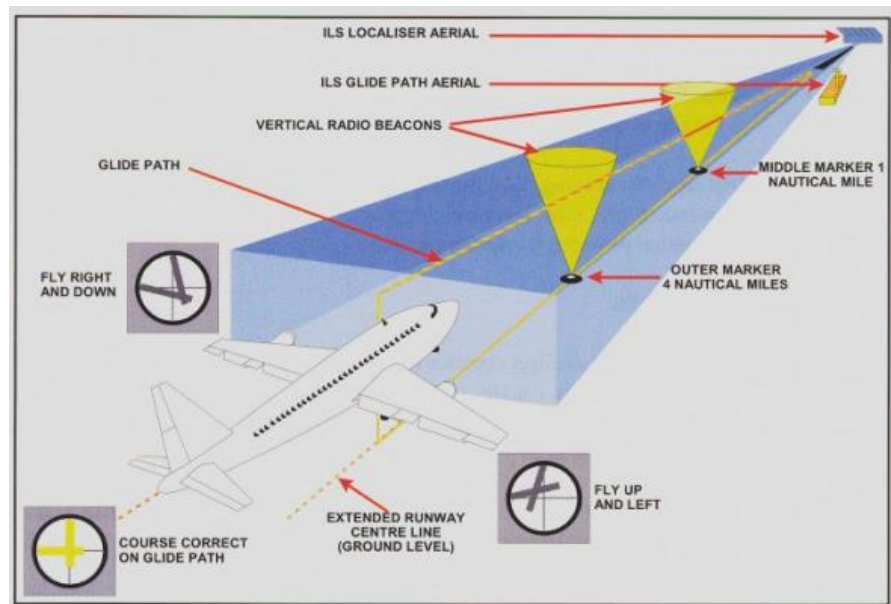


Рисунок 1.1 – Система посадки за приладами (ILS)

Компоненти системи ILS

Для роботи системи ILS необхідне відповідне наземне і бортове обладнання. Наземне обладнання складається з трьох компонентів, а саме: маяків Localiser (LLZ) і Glide path (GP) і маркерних маяків (Marker beacons).

Localiser (LLZ) працює в діапазоні частот Very High Frequency (VHF) і розташований приблизно 300 м від протилежного кінця ЗПС.

Glide path (GP) передавач працює на частоті Ultra High Frequency (UHF), яка пов'язана з Localiser. Він розташований 300 м в від порога і приблизно 200 м від краю злітно-посадкової смуги на траверзі точки приземлення.

Marker beacons працюють на частоті 75 МГц в діапазоні VHF. Система Marker beacons складається з зовнішнього маркера (OM), середнього маркера (MM) і можливо ближнього маркера (IM). Маркери дозволяють пілотові контролювати висоту польоту літака над контрольними точками глісади зниження.

У деяких країнах, на окремі аеродроми дозволені заходи на посадку зі зворотним курсом. Це дозволяє ПС зробити захід на посадку без застосування засобів точного заходу на посадку на протилежному «пеллостку» випромінювання передавача Localiser.

У окремі системи ILS може входити приводна радіостанція NDB, яка називається Locator (L) і розташована спільно з зовнішнім маркером LOM.

Устаткування вимірювання відстані (DME), яке пов'язане частотами з ILS, останнім часом все більше застосовується додатково, і дозволяє контролювати інформацію, яку надають маяки маркерів по витримуванню глісади зниження.

Частоти ILS

Localiser працює в діапазоні VHF на частотах між 108 і 111.975 МГц і забезпечує 40 каналів, e.g. 108.1 108.15; 108.3 108.35; 108.5 108.55–111.95 МГц. Ця частина частотної смуги розділена з VOR: частоти ILS мають непарне число в першій десятковій цифрі. [15]

Glide path працює в діапазоні UHF на частотах між 329,15 і 335 МГц і забезпечує 40 каналів, наприклад, 329.15, 329.3, 329.45, 329.6 - 335 МГц.

Маркери. Всі маркери працюють на одній частоті 75 МГц. Однак, немає ніякої інтерференційної проблеми, так як діаграми випромінювання маркерів є вузьким віялоподібним вертикальним променем.

Парні частоти. Частота GP пов'язана з частотою Localiser, і набір частоти GP є автоматичним. Частоти Localiser і Glide Path пов'язані відповідно до списку, виданого ІКАО, наприклад, 108.1 МГц пов'язана з 334.7 МГц, а 111.95 МГц пов'язана з 330.95 МГц.[15]

Переваги цього сполучення:

- а) один перемикач активує обидва приймача - це зменшує робоче навантаження пілота;
- б) вибір частоти зроблений легше і більш швидкий, оскільки існує тільки один варіант вибору для двох приймачів;
- в) потенціал для неправильного вибору частоти зменшується;
- г) необхідний лише один код для системи.

Зона дії ILS

а) Localiser - сектор зони дії повинен простягатися від передавача до відстаней:

- а) 25 n.m. (46.3 км) кут в межах плюс або мінус 10° від геометричної осі;
- б) 17 n.m. (31.5 км) кут між 10° і 35° від геометричної осі;
- в) 10 n.m. (18.5 км) кут в межах $\pm 35^\circ$, якщо страховий захист наданється.

Зазначені межі можуть бути зменшені до 18 nm для сектора 10° і 10 nm для решти покриття, коли альтернативні навігаційні засоби надають задовільний страховий захист в області проміжного етапу заходу на посадку.

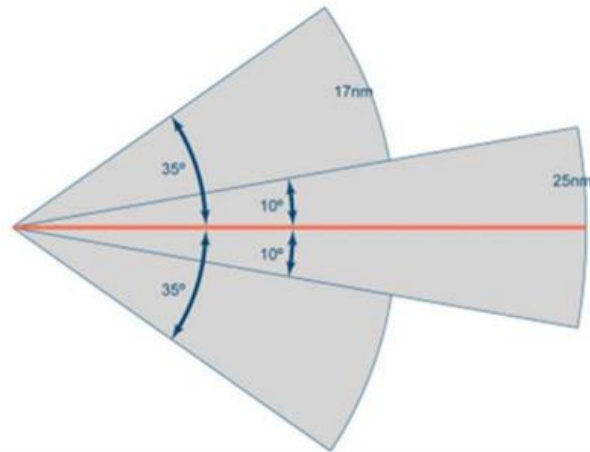


Рисунок 1.2 – Зони дії ILS Localiser

Glide Path - сектор зони дії повинен простягаться від передавача до відстані, принаймні: - 10 nm (18.5 км) в секторах 8° по азимуту з кожної сторони геометричної осі. Вертикальний страховий захист надано від $0,45\Theta$ до $1,75\Theta$ вище горизонталі, де α є заявленим кутом глісади (УНГ). Нижня межа може бути зменшений до $0,3 \Theta$ при необхідності для захисту заявленої процедури перетину точки глісади.

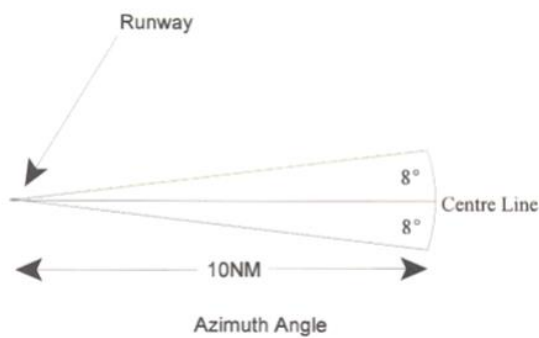


Figure 6.3b. Зона дії Glide Path.

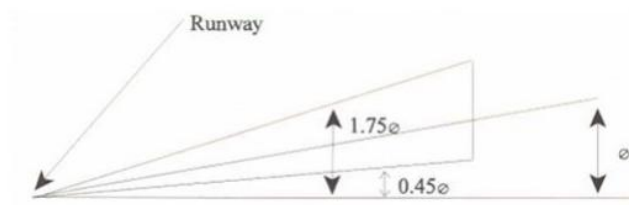


Рисунок 1.3 – Вертикальне покриття траєкторії глісади

Принцип роботи ILS.

LOCALISER

Антенна Localiser випромінює два пелюстки які перекриваються вздовж напрямку підходу - поздовжньої осі злітно-посадкової смуги (які створюють радіонавігаційне поле пеленга на - QDM). Пелюстки передаються на одній частоті VHF ILS. Щоб приймач літака ILS міг розрізнити пелюстки:

- а) правий пелюстка (синій сектор) має модуляцію на 150 Гц
- б) лівий пелюстка (жовтий сектор) має модуляцію на 90 Гц

Глибина модуляції збільшується при видаленні від геометричної осі (поздовжньої осі ЗПС), тобто амплітуда сигналу модуляції збільшується при видаленні від геометричної осі. Літак, що наближається до осі злітно-посадкової смуги праворуч, отримає більше сигналу на 150 Гц, ніж модуляція на 90 Гц. Ця різниця глибини модуляції (difference of depth in modulations - DDM), пропорційна куту відхилення літака від поздовжньої осі ЗПС, і подає сигнал на вертикальну планку індикатора ILS, яка покаже, що літак правіше і необхідно повернути вліво (Go Left).

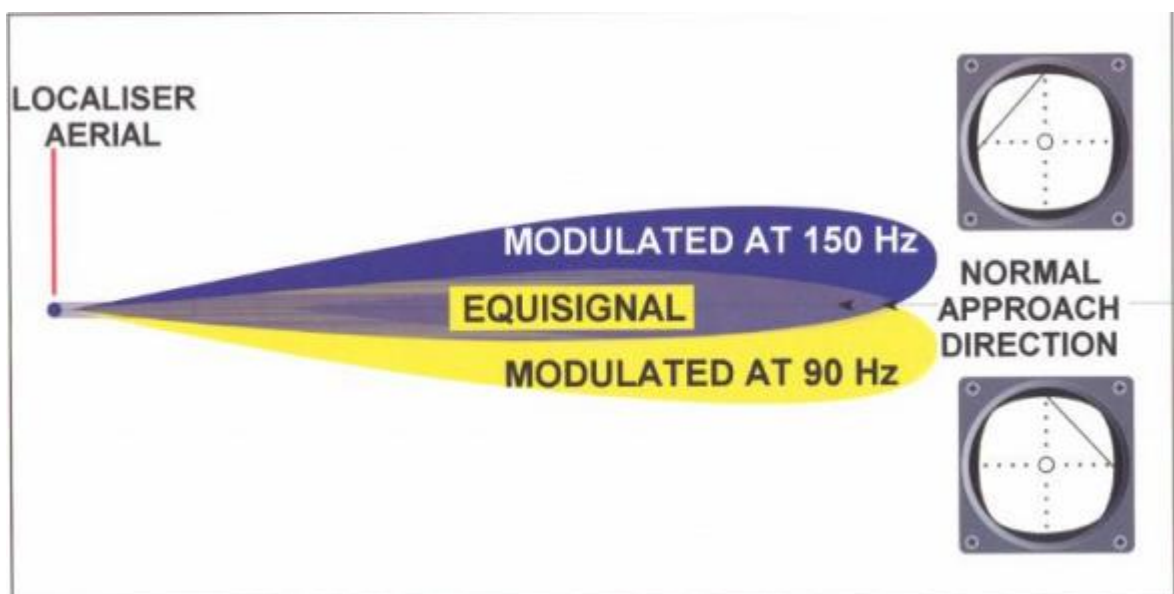


Рисунок 1.4 – Схема випромінювання локатора

Так само літак, що наближається до осі злітно-посадкової смуги зліва, отримає більше сигналу модуляції на 90 Гц, ніж модуляції на 150 Гц; DDM подає сигнал на вертикальну планку, яка покаже - Go Right.

Нульове значення DDM покаже на баланс між модуляціями, нульовим відхиленням планки - отже, літак знаходиться на продовженні поздовжньої осі злітно-посадкової смуги.

Зворотній курс ILS

Завжди існує деяке поле випромінювання позаду Localiser антени, таким чином, ці ознаки ILS можуть бути отримані бортовим обладнанням літака. Інформація зворотного курсу ILS може використовуватися в деяких країнах, якщо це дозволено САА, але в Сполученому Королівстві використання зворотного курсу ILS заборонено.

Зворотній курс ILS має наступні недостатки:

- а) Немає інформації про глисаду,
- б) Захід на посадку менш точний, ніж з основним курсом ILS.
- в) Планка CDI (Localiser) дає інформацію зі зворотним значенням відхилень, при польоті до ЗПС (RW).
- г) Зазвичай, немає ніяких маркерів для перевірки глісади зниження

GLIDESLOPE

Glideslope UHF передавач розташований на одній зі сторін від ВПП, приблизно, в 200 м від осі ЗПС і 300 м від порога ЗПС в сторону КТА. Для створення траєкторії глісади використовується той же принцип передачі сигналів, що і в Localiser, але використовується несуча частота UHF а пелюстки розташовані у вертикальній площині. Верхній пелюстка (великий пелюстка) має модуляцію на 90 Гц, а нижній пелюстка (маленький пелюстка) має модуляцію на 150 Гц.

Глісада, зазвичай 3° (ІКАО рекомендує УНГ $2^\circ - 4^\circ$), визначається, там, де DDM перекриття пелюсток є нульовою, і планка глісади індикатора ILS вказує нульове відхилення. Зразок випромінювання показаний на малюнку 5.

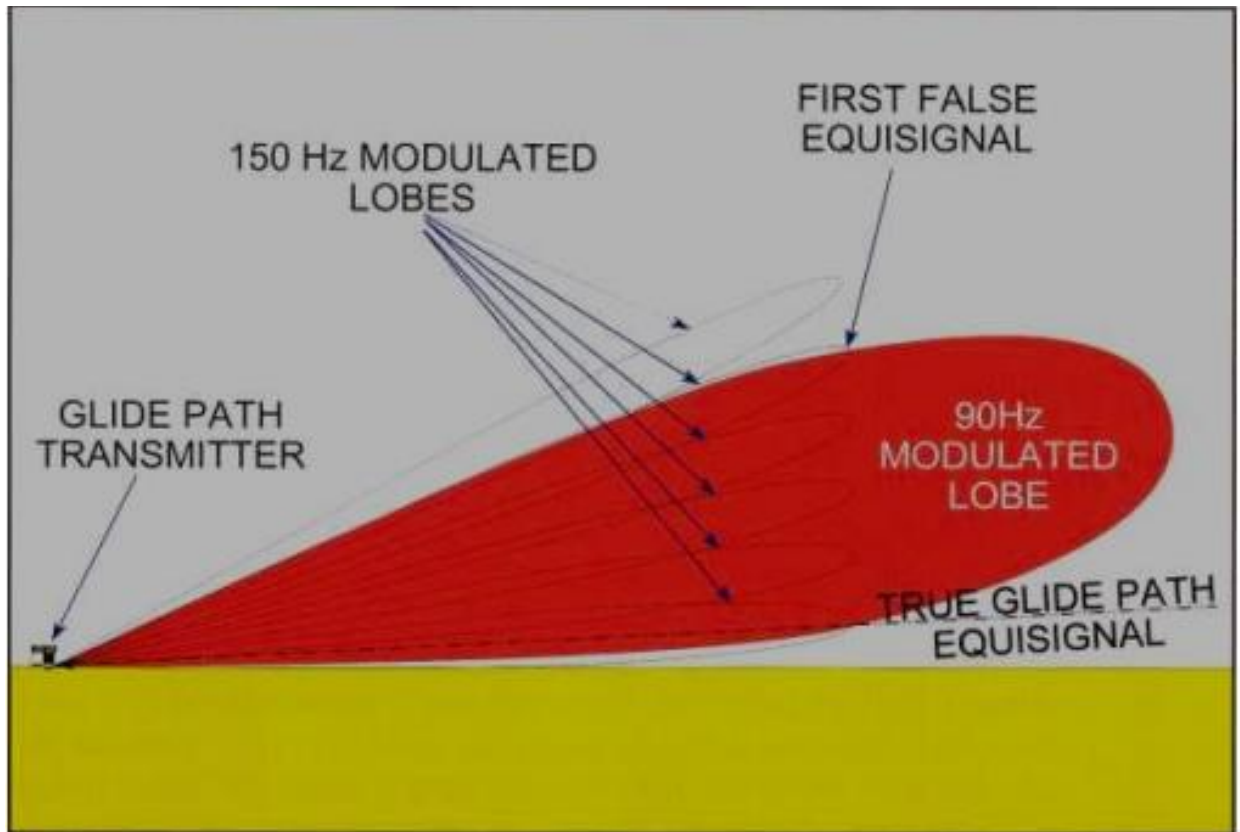


Рисунок 1.5 – Схема випромінювання на траєкторії глісади

1.2 Система посадки MLS.

MLS було розроблено в минулому столітті для заміни ILS, як систему з підвищеною точністю, без недоліків ILS, з великою гнучкістю застосування і наявністю додаткового каналу передачі інформації земля-повітря. Однак наразі використовується тільки кілька систем MLS і, ймовірно, ще довгий час MLS буде співіснувати з ILS.[3]

Недоліки ILS:

- а) ILS має вузьку єдину траєкторію заходу на посадку;
- б) доступно тільки сорок каналів;
- в) сигнали, особливо глісади, чутливі до підстильної поверхні;
- г) ILS може створювати тільки один кут нахилу глісади,

У 1978 році Аеронавігаційна комісія ІКАО провела оцінку чотирьох систем заходу на посадку для оцінки можливості заміни ILS. Система, яку було обрано для заміни ILS, мала американський дизайн і була спочатку відома як Скануючий промінь із прив'язкою за часом - Time Referenced Scanning Beam (TRSB). В даний час ця система відома як - мікрохвильова система посадки (MLS). Але, до сих пір ILS залишається основним стандартом інструментального засобу заходу на посадку ІКАО.

MLS пропонує такі переваги в порівнянні з ILS:

- а) система не схильна до проблем розміщення (мінімальний вплив будівель, місцевості тощо), які притаманні ILS.
- б) усуваються проблеми перешкод у радіомовленні ILS/FM;
- в) забезпечується всепогодне покриття сигналом до $\pm 60^\circ$ від осьової лінії ЗПС по горизонталі за горизонталі, і від $0,9^\circ$ до 15° по вертикалі на відстані до 20 морських миль;
- г) здатність забезпечувати точне управління заходом на посадку для невеликих посадкових майданчиків, таких як дах, для вертодромів;
- д) постійна доступність широкого спектра глісад для використання;
- е) розміщення як сегментованих, так і вигнутих підходів;
- ж) доступність 200 каналів - у п'ять разів більше, ніж ILS;
- з) потенційне зниження мінімумів заходу на посадку;
- и) поліпшення якості наведення за меншої кількості необхідних корекцій траєкторії польоту;
- к) забезпечення зворотного азимута для missed approaches і вказівки щодо вильоту;
- л) усунення перерв в обслуговуванні, викликаних накопиченням снігу; а також
- м) зниження витрат на підготовку, ремонт і технічне обслуговування.

Як і ILS, система заснована на наземних передавачах, що випромінюють інформацію, яку потім розшифровує приймач ПС. Різниця між ILS і MLS полягає в тому, що в MLS приймач розраховує кути, як за азимутом, так і за висотою, вимірюючи часовий інтервал між послідовними проходами вузьких (віялоподібних) випромінюваних променів. Поділ відбувається завдяки точності, яку забезпечує обладнання DME, що робить непотрібними маркерні маяки. [3]

Система може бути розділена на п'ять функцій:

- (а) азимут підходу;
- (б) зворотний азимут;
- (с) висота заходу на посадку (глісада);
- (г) дальність польоту; а також
- (е) передача даних (Спеціальна інформація)

За винятком DME, усі сигнали MLS передаються на одній частоті, використовуючи спільний часовий поділ. Двісті каналів доступні між 5031 і 5090,7 МГц. Передаючи вузький промінь, що проходить через зону покриття з фіксованою швидкістю сканування, як за азимутом, так і за висотою, траєкторія може бути розрахована бортовим приймачем, який вимірює часовий інтервал між розгортками. Для пілота, презентація інформації MLS буде схожа на ILS з використанням стандартного обладнання - CDI або багатофункціонального дисплея. [16]

Підхід за азимутом

Азимутальна антена забезпечує бічне наведення під час заходу на посадку.

Азимутальна станція (AZ) дає зону покриття, що поширюється на 40° по обидва боки від осьової лінії ЗПС зі сторони від осьової лінії ЗПС із запланованим варіантом до 60° по обидва боки від

центральної лінії та на дальності до 20 nm. Азимутальне покриття показано нам рисунку 1.6

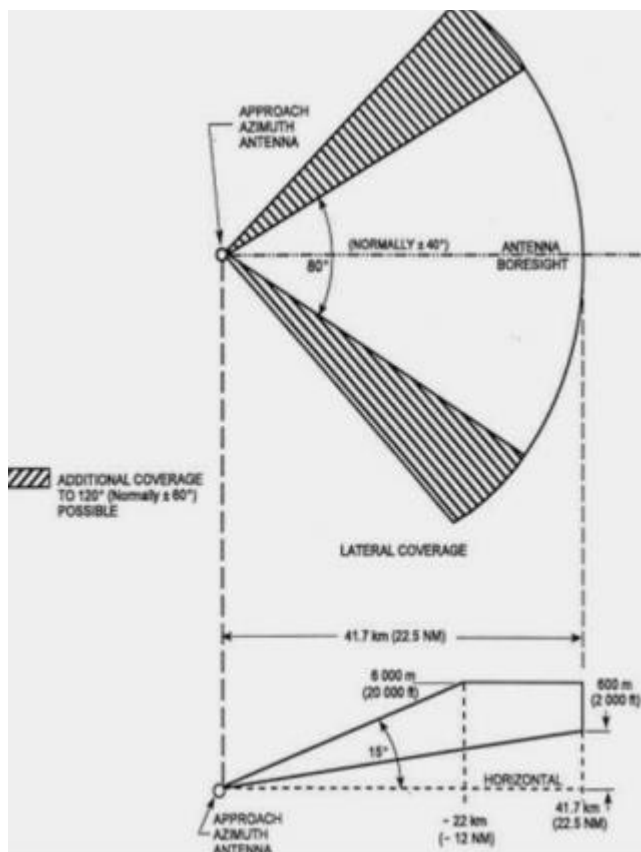


Рисунок 1.6 – Азимутальне покриття

Зворотне азимутальне наведення

Задня азимутальна антена, якщо вона присутня, дає наведення за курсом для невеликого заходу на посадку і літаків, що вилітають. Передавач зворотного сигналу по суті такий самий, як і передавач азимута підходу. Проте обладнання працює з дещо нижчою швидкістю передачі даних, тому що вимоги щодо точності не такі суворі, як під час заходу на посадку. Обладнання працює на частоті, яка збігається з частотою азимута заходу на посадку, але в інший час і в іншій послідовності передачі. На злітно-посадковій смузі з підходами по MLS з обох напрямків, обладнання азимута може перемикатися від "Операції підходу" за азимутом до "Зворотного азимута" і навпаки. Обладнання MLS для двох напрямків матиме окремий DME/ P і TX піднесення (див. далі) для кожного напрямку роботи; тільки один DME/P і TX піднесення можуть працювати в один період часу. У разі необхідності ліворуч і праворуч покриття може бути асиметричним. Покриття зворотного азимута показано на рисунку 1.7

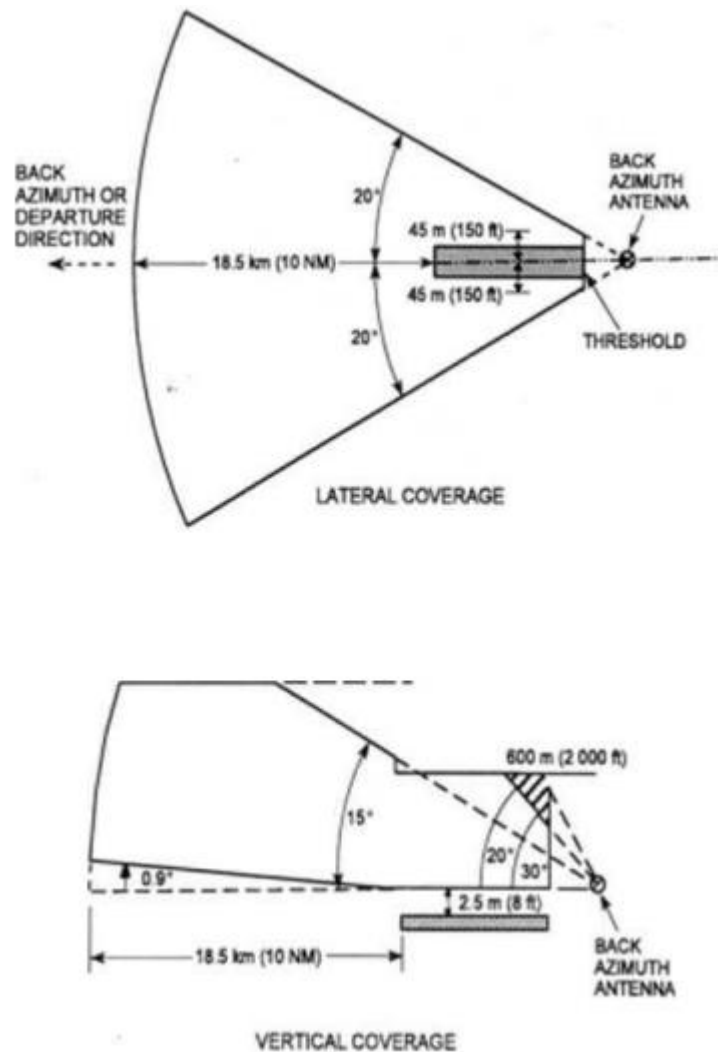


Рисунок 1.7 – Покриття зворотного азимуту

Управління за висотою польоту.

Станція перевищення (EL) або глісадний маяк передає сигнали на тій самій частоті, що й азимутальна станція. Станція перевищення забезпечує широкий діапазон кутів нахилу глісади. Кут глісади, який потрібен для заходу на посадку конкретного літака, вибирається пілотом. Покриття сигналу EL розширюється на зону охоплення AZ, і, таким чином, забезпечує точне наведення глісади у всіх точках, де керівництво за азимутом є доступним. На малюнку 1.8 нижче показано покриття станції перевищення EL.[11]

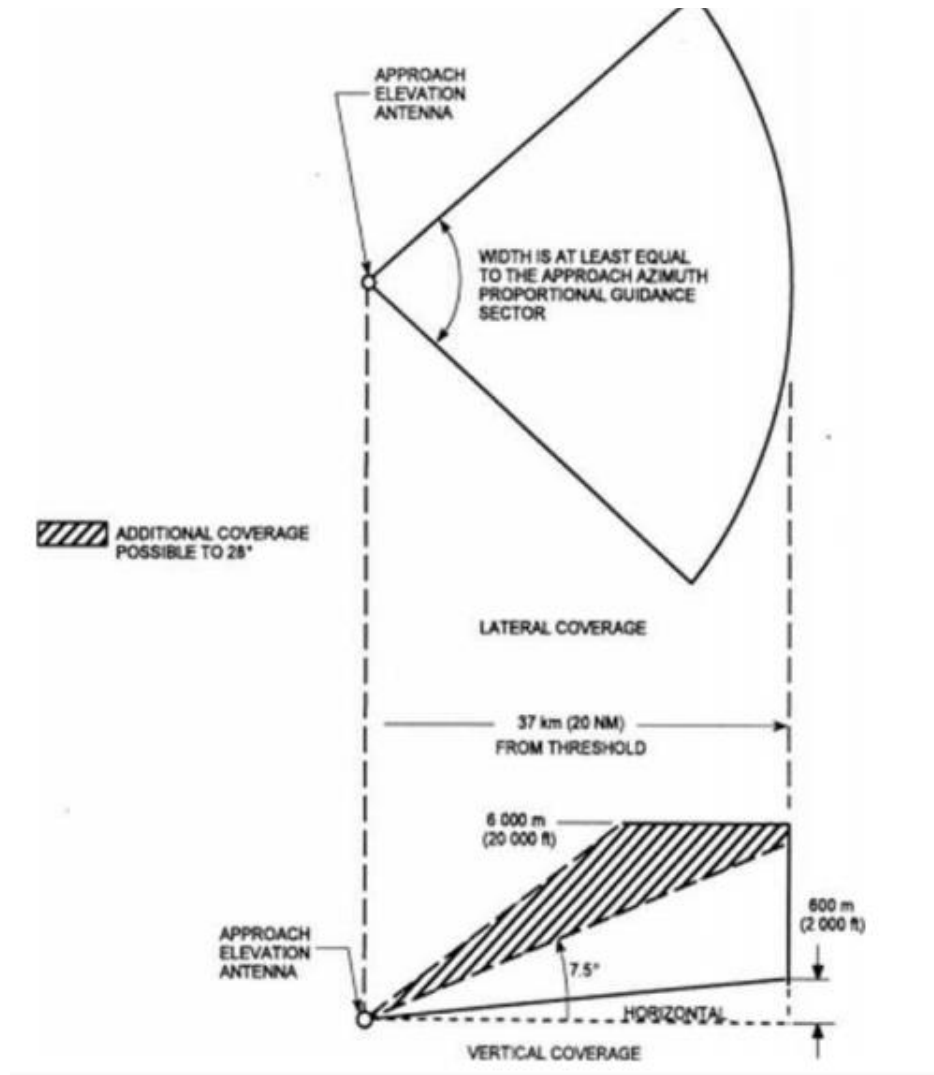


Рисунок 1.8 – Покриття станції перевищення EL

Навігація за дальністю

Точний DME (DME / P), забезпечує безперервну інформацію про дальність до 22 nm. всеспрямовано. Точність становить близько ± 100 футів для кінцевого етапу заходу на посадку. Принцип роботи такий самий, як і звичайного DME, але оскільки нові частотні розподіли недоступні, можливість 200 каналів було забезпечено шляхом сполучення з наявним обладнанням ILS і застосування розширеного діапазону відстаней між імпульсами.

Кутовий вимір станції AZ (відхилення від курсу)

Принцип вимірювання кутів за азимутом показано на малюнку 1.9.

Азимутальний сигнал являє собою вузький вертикальний віялоподібний промінь, який сканує вперед і назад зону покриття. Під час погляду з боку заходу на посадку, промінь починає рівномірно рухатися зліва направо з постійною кутовою швидкістю. Це відомо як сканування "TO". Після короткого періоду, відомого, як захисний час, промінь повертається в початкову точку, і це називається "FRO" сканування (отримано з 'to and from'). Таким чином, протягом повного циклу сканування променями TO і FRO, два імпульси будуть прийняті літаком, і цей точно визначений інтервал часу між двома імпульсами, буде пропорційним кутовому положенню (за азимутом) літака. Швидкість сканування 13,5 циклів сканування на секунду. Очевидно, що для розшифровки результатів сканування потрібне точне знання часу, і додаткова інформація, відома як інформація преамбули, яка містить ключову інформацію про опорний час коду приймача і код ідентифікації функції[16].

На рисунку 1.9 ПС розташована ліворуч від осьової лінії ЗПС, Цьому положенню ПС відповідає певний інтервал часу між проходами променів TO і FRO через літак. На малюнку 1.10, де літак розташований праворуч від осьової лінії, часовий інтервал між проходженням променя TO і променя FRO значно менший.

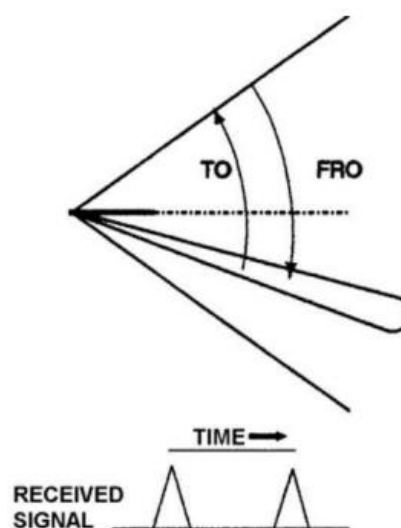


Рисунок 1.9 – ПС розташований ліворуч від осьової лінії ЗПС

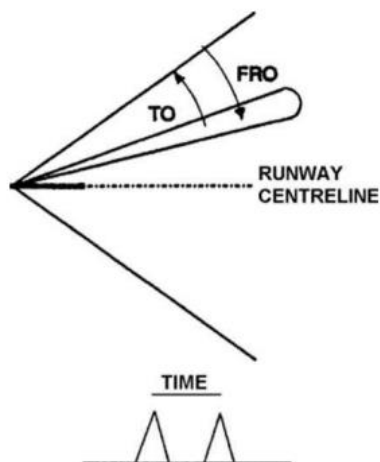


Рисунок 1.10 – ПС розташований праворуч від осьової лінії ЗПС\

Отже, можна зробити висновок, що максимальний інтервал часу між проходженням променів TO і FRO буде вимірюватися, коли літак перебуває на крайньому лівому краю зони покриття і мінімальний час, коли літак перебуває на крайньому правому краю зони покриття.

Вимірний час інтервалу представляє кутове положення, отже, зміщення від центральної лінії. Ця інформація подається на CDI або аналогічний дисплей MLS.

1.3 Система посадки VASI/PAPI

Перша система візуальної індикації глісади під назвою VASI була створена у США в 1947 році. Вона являла собою два ряди ламп, що випромінювали світло під кутом для позначення оптимальної траєкторії заходження на посадку. З 1970-х років почала використовуватися вдосконалена система PAPI (Precision Approach Path Indicator). Вона мала 4 лампи замість 2 і дозволяла точніше контролювати глісаду. З часом системи VASI/PAPI поширилися по всьому світу і стали стандартним обладнанням аеродромів.[17]

Сучасні системи використовують LED-лампи, що мають вищу надійність.

Візуальний індикатор ухилу при заході на посадку - це система, що складається з чотирьох світлових приладів, розташованих на лівій стороні ЗПС у

вигляді двох смуг крила, які називаються навітряною та підвітряною смугами крила. Літак знаходиться під нахилом, якщо навітряна смуга світиться червоним кольором, а навітряна - білим, занадто високо, якщо обидві смуги світяться білим кольором, і занадто низько, якщо обидві смуги світяться червоним кольором. Деякі аеродроми, що обслуговують великі літаки, мають три смуги VASIS, які забезпечують дві візуальні траєкторії ковзання (GP) на одній злітно-посадковій смузі.

Основними системами, що використовуються, є наступні:

AT-VASIS: скорочена система візуального індикатора ухилу при заході на посадку

T-VASIS: система візуального індикатора ухилу ЗПС, яка може бути встановлена врівень з поверхнею покриття ЗПС для забезпечення керівництва заходом на посадку на цю ЗПС. Система T-VASIS охоплює велику площу по обидва боки осьової лінії ЗПС, простягаючись вздовж неї від порога ЗПС на відстань приблизно 500 метрів.

РАРІ: індикатор траєкторії точного заходження на посадку

АРАРІ: скорочений індикатор точного заходження на посадку



Рисунок 1.11 – РАРІ можна побачити праворуч від ЗПС.

Точний індикатор шляху заходження на посадку (РАРІ) використовує вогні, подібні до системи VASI, за винятком того, що вони встановлюються у вигляді чотирьох вогнів в один ряд, як правило, на лівій стороні ЗПС. Однак, залежно від конфігурації злітно-посадкової смуги/руліжної доріжки, РАРІ може бути розташований праворуч, як показано на малюнку вище. Літак знаходиться на відповідній траєкторії глісади, коли два з вогнів червоні і два білі. Три червоні вогники вказують на те, що літак знаходиться нижче, а чотири червоні вогники вказують на те, що літак знаходиться значно нижче номінальної траєкторії польоту. І навпаки, три білі вогники вказують на те, що літак знаходиться вище, а чотири білі вогники вказують на те, що літак знаходиться значно вище траєкторії польоту. Існують й інші, менш поширені системи індикаторів нахилу схилу.

Триколірна система складається з одного світлового приладу, який проектує триколірний візуальний шлях наближення. Нижче глісади - червоним, на глісаді - зеленим, а вище глісади - жовтим кольором. При зниженні нижче глісади з'являється невелика ділянка темно-жовтого кольору. Пілоти не повинні плутати цю ділянку з індикатором "над глісади".

Пульсуючі візуальні індикатори ухилу ЗПС зазвичай складаються з одного світлового приладу, який проектує двоколірну візуальну траєкторію заходження на посадку на ЗПС, на якій встановлено індикатор, на кінцеву зону заходження на посадку. Індикатор на траєкторії заходження на посадку світиться постійним білим світлом. Індикація "трохи нижче глісади" - це постійне червоне світло. Якщо літак опускається нижче глісади, червоне світло починає пульсувати. Індикатор вище глісади - це пульсуюче біле світло. Частота пульсації збільшується, коли літак опускається нижче або вище бажаної глибини глісади. Корисний радіус дії цих систем становить близько чотирьох миль вдень і до десяти миль вночі.

Мінімальна висота РАРІ (висота над порогом) залежить від конкретної установки. Універсального значення не існує, і на різних злітно-посадкових

смугах воно може відрізнитися. Типове значення, можливо, становить 50–60 футів. Найнижча точка, де сигнал PARІ є корисним, називається МЕНТ (мінімальна висота польоту очей над порогом) і включається в АІР для конкретної ЗПС. Заявлена МЕНТ робить припущення щодо положення очей пілота і антени ІLS літака, яке, звичайно, варіюється від одного типу літака до іншого. У більшості випадків PARІ можна використовувати майже до самого приземлення, але в деяких державах можуть існувати правила щодо їх вимкнення, якщо стея або RVR опускається нижче певного рівня, і в цьому випадку PARІ може використовуватися, але не бути доступним.[17].

1.4 Радіолокатор точного заходу на посадку (PAR)

Радіолокатори точного заходження на посадку (РІС) використовуються авіадиспетчерами для надання вказівок пілотам під час остаточного заходження на посадку за допомогою радіосигналу. Це прецизійне заходження на посадку, подібне до заходження на посадку ІLS.

Перевага PAR полягає в тому, що вони не вимагають жодного бортового обладнання. Однак, оскільки ІLS є частиною стандартного обладнання літака (разом з УКХ-радіостанцією і VOR), ця перевага стає все менш і менш значущою. З іншого боку, використання PAR призводить до збільшення навантаження на диспетчера і перевантаження частот (див. розділ "Фразеологія" нижче). Тому, займаючись забезпеченням точного підходу, регулятор не повинен нести відповідальність за будь-які інші обов'язки. Це призводить до низької пропускної спроможності системи ОрПР і, як наслідок, використання PAR в цивільній авіації постійно зменшується. Однак для військової авіації він відіграє певну роль, оскільки його важче виявити ракетами, ніж ІLS.

PAR використовує принципи роботи первинного радіолокатора - антена випромінює імпульси, які відбиваються від літака, і, приймаючи ці відлуння, визначаються відстань і азимут. Проте PAR має кілька специфічних особливостей:

а) він набагато точніший, ніж спостережний PSR. Це необхідно через його призначення і досягається за рахунок більш високої несучої частоти (порядку 10 ГГц порівняно, наприклад, з 3 ГГц для термінального PSR), що дозволяє вузький промінь.

б) визначає положення літака в 3D (тобто відстань до місця приземлення, положення ліворуч/праворуч від центральної лінії подовженої злітно-посадкової смуги та вище/нижче глісади). У старих системах це досягається додаванням другої (вертикальної) антени, яка забезпечує вимірювання відстані та кута нахилу (див. малюнок нижче). Ці дані використовуються для розрахунку геометричної висоти літака. Існують також більш складні варіанти. У них використовуються антенні решітки з електронним керуванням променем, що означає меншу кількість (або відсутність) рухомих частин.

в) він має вищу швидкість оновлення. У той час як антена термінального радара зазвичай обертається зі швидкістю 10-12 об/хв, PAR охоплює лише сектор близько 20 градусів (між 10 ліворуч від центральної лінії і 10 праворуч) і тому оновлює координати цілі частіше.



Рисунок 1.12 – Приклад PAR-антен.

Горизонтальна розгортається вліво і вправо і забезпечує відстань і азимут. Вертикальна антена розгортається вгору і вниз і визначає висоту, використовуючи кут підйому антени і відстань до цілі

Диспетчер заходу на посадку бачить тривимірне зображення положення літака, яке складається з двох зображень - плоского і вертикального розрізу (див. малюнок нижче). Диспетчер порівнює положення і висоту літака з необхідними і через короткі проміжки часу надає зворотний зв'язок екіпажу.

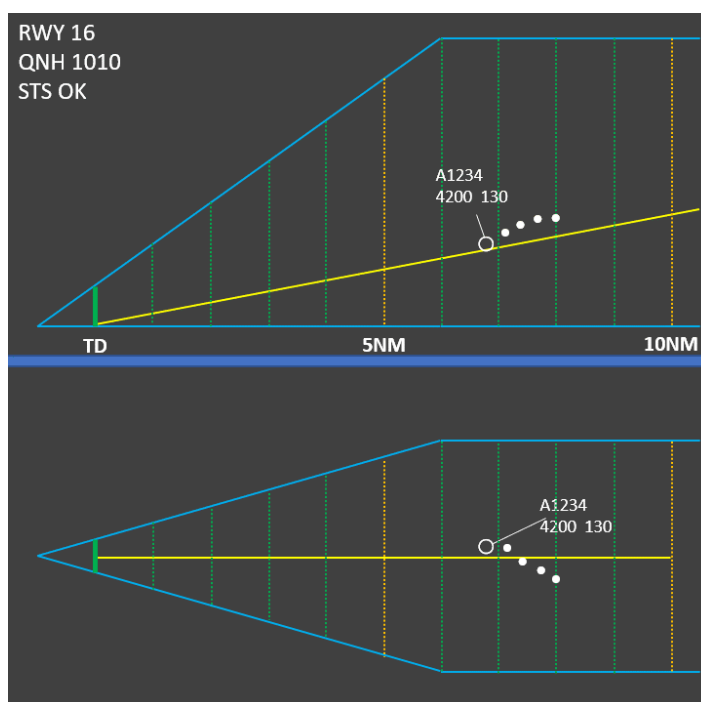


Рисунок 1.13 – Приклад зображення, яке бачить диспетчер на підході.

Примітка: зображення є загальним і може відрізнятися від системи до системи

Для того, щоб надавати послуги з використанням PAR, диспетчер підходу повинен мати схвалення PAR до свого рейтингу APS (диспетчерський нагляд за підходом).

1.5 Вибір напрямку дослідження

Вище було розглянуто традиційні системи посадки, які широко застосовуються в цивільній авіації і можуть бути використані і для безпілотних літальних апаратів. Доцільно дослідити питання застосування глобальних

навігаційних супутникових систем для посадки у зв'язку з їх інтенсивним розвитком. У зв'язку з цим у магістерській роботі досліджуються такі питання:

а) які існують методи і вимоги до них при посадці по сигналам глобальних навігаційних супутникових систем

б) які характеристики точності, цілісності, безперервності обслуговування та експлуатаційної готовності SBAS.

в) експериментальне дослідження моделі системи посадки

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У першому розділі детально проаналізовано роботу системи посадки за приладами ILS, яка дозволяє з високою точністю виконувати заходи на посадку за приладами в складних метеоумовах. Розглянуто принцип формування радіонавігаційного поля за допомогою перекриття двох випромінюваних пелюсток, що модулюються різними частотами. Показано, як вимірювання різниці глибин модуляції дозволяє визначити положення повітряного судна відносно осі ЗПС.

Проаналізовано також перспективну систему MLS, яка пропонує значні переваги порівняно з ILS, зокрема кращу завадостійкість, гнучкість траєкторій заходження і більшу кількість доступних каналів. Показано, як в MLS використовується вимірювання інтервалів між послідовними проходами вузькоспрямованого променя для визначення кутового положення літака.

Окрім радіонавігаційних систем, розглянуто візуальні індикатори глісади VASI/PAPI, що дають пілотам змогу контролювати дотримання оптимальної траєкторії за допомогою кольорових вогнів. Проаналізовано систему PAR, котра використовується для радіолокаційного наведення літаків диспетчером підходу.

Отже, у розділі досліджено можливості та принципи функціонування основних наземних систем, призначених для забезпечення безпечних та ефективних заходів на посадку за приладами в умовах обмеженої видимості, вибрані основні напрями дослідження.

РОЗДІЛ 2. ПОСАДКА ПО СИГНАЛАМ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ

2.1 Вимоги до супутникових навігаційних систем при посадці

GNSS забезпечує визначення місця розташування і часу на повітряному судні.

Навігаційне обслуговування GNSS забезпечується за допомогою різних комбінацій наступних елементів, встановлених на землі, або супутниках та/або на борту ПС:[1]

- а) глобальна система визначення місця розташування (GPS), яка забезпечує службу стандартного визначення місця розташування (SPS),
- б) глобальна навігаційна супутникова система (ГЛОНАСС), яка забезпечує канал стандартної точності (CSA),
- в) бортова система функціонального доповнення (ABAS),
- г) супутникова система функціонального доповнення (SBAS).
- д) наземна система функціонального доповнення (GBAS).
- е) наземна регіональна система функціонального доповнення (GRAS).
- ж) бортовий приймач GNSS.

Технічні вимоги до елементів GNSS [12]:

Точність визначення місця розташування: помилки служби стандартного визначення місця розташування (SPS) системи GPS не перевищують такі межі вказані в таблиці 2.1

Точність передачі часу. Помилки під час передавання даних часу в службі SPS системи GPS не перевищують 40 нс для 95 % часу.

Точність визначення параметрів дальності. Помилки параметрів дальності не перевищують такі межі:

- а) помилка за дальністю будь-якого супутника - 30 м (100 фут)

- б) відповідна 95-му перцентилю помилка швидкості зміни дальності будь-якого супутника 0,006 м (0,02 фут)/с (глобальне середнє);
- в) відповідна 95-му перцентилю помилка прискорення зміни дальності будь-якого супутника 0,002 м (0,006 фут)/с² (глобальне середнє);
- г) відповідна 95-му перцентилю помилка за дальністю для будь-яких супутників протягом усіх часових інтервалів між моментом формування даних і моментом використання даних 7,8 м (26 фут) (глобальне середнє).

Таблиця 2.1

Межі помилок SPS

	Глобальне середнє для 95% часу	Найгірше значення для 95% часу
Помилка визначення місця розташування у горизонтальній площині	9 м (30 фут)	17 м (56 фут)
Помилка по вертикалі	15 м (49 фут)	37 (121 фут)

Експлуатаційна готовність. Експлуатаційна готовність служби SPS системи GPS становить:[12]

- а) ≥ 99 % для обслуговування в горизонтальній площині та середнього місця розташування (95 %-ве порогове значення 17 м);
- б) ≥ 99 % для обслуговування у вертикальній площині та середнього місця розташування (95 %-ве порогове значення 37 м);
- в) ≥ 90 % для обслуговування в горизонтальній площині та найгіршого випадку розташування (95 %-ве порогове значення 17 м);
- г) ≥ 90 % для обслуговування у вертикальній площині та найгіршого випадку розташування (95 %-ве порогове значення 37 м).

Надійність. Надійність служби SPS системи GPS відповідає таким обмеженням:

- а) надійність - не менше ніж 99,94 % (глобальне середнє);
- б) надійність - щонайменше 99,79 % (середнє для окремого пункту в найгіршому випадку).

Імовірність відмови основного обслуговування. Імовірність того, що похибка вимірювання дальності користувача (URE) за допомогою будь-якого супутника перевищить у 4,42 раза передану супутником верхню межу точності вимірювання дальності користувача (URA) і водночас упродовж 10 с на антену приймача користувача не надійде застережливого сигналу, не перевищує 1×10^{-5} на годину.

2.2 Посадка по сигналам космічних функціональних доповнень

Супутникова система доповнення (SBAS) - це диференціальна система доповнення сигналу Глобальної навігаційної супутникової системи, яка використовує низку геостаціонарних супутників, здатних покривати великі території, для трансляції первинних даних ГНСС, які забезпечуються інформацією про дальність, цілісність і корекцію, отриманою від мережі наземних станцій SBAS. Хоча основною метою SBAS є забезпечення цілісності даних, використання системи також підвищує точність і зменшує похибки визначення місцеположення до менш ніж 1 метра.

Європейська служба геостаціонарного навігаційного покриття (EGNOS) є європейською версією цієї системи, а широкомасштабна система доповнення (WAAS) - американським еквівалентом. Остання була введена в експлуатацію першою - у 2003 році - і зараз охоплює континентальну частину США, а також Канаду, Аляску і Мексику. Понад тисяча північноамериканських аеропортів зараз мають інструментальні заходження на посадку, які залежать від WAAS. Японія розробила багатофункціональну супутникову систему доповнення (MSAS) для

забезпечення функціональності SBAS. Індія запустила власну програму SBAS, а Корея і Китай оголосили про плани розпочати реалізацію власних програм SBAS.

SBAS використовує широкомасштабну DGPS (WADGPS), реалізовану за допомогою широкого розширення області дії системи (WAAS). Наразі функціонують чотири системи:

а) European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS) (Європейська геостационарна навігаційна система накладання, оголошена в експлуатації в липні 2004 р.

б) WAAS США, оголошена оперативною у липні 2003 року.

в) Japanese Multifunctional Transport Satellite Augmentation System, (MSAS) (Японська багатофункціональна супутникова транспортна система розширення.

г) Indian Geo and GPS Augmented Navigation (GAGAN) (Індійська гео та GPS - розширена навігація (GAGAN).

Цілі цих систем більш - менш однакові, щоб забезпечити моніторинг цілісності та покращення позицій літаків, що експлуатуються на значній території. Методи реалізації дещо відрізняються між системами, але кінцевий результат для користувача буде таким самим (тобто буде повна сумісність між системами). Обговорення WADGPS буде зосереджено на прикладі EGNOS, але ті ж принципи застосовуються до всіх SBAS.

SBAS складається з 3 сегментів:

Космічний сегмент, до складу якого входять сузір'я GPS та ГЛОНАСС, а також геостационарні SV.

Геостационарні SV мають орбітальний період 24 години і зустрічаються лише в екваторіальному поясі та обертається на висоті 35 800 км

Наземний сегмент включає:

- а) контрольні станції (RS);
- б) регіональні станції управління (RCS); та
- в) головну станцію управління (MCS); або
- г) навігаційну земну станцію (NES).

До сегменту користувачів входять всі, хто користується послугою. RS встановлені в межах регіону для вимірювання точності даних SV та визначення іоносферного та тропосферного впливу на передачі SV. Як і в LAAS, RS має точно визначену зону дії, що містить GPS - приймач і точний атомний годинник. Кожна RS пов'язана з RCS. RCS, у свою чергу, буде пов'язана з MCS (або NES).

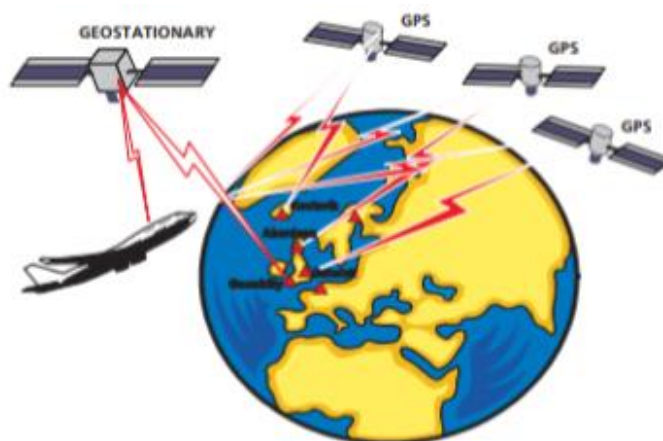


Рисунок 2.1 – Склад системи SBAS

RS визначають своє положення GPS за даними SV. RS, знає свою власну позицію, отримує ефемериди SV, час годинника та будь – які виправлення помилок годинника, обчислює справжнє положення та час SV та визначає похибку відстані для кожного SV. Вона також визначає, чи є значні помилки, які роблять будь - яку інформацію SV непридатною для використання, таким чином забезпечується перевірка цілісності системи. Похибка відстані не суттєво змінюється на значному діапазоні (400+ км), за рахунок ефектів іоносферного та тропосферного поширення. [7]

Дані, щодо помилок SV та оцінки цілісності, надсилаються через RCS до MCS (що розташований у NATS) у Гатвіку, де вони відформатовуються для використання відповідно обладнаними приймачами GPS. Після цього дані надсилаються до Goonhilly Down, для форматування та трансляції у Східній Атлантиці та Індійському океані, інформаційними каналами навігації геостационарних СВ INMARSAT. Приймачі GPS включають введення даних у розрахунки чим досягається як покращення положення, так і попередження про несправності.

Хоча точність GPS значно підвищиться за допомогою WADGPS, однак малоймовірно що буде досягнута точність, необхідна для операцій заходу на посадку по I категорії ІКАО. В осяжному майбутньому для операцій заходу на посадку доцільно використовувати LAAS. З використанням WADGPS найкраща висота прийняття рішення, яка досягнута на сьогоднішній день становить близько 300 футів, і це навряд чи буде покращено найближчим часом.

WAAS (Wide Area Augmentation System)

Wide Area підсилювальні (розширювальні) системи (WAAS) призначені для розширення (збільшення) сфери застосування системи глобального позиціонування (GPS), за рахунок підвищення її точності, цілісності та доступності. Система розроблена FAA USA (Федеральним управлінням цивільної авіації США). По суті, WAAS призначена для того, щоб повітряне судно могло покладатися на інформацію GPS на всіх етапах польоту, включно з точними заходами на посадку в будь-якому аеропорту в межах своєї зони покриття. Результати позиціонування можна додатково поліпшити за допомогою Local Area Augmentation (LAAS) локальної системи розширення, також відомої під переважним терміном ІКАО Наземна система розширення (GBAS) в критичних областях.

Склад WAAS:[2] WRS - станції, що отримують сигнали GPS; WMS - станції, обчислюють поправки; GUS - станції, що передають поправки супутникам; супутники GPS і WAAS; супутники GPS; літаки з приймачами GPS і WAAS.

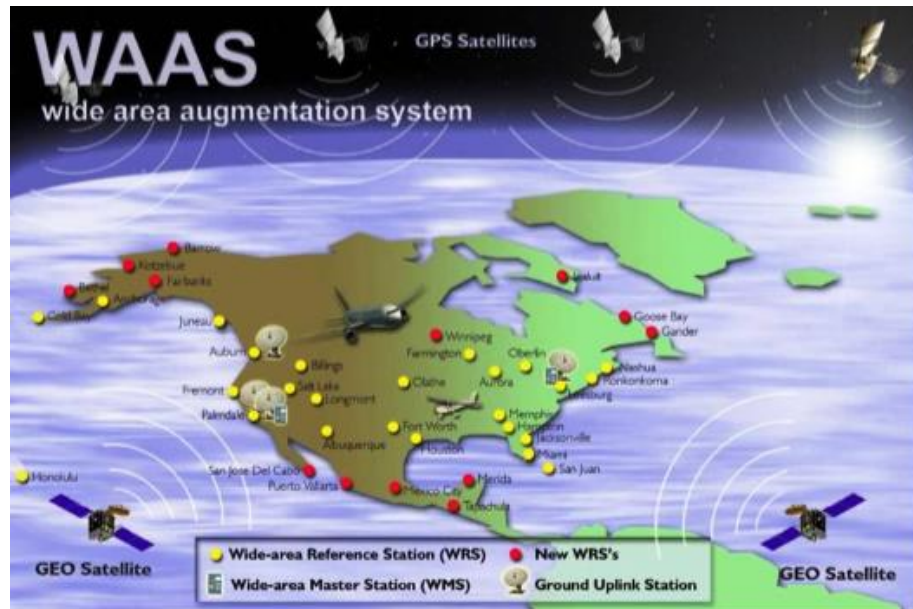


Рисунок 2.2 – Склад системи WAAS

Принцип дії

WAAS використовує мережу наземних опорних станцій (WRS) у Північній Америці та на Гаваях для вимірювання невеликих варіацій сигналів супутників GPS у західній півкулі. Вимірювання від опорних станцій направляються на головні станції (WMS), які обчислюють поправки (DC) і передають їх на станції GUS, які передають поправки на геостаціонарні супутники GEO Satellites WAAS (кожні 5 секунд, не рідше) GEO Satellite передають поправочні повідомлення назад на Землю, де GPS-приймачі з підтримкою WAAS використовують поправки при обчисленні свого місця розташування з підвищеною точністю.

Структура WAAS і аналіз роботи складових сегментів. [2]

Система складається з таких сегментів:

- а) Наземний;
- б) Космічний;

в) Користувацький.

Наземний сегмент WAAS

Склад:[2]

а) станції WRS (англ. Wide-area reference stations) - станції, що збирають дані GPS і WAAS;

б) станції WMS (англ. Wide-area master stations) - станції, що обробляють дані;

в) станції GUS (англ. Ground uplink stations) - станції, що відправляють дані супутникам.

Усі станції об'єднуються в мережу за допомогою відповідних ліній передавання і обробки даних.

WRS

Широкозонні контрольні станції (ШКС, або WRS - WAAS Reference Station) моніторингу, призначені для контролю та спостереження за станом навігаційного поля. Станції WRS розташовані на всій території США. За даними на жовтень 2017 року налічувалося 38 станцій:

а) 20 у США (крім Аляски);

б) 7 на Алясці;

в) Одна на Гаваях;

г) Одна в Пуерто-Ріко;

д) 5 у Мексиці;

е) 4 у Канаді.

Станції WRS зазвичай розміщуються поблизу аеропортів, обладнаних апаратурою GPS, що підтримує WAAS, і спеціальним програмним забезпеченням (ПЗ). Спеціальне ПЗ виконує таке:

а) приймає й аналізує сигнали GPS;

- б) обчислює:
- в) похибки у визначенні координат, що виникають під впливом іоносфери;
- г) відхилення траєкторій супутників;
- д) відхилення атомних годинників, розташованих на супутниках;
- е) приймає сигнали WAAS і шукає в них помилки;
- ж) передає обчислені дані на станції WMS. Дані передаються наземною мережею.



Рисунок 2.3 – Станція WRS у місті Барроу (Аляска)

WMS

Широкозонні головні станції (ШГС, або WMS - WAAS Master Station), призначені для обробки даних моніторингу та спостережень ШКС;

На станціях WMS:

- а) дані, отримані з усіх станцій WRS, аналізуються повторно;
- б) обчислюються два види поправок:
- в) поправки, загальні для всіх користувачів WAAS (англ. fast corrections). Такі поправки змінюються часто і залежать від координат супутників і відхилень їхнього атомного годинника;
- г) поправки, залежні від координат користувача (місця розташування приймача) (англ. slow corrections). До числа таких поправок входять:

- а) ефемериди;
- б) оцінки помилок атомних годинників супутників;
- в) час затримок електромагнітних хвиль під час проходження іоносфери. Зона покриття розділена на ділянки. Затримки обчислюються для граничних точок ділянок;
- г) поправки передаються на станції GUS.

GES

Наземні станції передавання даних (НСПД, або GES - Ground Earth Stations) космічному сегменту, які мають здійснювати зв'язок між ШГС і ГКА. Станції GES передають поправки на супутники. Супутники розсилають поправки приймачам GPS і WAAS (користувачам).

Космічний сегмент WAAS

До складу космічного сегмента входять три супутники, розташовані на геосинхронних орбітах

Действующие спутники WAAS			
Название спутника	PRN	NMEA	Орбита
« <u>Inmarsat 4-F3</u> »	133	46	98°W
«Galaxy 15»	135	48	133°W
«Anik F1R»	138	51	107.3°W

Рисунок 2.4 – Діючі супутники WAAS

Супутники приймають дані від станцій GUS і ретранслюють їх у діапазоні L1 на частоті 1575,42 МГц у зоні своєї видимості. Крім даних WAAS, супутники розсилають дані GPS: повідомлення про цілісність КА GPS і ГКА, вектори поправок до ефемеридних даних, шкал часу і параметрів іоносферної моделі. У зону видимості входять вся територія США та її околиці. Сигнал WAAS передається на тій самій частоті, що й сигнал C/A L1 системи GPS, навіть

кодується також. Це зроблено навмисно для полегшення створення приймачів, що підтримують GPS і WAAS.

Користувацький сегмент WAAS

Користувацький сегмент - це спільний приймач GPS і WAAS, який використовує широкомовну інформацію від кожного супутника GPS для визначення свого місця розташування та поточного часу і приймає поправки WAAS із космічного сегмента - геостаціонарних супутників зв'язку. Отримані повідомлення з виправленнями двох типів (швидкі та повільні) використовуються по-різному. Приймач GPS може негайно застосувати швидкий тип даних корекції, який містить у собі скориговане положення супутника і дані годинника, і визначає своє поточне місце розташування з використанням звичайних розрахунків GPS.

Після отримання приблизного визначення місця розташування приймач починає використовувати повільні поправки для підвищення своєї точності. Серед даних повільної корекції - іоносферна затримка. Коли сигнал GPS проходить від супутника до приймача, він проходить через іоносферу. Приймач обчислює місце, де сигнал пронизав іоносферу, і, якщо він отримав значення іоносферної затримки для цього місця розташування, виправляє помилку, створену іоносферою. Хоча за необхідності повільні дані можуть оновлюватися щохвилини, помилки ефемерид та іоносферні помилки не змінюють так часто, тому вони оновлюються лише кожні дві хвилини і вважаються дійсними протягом шести хвилин.

Призначення

Система WAAS створена для досягнення можливості використання GPS на всіх стадіях польоту повітряного судна, включно з точним виходом до злітно-посадкової смуги (ЗПС).

Система WAAS виконує такі функції:

- а) збір даних про стан навігаційного поля;
- б) визначення іоносферних корекцій;
- в) визначення та уточнення параметрів орбіт супутників;
- г) визначення корекцій орбіт і тимчасових поправок для КА;
- д) контроль цілісності КА;
- е) забезпечення незалежної верифікації (контролю або підтвердження)

вихідних даних для функцій 1-5 перед їх використанням споживачами

ж) забезпечення споживачів коригувальною інформацією та додатковими вимірюваннями псевдодальностей, що дають змогу підвищити надійність і точність навігаційних визначень;

з) забезпечення працездатності та власного нормального функціонування.

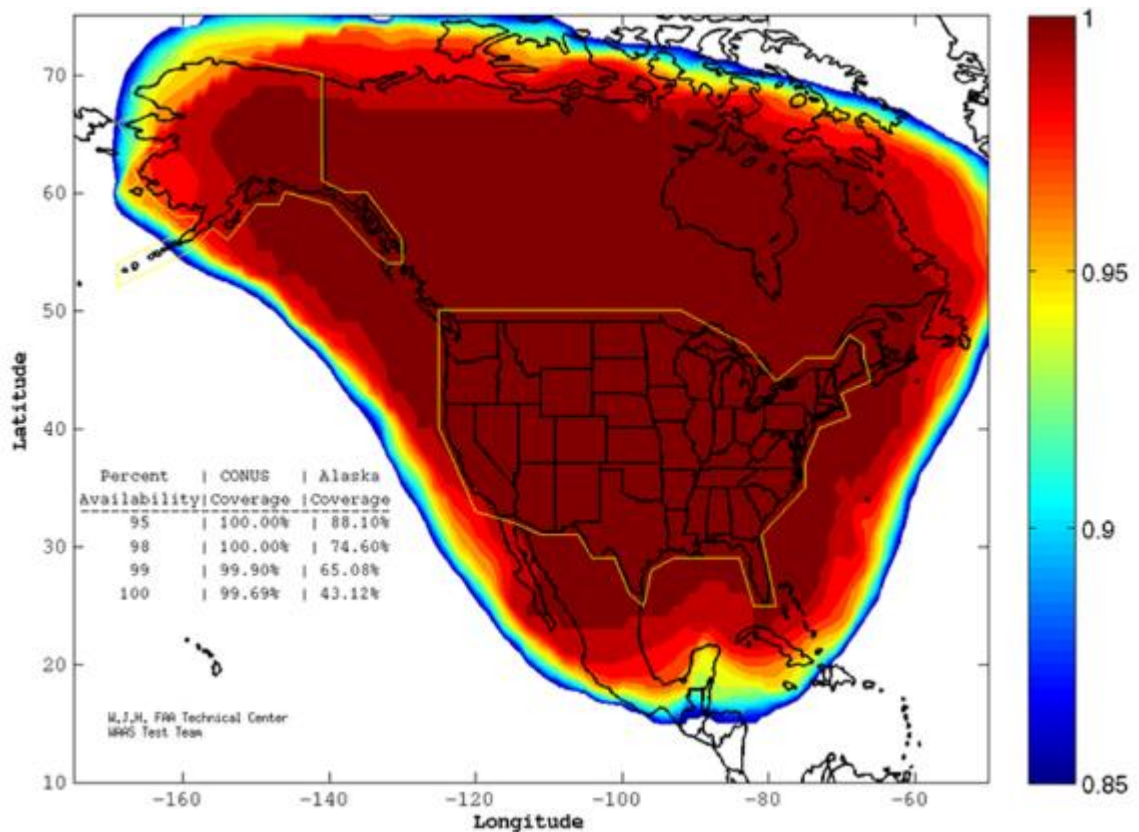


Рисунок 2.5 – Карта покриття WAAS LPV

Аналоги

Міжнародна організація цивільної авіації (ІКАО) позиціонує WAAS як один із варіантів Супутникової системи функціонального доповнення (SBAS). Повністю аналогічні WAAS системи функціонують в інших районах Землі:

- а) у Європі - European geostationary navigation overlay service (EGNOS);
- б) в Японії - Japanese multi-functional satellite augmentation system (QZSS);
- в) в Індії - GPS aided geo augmented navigation (NAVIC).

Точність

Основна мета системи WAAS полягала в тому, щоб дозволити повітряним суднам виконувати захід на посадку за категорією I без встановлення будь-якого обладнання в аеропорту. Це дасть змогу розробити нові підходи до посадки за приладами на основі GPS для будь-якого аеропорту, навіть якщо він не має наземного обладнання. Для заходу на посадку за категорією I потрібна точність 16 метрів (52 фути) по горизонталі та 4,0 метра (13,1 фута) по вертикалі. Для досягнення цієї мети специфікація WAAS вимагає, щоб точність визначення місця розташування становила 7,6 метра (25 футів) або менше (як для бічних, так і для вертикальних вимірювань), принаймні в 95% випадків.

Фактичні вимірювання продуктивності системи в певних місцях показали, що вона зазвичай забезпечує краще, ніж 1,0 метр (3 фути 3 дюйми) по горизонталі та 1,5 метра (4 фути 11 дюймів) по вертикалі на більшій частині прилеглих до території Сполучених Штатів Америки і на великих територіях Канади та Аляски.

Цілісність

Цілісність навігаційної системи включає здатність своєчасно попереджати, коли її сигнал надає не достовірні дані, які потенційно можуть створити небезпеку. Специфікація WAAS вимагає,

щоб система виявляла помилки в мережі GPS або WAAS і повідомляла користувачів протягом 6,2 секунди. Для підтвердження того, що WAAS безпечний для правил польотів за приладами (IFR), необхідно довести, що існує дуже мала ймовірність того, що помилка, що перевищує вимоги до точності, залишиться непоміченою. Зокрема, ймовірність вказується як 1×10^{-7} і еквівалентна не більше ніж 3 секундам невірних даних на рік. Це забезпечує інформацію про цілісність, еквівалентну або кращу, ніж автономний моніторинг цілісності приймача (RAIM).

Доступність

Доступність - це ймовірність того, що навігаційна система відповідає вимогам до точності та цілісності. До появи WAAS специфікації GPS допускали недоступність системи протягом чотирьох днів на рік (доступність 99%). Специфікація WAAS вимагає доступності на рівні 99,999% (п'ять дев'яток) по всій зоні обслуговування, що еквівалентно простоям трохи більше 5 хвилин на рік. WAAS складається з трьох основних сегментів: наземного сегмента, космічного сегмента і користувацького сегмента.

Переваги WAAS

WAAS вирішує всі "проблеми навігації", забезпечуючи високоточне позиціонування, надзвичайно просте у використанні за ціною одного приймача, встановленого на літальному апараті. Інфраструктура наземного і космічного базування відносно обмежена, і посадкова система в аеропорту не потрібна. WAAS дає змогу публікувати точний захід на посадку для будь-якого аеропорту за рахунок витрат на розробку процедур і публікацію нових схем заходу на посадку. Це означає, що майже будь-який аеропорт може мати точний захід на посадку, а вартість впровадження значно знижується. Крім того, WAAS також працює між аеропортами. Це дає змогу літаку літати безпосередньо з одного аеропорту в інший, а не слідувати маршрутам, заснованим на наземних сигналах.

У деяких випадках це може значно скоротити відстані маршруту, заощадивши як час, так і паливо. Крім того, через свою здатність надавати інформацію про точність інформації кожного супутника GPS, повітряним суднам, оснащеним WAAS, дозволяється літати на нижчих висотах польоту за маршрутом, ніж це було можливо з наземними системами, які часто були заблоковані рельєфом місцевості. Це дає змогу пілотам безпечно літати на малих висотах, не покладаючись на наземні системи. Для негерметичних літаків це дає змогу заощадити кисень і підвищити безпеку. Вищезазначені переваги створюють не тільки зручність, але також можуть значно знизити витрати.

Вартість надання сигналу WAAS для обслуговування всіх 5400 аеропортів загального користування становить трохи менше 50 мільйонів доларів США на рік. Для порівняння: обслуговування нинішніх наземних систем, таких як система заходу на посадку за приладами (ILS), що встановлені тільки в 600 аеропортах, коштує 82 мільйони доларів США на щорічно. Без придбання наземного навігаційного обладнання, загальна вартість публікації АНІ щодо заходу на посадку на злітно-посадкову смугу з використанням WAAS, становить приблизно 50 000 доларів США, порівняно з вартістю встановлення ILS від 1 000 000 до 1 500 000 доларів.

2.3 Посадка по сигналам наземних функціональних доповнень

Система посадки GBAS.

Наземна система функціонального доповнення GBAS (Ground based augmentation system) це система функціонального доповнення, яка забезпечує підвищення точності GNSS, за рахунок прийому на ПС додаткової інформації – коригувального сигналу від наземного передавача.

GBAS або назва FAA USA - Система локального розширення (LAAS) – це всепогодна система посадки ПС, заснована на диференціальній корекції сигналу GPS у реальному часі. Для забезпечення заходу на посадку також застосовується термін GLS (від англ. GBAS Landing system)[6].

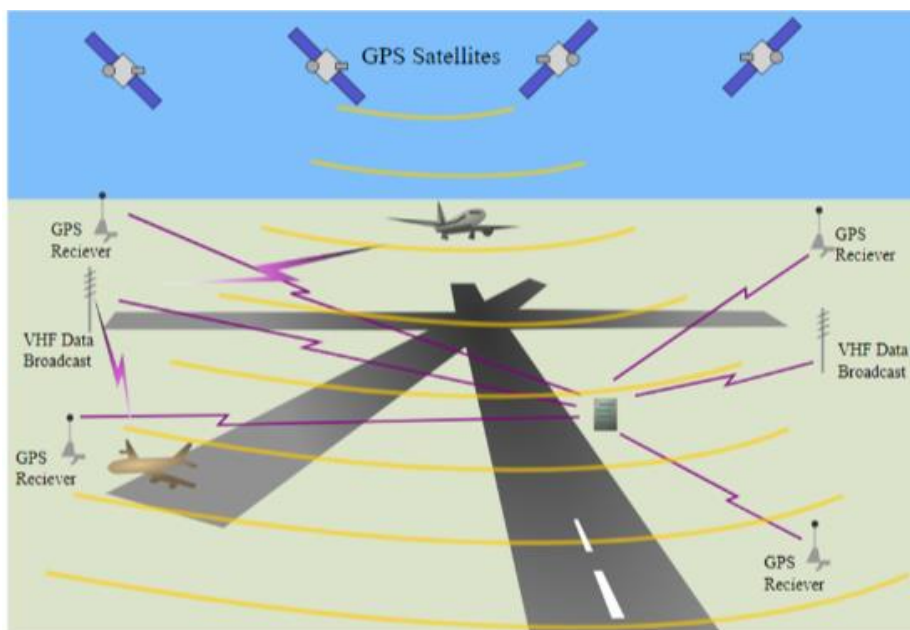


Рисунок 2.6 – Принцип дії системи GBAS

Компоненти [6]

- а) Одна або кілька станцій збору вимірювань - ККС, які являють собою комплекс високоточної навігаційної апаратури, встановленої в точках з відомими координатами (GPS Receiver).
- б) Центр обробки даних GPS аеропорту, для комп'ютерної обробки навігаційної інформації для складання коригувального повідомлення.
- в) Одна або кілька наземних ліній передачі навігаційних даних на передавальні центри
- г) Центри передачі коригувальних даних на ПС - VHF Data Broadcast.
- д) Бортові приймачі приймання сигналів GPS і GBAS.

Принцип роботи

Під час визначення координат від GNSS можуть виникати помилки, що змінюватимуться через зміну взаємного розташування супутників і вплив іоносфери на проходження радіосигналів. LAAS забезпечує підвищення навігаційної точності GNSS шляхом передавання VHF-радіоканалом на борт ПС

диференціальних поправок до псевдодальностей навігаційних супутників, а також інформації про цілісність сигналів.

Прийнявши сигнали сузір'їв GNSS (GPS та/або ГЛОНАСС) станцій збору вимірювань LAAS визначають за ними своє місцеположення, порівнюють розраховане місцеположення з фактичним і на підставі цього формують і передають цифровим УКХ-радіоканалом на борт ПС сигнали коригування псевдодальностей, параметри цілісності, а також дані кінцевої ділянки заходу на посадку (FAS).

На борту повітряного судна знаходиться приймач GBAS - бортове обладнання GNSS, яке може приймати, обробляти і використовувати сигнали LAAS, видаючи екіпажу і в систему автоматичного управління інформацію для наведення повітряного судна по горизонталі і вертикалі[6].

Переваги системи GBAS

Маневрування в районі аеродрому, захід на посадку, посадка, зліт і вихід на друге коло, залежно від можливостей устатовленого на борту обладнання, можуть здійснюватися з використанням однієї системи GBAS з автоматичним переходом обладнання у відповідні режими.

Під час виконання заходу на посадку за GLS точність витримування номінальної траєкторії не залежить від віддалення повітряного судна від LAAS у межах устатовленої зони для процедури посадки, у той час як при використанні ILS точність істотно залежить від віддалення ПС від ЗПС.

Перешкодозахищеність

Використання цифрових каналів зв'язку в системі для передачі даних від LAAS на борт ПС дає змогу забезпечувати відносно високу завадозахищеність. На відміну від ILS у GLS немає критичних зон на робочій площі аеродрому, в які під час заходу на посадку обмежується вхід інших ПС і спецтехніки, що дає змогу оптимізувати процедури роління, вильоту, а також обслуговування аеродрому.

Розміщення обладнання на аеродромі LAAS не потрібно розміщувати на продовженні осьової лінії ЗПС, що виключає вплив повітряного судна, що йде попереду, на приймання посадкових даних ПС, що йдуть позаду ПС. Одна LAAS може забезпечувати точні заходи на посадку на кожен напрямок усіх ЗПС у межах своєї зони дії. Застосування ILS і MLS вимагає встановлення окремих комплектів апаратури для кожного торця ЗПС.

2.4 Можливості спільного застосування GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou для посадки

Сьогоднішні послуги на основі GNSS здебільшого покладаються на GPS, надаючи послуги на одній частоті. Однак ГЛОНАСС уже працює, а BDS і Galileo розгортаються. Усі сузір'я в кінцевому підсумку працюватимуть у кількох частотних діапазонах. Очікуються відповідні розробки в галузі систем функціонального доповнення GNSS.

Використання сигналів GNSS від декількох сузір'їв, що віщають у декількох смугах частот, покращує технічні характеристики GNSS. Використання комбінованих сигналів від незалежних систем підвищить продуктивність і покриття послуг. Ба більше, об'єднання сигналів підвищує надійність і дає змогу GNSS відповідати вимогам до характеристик за наявності перешкод або збоїв окремої системи. Кожен із нових сигналів GNSS буде більш стійким до перешкод через більшу потужність і ширшу смугу пропускання, і поліпшені конструкції сигналів, що призводить до кращого придушення перешкод. Всі сигнали, призначені для додатків забезпечення безпеки життя, повинні користуватися захистом, що забезпечується за допомогою розподілу ІТУ в смугах частот ARNS[4].

Характеристики GNSS залежать від кількості супутників у полі зору. GNSS з декількома сузір'ями буде істотно збільшити це число. Це поліпшить доступність і безперервність обслуговування, особливо в областях, де іоносферні мерехтіння можуть викликати втрату захоплення окремих супутників. Крім того,

доступність понад 30 інтероперабельних джерел визначення дальності може дозволити ABAS забезпечувати глобальні заходи на посадку з вертикальним наведенням з мінімальною або потенційно відсутньою потребою в зовнішніх сигналах розширення в довгостроковій перспективі.

Наявність другої частоти дасть змогу авіоніці розраховувати іоносферну затримку в реальному часі, ефективно усуваючи основне джерело помилок. Майбутні системи DFMC SBAS зможуть підтримувати майже 100%.

Наявність декількох незалежних угруповань забезпечить надмірність для зниження ризику обслуговування. Втрати через серйозну відмову системи в основному угрупованні, а також усуне занепокоєння деяких держав з приводу використання одного угруповання GNSS, що перебуває поза їхнім оперативним контролем.

Впровадження мульти-сузір'я і багаточастотної GNSS тягне за собою низку нових проблем, зокрема необхідність взаємодії сигналів різних сузір'їв GNSS; проблеми юридичної відповідальності; складніша роль систем функціонального доповнення, що потенційно мають справу з різними комбінаціями сузір'їв GNSS; та збільшена складність інтеграції авіоніки і літаків та оперативного управління. Для реалізації переваг використання декількох сузір'їв ІКАО, держави, постачальники послуг ANS, органи зі стандартизації, виробники та експлуатанти повітряних суден повинні координувати дії з подолання цих проблем. Досвід показав, що необхідно приділяти увагу регулюванню та нагляду в галузі безпеки польотів, оскільки відсутність ясності в цих процесах уповільнює прогрес[4].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі розглянуто вимоги до супутникових навігаційних систем, що використовуються для посадки літаків. Проаналізовано можливості посадки за сигналами глобальних (GPS, ГЛОНАСС), регіональних (EGNOS, WAAS) та локальних (GBAS) систем функціональних доповнень GNSS.

Показано, що системи SBAS типу WAAS, EGNOS забезпечують посадку літаків з точністю до 1 м в горизонтальній площині та 1.5 м по вертикалі. Проте їх можливостей недостатньо для посадки за I категорією ІКАО.

Для посадки за I категорією доцільно використовувати локальні системи типу GBAS. Перевагами GBAS є висока точність, перешкодозахищеність, можливість обслуговування заходів на посадку на всі ЗПС аеродрому однією системою.

Показана перспективність використання сигналів від декількох глобальних навігаційних систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) і на різних частотах для підвищення доступності, безперервності, цілісності навігаційного поля. Разом з тим, інтеграція сигналів від різних GNSS вимагає вирішення низки проблем організаційно-технічного характеру.

РОЗДІЛ 3.ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОЧНОСТІ, ЦІЛІСНОСТІ, БЕЗПЕРЕРВНОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ГОТОВНОСТІ SBAS

3.1 Характеристики точності, цілісності, безперервності обслуговування, експлуатаційної готовності SBAS.

Характеристики SBAS [9]

Точність - ступінь відповідності розрахункового або виміряного місця розташування і (або) швидкості платформи в даний момент часу істинному місцю розташування або швидкості. Точність забезпечення радіонавігації виражається у вигляді статистичної міри похибки системи і вказується як:

- а) Прогнозована. Точність місця розташування щодо земних географічних або геодезичних координат.
- б) Повторювана. Точність, з якою користувач може повернутися в місце розташування, координати якого були виміряні в попередній момент часу тією ж навігаційною системою.
- в) Відносна. Точність, з якою користувач може визначити одне місце розташування відносно іншого незалежно від будь-якої похибки визначення відповідних істинних місцеположень.

Точність використання системи - поєднання похибок навігаційного датчика, бортового приймача, похибки відображення та похибки пілотування.

Безперервність - здатність системи функціонувати без перерв із заданими робочими характеристиками протягом заданого періоду. Характеризується відповідною ймовірністю.

Цілісність - це міра довіри, яка може бути віднесена до правильності інформації, що видається системою загалом, та включає в себе здатність системи забезпечувати користувача своєчасним і достовірним попередженням

(наприклад, спрацьовуванням сигналізації) у тих випадках, коли система не повинна використовуватися для наміченої операції або етапу польоту.

Експлуатаційна готовність - визначається часткою часу, протягом якого система, що використовується для навігації, забезпечує надійну навігаційну інформацію екіпажу, автопілоту або іншим системам, що керують польотом повітряного судна.

Вимоги до характеристик GNSS формуються із сукупності вимог, що висуваються до елементів GNSS, бортового обладнання повітряних суден і здатності повітряного судна здійснювати рух за бажаною траєкторією. Під час формування вимог до GNSS було введено поняття безвідмовного приймача користувача GNSS, який повинен мати номінальні характеристики за точністю і часу попередження і не мати відмов, що стосуються цілісності, безперервності та експлуатаційної готовності інших складових GNSS (ГЛОНАСС, GPS, GBAS, SBAS).[13]

Кількісні значення вимог до характеристик сигналу GNSS у просторі наведено в додатку 1.

Модуляція

Передана послідовність утворюється підсумовуванням за модулем 2 навігаційного повідомлення, що має швидкість 500 символів на секунду і псевдовипадкового шумового коду довжиною 1023 біти. Цією послідовністю модулюється несуча частота, використовуючи метод двопозиційної фазової маніпуляції (BPSK).

Характеристики EGNOS [2]

Сервіс EGNOS SoL відповідає авіаційним вимогам для заходження на посадку з вертикальним наведенням (APVI) і точного заходження на посадку категорії I, визначеним ІКАО в Додатку 10 [RD-1], за винятком специфічних відхилень, але також призначений для підтримки додатків в інших областях SoL.

"Мінімальні" показники ефективності, наведені в цьому розділі, враховують ряд аномальних станів системи або нетипових умов навколишнього середовища, які статистично очікувано можуть виникнути протягом терміну служби системи. Вважається, що ці типи характеристик надають цінну і додаткову інформацію про продуктивність сервісу EGNOS для виробників приймачів, розробників ГНСС-додатків і кінцевих користувачів сервісу EGNOS SoL.

Таблиця 3.2

Вимоги до продуктивності системи EGNOS[14]

Typical operation	Accuracy		Integrity				Continuity	Availability
	Horizontal Accuracy 95%	Vertical Accuracy 95%	Integrity	Time-To-Alert (TTA)	Horizontal Alert Limit (HAL)	Vertical Alert Limit (VAL)		
En-route (oceanic/continental low density)	3.7 km (2.0 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	5 min	7.4 km (4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-6}/h$	0.99 to 0.99999
En-route (continental)					3.7 km (2 NM)	N/A		
En-route, Terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	15 s	1.85 km (1 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-6}/h$	0.99 to 0.99999
Initial approach, Intermediate approach, Non-precision approach (NPA), Departure	220 m (720 ft)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	10 s	556 m (0.3 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-6}/h$	0.99 to 0.99999
Approach operations with vertical guidance (APV-I)	16.0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	10 s	40 m (130 ft)	50 m (164 ft)	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999
Category I precision approach	16.0 m (52 ft)	6.0 m to 4.0 m (20 ft to 13 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	6 s	40 m (130 ft)	35.0 m to 10.0 m (115 ft to 33ft)	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999

Для точних заходжень на посадку Категорії I з Vertical Alert Limit (VAL) вище 10 м, SARPs ІКАО ([RD-1]) визначає такі прийнятні засоби управління ризиками зіткнення та небезпечної посадки через навігаційну систему.

Помилка (NSE) у візуальному сегменті:

У номінальних умовах: Імовірність ($VNSE > 10\text{м}$) $< 10^{-7}/150\text{ с}$

У деградованих умовах: Імовірність ($VNSE > 15\text{м}$) $< 10^{-5}/150\text{ с}$

Погіршення стану або відмова системи - це умови, що впливають або на основні сузір'я, або на підсилення ГНСС, що розглядається. Цю ймовірність слід розуміти як поєднання ймовірності виникнення певної несправності з ймовірністю її виявлення відповідним(и) монітором(ами). Як правило, ймовірність виникнення однієї несправності є достатньо великою, щоб монітор задовольняв цій умові. Номінальні або безвідмовні умови - це ті, що відрізняються від погіршених.

Вимоги до продуктивності навігації WAAS

Таблиця 3.3

Вимоги до продуктивності на маршруті за допомогою неточного підходу (NPA) *За винятком відключень тривалістю менше 5 хвилин. [13]

Performance Requirement	Total System	Navigation System	GPS/WAAS Signal-in-Space	Airborne
Availability	0.99999	0.99999	0.99999	Not Specified
Accuracy				
95% Horizontal Position	Not specified	0.054 nmi (100 m)	Not Specified	Not Specified
99.999% Horizontal Position	Not Specified	0.27 nmi (500 m)	Not Specified	Not Specified
95% Vertical Position	N/A	N/A	N/A	N/A
95% Pseudorange	N/A	Not Specified	Not Specified	1.2 m
Integrity				
Probability of HMI	Not Specified	Not Specified	10^{-7} / hour	Not Specified
Time-to-Alarm	10 sec	10 sec	8 sec	2 sec
Continuity of Function				
Continuity of Navigation	$1 - 10^{-5}$ / hour	$1 - 10^{-5}$ / hour	$1 - 10^{-8}$ / hour	$1 - 10^{-5}$ / hour
Continuity of Fault Detection (1)	$1 - (2 \times 10^{-5})$ / hour	$1 - (2 \times 10^{-5})$ / hour	$1 - 10^{-5}$ / hour	$1 - 10^{-5}$ / hour

Продуктивність SIS WAAS відповідає або перевищує авіаційні вимоги. Фактична продуктивність WAAS вимірюється та аналізується Технічним центром FAA протягом усього періоду експлуатації. WAAS забезпечує рівень обслуговування, заснований на найбільш вимогливій польотній операції LPV-200. Цей рівень обслуговування доступний у всій зоні покриття, як зазначено на

веб-сайті. У зонах, де цей рівень обслуговування недоступний, сигнал WAAS вказує на доступний знижений рівень обслуговування (LPV або LNAV/VNAV). Доступний рівень сервісу відображається на екрані приймача. Конструкція WAAS забезпечує попередження про цілісність протягом ТТА 6,2 секунди. В іншому випадку приймач RAIM/FDE сповіщає протягом 8 секунд. Ймовірність аналізу НМІ для конструкції WAAS становить менше ніж 1×10^{-7} за один підхід (150 секунд). Безперервність не відстежується. Номінальна точність становить приблизно 1,6 м по вертикалі або горизонталі в 95% випадків. Максимальна спостережувана похибка становить менше 12 м, коли VPL менше 50 м. Розглядаючи це як обмеження в σ , консервативна максимальна похибка в 95% відповідає вимогам до вертикальної точності в 4 м. Карти доступності ілюструються в реальному часі та в історичному розрізі на веб-сайті Технічного центру FAA за адресою: www.nstb.tc.faa.gov. У Таблиці 3.4 представлено продуктивність SIS WAAS на основі проектування, аналізу та фактичної продуктивності системи.[13]

Таблиця 3.4

Продуктивність WAAS SIS

	Продуктивність	Коментар
ТТА	6.2 с	Те саме, що й вимога
ТТА-приймач RAIM/FDE	8 с	TSO-C145/146
Ймовірність НМІ	$< 1 * 10^{-7}$ за захід (150 с)	Менше, ніж потрібно
Безперервність	$1 - 8 * 10^{-6} / 15с$	Те саме, що й вимога
Точність по горизонталі номінальна	1.6 м (95%)	Звіт про аналіз ефективності
Точність по горизонталі максимальна	12 м (максимум, що спостерігався)	

Межа точності по горизонталі	4 м (консервативна межа 95%)	
Точність по вертикалі номінальна	1.6 м (95%)	Звіт про аналіз ефективності
Точність по вертикалі максимальна	12 м (максимум, що спостерігався)	
Межа точності по вертикалі	4 м (консервативна межа 95%)	
Доступність	карти доступності в реальному часі	www.nstb.tc.faa.gov

3.2 Концепція HPL – VPL

Сутність концепції HPL-VPL полягає в наступному. Навігація вважається надійною і безпечною, якщо на відповідній стадії польоту місце розташування повітряного судна не виходить за межі циліндра. При цьому цілісність сигналу в просторі, безперервність обслуговування та експлуатаційна готовність відповідають даним, наведеним у підрозділі 3.1. Графічно наведене визначення зображено на рис. 3.2.1.[8]

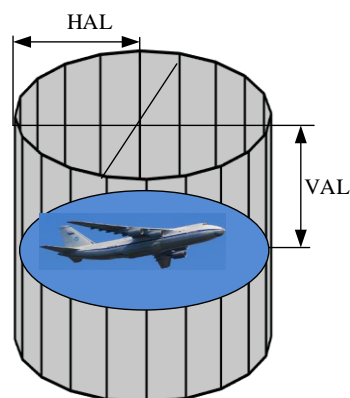


Рисунок 3.1 – Пропонується для БПЛА обмежувальну поверхню вибрати у вигляді еліпсоїда рис.

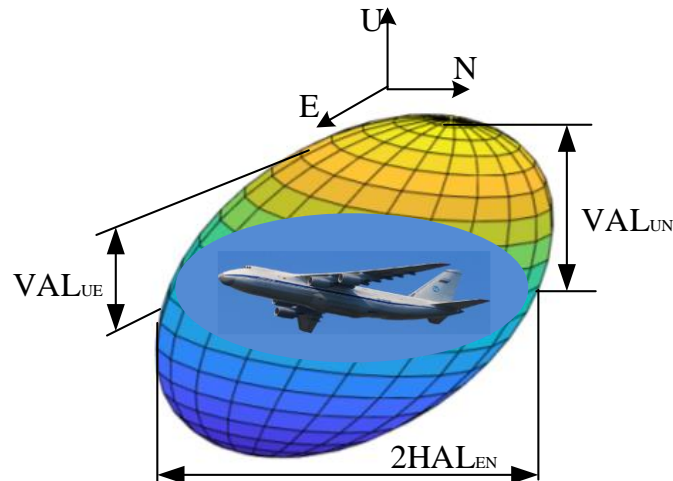


Рисунок 3.2 – HAL - Horizontal Alert Limit - горизонтальний поріг тривоги (радіус кола в горизонтальній площині з центром у точці реального положення споживача).

Ймовірність знаходження в колі становить 10^{-7} /год польоту з урахуванням того, що інтегральна відмова системи GPS/ГЛОНАСС не більше 10^{-4} /год.

HPL - Horizontal Protection Level - горизонтальний захисний рівень (радіус кола в горизонтальній площині з центром у точці реального положення споживача). Знаходження в цьому колі визначається алгоритмом виявлення збоїв ГНСС. Ця величина залежить від геометричного фактора точності та від оцінок помилок вимірювань і не залежить від реальних вимірювань.

VAL - Vertical Alert Limit - половина довжини відрізка у вертикальному напрямку з центром у точці реального положення споживача). Ймовірність приналежності цьому відрізку становить 10^{-7} /год польоту з урахуванням того, що інтегральна відмова системи GPS/ГЛОНАСС не більше 10^{-4} /год.

VPL - Vertical Protection Level - вертикальний захисний рівень (половина довжини відрізка у вертикальному напрямку з центром у точці реального положення споживача). Належність цьому відрізку визначається алгоритмом виявлення збоїв.[8]

Виявлення збоїв на рівні вертикального захисту (VPL FD)

Половина довжини сегмента на вертикальній осі (перпендикулярній до горизонтальної площини еліпсоїда WGS-84) із центром у істинному положенні, який описує область, що гарантовано містить зазначене вертикальне положення, коли виконується автономне виявлення несправностей.

Він визначає вертикальну область, в якій виконуються вимоги пропущених і помилкових попереджень для обраного набору супутників при використанні автономного виявлення несправностей. Вертикальний рівень захисту SBAS (VPL SBAS) становить половину від довжини сегмента на вертикальній осі (перпендикулярній до горизонтальної площини еліпсоїда WGS-84) з центром в істинному положенні, який описує область, що гарантовано містить зазначене вертикальне положення. Він визначає вертикальну область, у якій може бути виконана вимога про пропущене попередження. Він заснований на оцінках помилок, наданих SBAS.[5]

Рівень горизонтальної невизначеності: рівень горизонтальної невизначеності (HUL) - це оцінка невизначеності горизонтального положення, заснована на неузгодженості вимірювань, яка обмежує істинну помилку з високою ймовірністю (не менше 99,9 відсотка). Ця оцінка не буде доступна, якщо доступно чотири або менше вимірювань (через відсутність надмірності).

Рівень вертикальної невизначеності: рівень вертикальної невизначеності (VUL) - це оцінка невизначеності вертикального положення, що ґрунтується на неузгодженості вимірювань, яка обмежує істинне значення.

помилка з високою ймовірністю (не менше 99,9 відсотка). Ця оцінка не буде доступна, якщо доступно чотири або менше вимірювань (через відсутність надмірності).[10]

Виявлення збоїв на рівні виключення по горизонталі:

Виявлення збоїв на рівні виключення по горизонталі (HEL FD) - це радіус кола в горизонтальній площині, де пропущене попередження і не вдалося. Вимоги виключення можуть бути виконані, коли автономне виявлення і

виключення несправностей використовується (тобто доступне виключення). Це тільки функція супутників і геометрії користувача. і очікувані характеристики похибки: на неї не впливають фактичні вимірювання. Отже, це значення передбачуване. Стандартів мінімальних експлуатаційних характеристик (MOPS) для SBAS. Імовірність виникнення ризикованої дезінформуючої інформації (HMI, Hazardous Misleading Information) залежить від двох базових параметрів: дійсної помилки положення та певного рівня захисту. Щойно помилка положення більша за рівень захисту, ми інтерпретуємо таку ситуацію як таку, що дезорієнтує, і відповідно називаємо дезорієнтуючою інформацією (MI, Misleading Information). Оскільки горизонтальна помилка положення складається з двох розподілів - нормального розподілу в північному напрямку і нормального розподілу в східному напрямку, горизонтальна помилка положення повинна поводитися однаково з релейною функцією розподілу ймовірності (Rayleigh probability density function). Імовірність MI обчислюється за допомогою інтегрування двовимірної густини розподілу ймовірностей у зоні де $XPE > XPL$. Імовірність HMI обчислюється за допомогою інтегрування двовимірної густини розподілу ймовірностей у зоні, де $XPE > XAL$ і $XPL < XAL$, де XAL відповідає VAL або HAL.

На рис. 3.3 схематично зображено структуру схеми посадки повітряного судна за категоріями CAT I - CAT III (LAL - поріг оповіщення по боці, VAL - поріг оповіщення по вертикалі). Значення порогів встановлюються нормативними документами для традиційної авіації. Існують певні процедури і правила для розрахунку значень порогів.

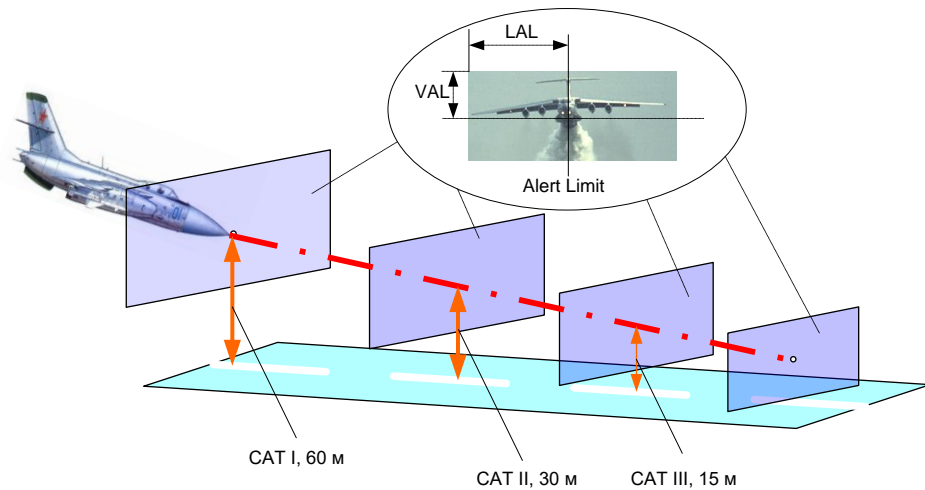


Рисунок 3.3 – посадка по CAT I – CAT III

На рис. 3.4 – показано діаграму зв'язків PL, PE, AL, що використовується для відображення результатів моніторингу SBAS.

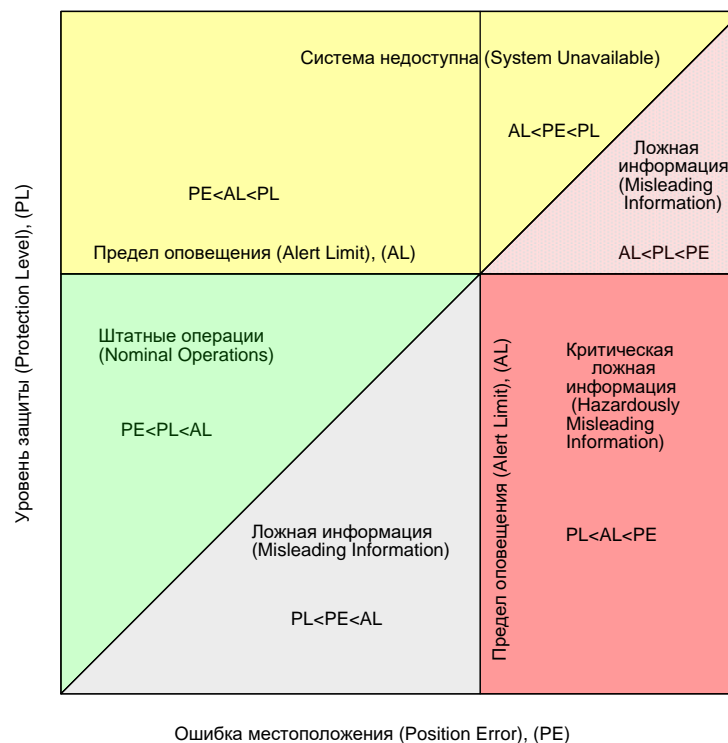


Рисунок 3.4 – Стенфордська діаграма

Відображення результатів на діаграмі проводиться окремо для горизонтальної площини (скорочення доповнюються буквою Н: НРL, НРЕ, НАL) і вертикальної площини (скорочення доповнюються буквою V: VPL, VPE, VAL).

Супутникову систему навігації можна застосовувати тільки в тому разі, якщо виконуються умови:

$$\begin{aligned} HPE < HPL < HAL, \\ VPE < VPL < VAL \end{aligned}$$

3. 3 Метод і алгоритм розрахунку захисних рівнів.

Основне лінеаризоване рівняння GPS-вимірювання має вигляд:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G} \times \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

Де:

\mathbf{x} - чотиривимірний вектор положення (північ, схід, вгору і годинник), щодо якого була проведена лінеаризація.

\mathbf{y} - N-вимірний вектор, що містить необроблені вимірювання псевдодальностей мінус очікувані значення дальності, засновані на розташуванні супутників і розташуванні користувача (\mathbf{x}).

\mathbf{G} - матриця спостережень.

$\boldsymbol{\varepsilon}$ - N-вимірний вектор, що містить помилки в (\mathbf{y}).

Очікувані псевдодальності від точки лінеаризації до супутників визначаються з точки лінеаризації. Матриця спостережень складається з N рядків векторів прямої видимості від \mathbf{x} до кожного супутника, доповнених 1 для годинника. Таким чином, перший рядок відповідає першому супутнику в полі зору і може бути записаний в термінах азимутального кута EL_i та азимутального кута Ez_i [11]

$$\mathbf{G}_i = [\cos EL_i \cos Az_i \cos EL_i \sin Az_i \sin EL_i \ 1] = \text{перший рядок } \mathbf{G}$$

коли позитивний азимут визначається за годинниковою стрілкою з півночі.

Розв'язком за методом найменших квадратів для \mathbf{x} є розв'язок (знайдений за допомогою ітерацій).

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{G}^T * \mathbf{W} * \mathbf{G})^{-1} * \mathbf{G}^T * \mathbf{W} * \mathbf{y} \equiv \mathbf{S} * \mathbf{y}$$

де було зроблено визначення

$$\mathbf{S} \equiv (\mathbf{G}^T * \mathbf{W} * \mathbf{G})^{-1} * \mathbf{G}^T * \mathbf{W}$$

Де:

W - вагова матриця. У цьому випадку зважений метод найменших квадратів є також рішенням з мінімальною дисперсією. Цей базовий алгоритм припускає, що джерела помилок для кожного супутника є некорельованими з джерелами помилок для будь-якого іншого супутника. Вагова матриця буде діагональною, а її обернена матриця матиме вигляд:

$$W^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_N^2 \end{bmatrix}$$

Рівняння рівня захисту WAAS - загальний метод найменших квадратів

Обладнання повинно використовувати наступні рівняння для обчислення рівнів захисту. Параметри в цих рівняннях повинні використовуватися, як визначено в Розділі J.2.[11]

$$HPL_{WAAS} = \begin{cases} K_{H,NPA} * d_{major} & \text{для проходження через режими NPA} \\ K_{H,PA} * d_{major} & \text{для режиму точного наближення} \end{cases}$$

$$VPL_{WAAS} = K_{V,PA} d_U$$

Де:

$$d_{major} \equiv \sqrt{\frac{d_{east}^2 + d_{north}^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{d_{east}^2 - d_{north}^2}{2}\right)^2 + d_{EN}^2}}$$

$d_{east}^2 = \sum_{i=1}^N S_{east,i}^2 \sigma_i^2$ = дисперсія розподілу моделі, яка перевищує істинну похибку розподіл по східній осі.

$d_{north}^2 = \sum_{i=1}^N S_{north,i}^2 \sigma_i^2$ = дисперсія розподілу моделі, яка перевищує істинний розподіл розподілу похибок по північній осі.

$d_{EN} = \sum_{i=1}^N S_{east,i} S_{north,i} \sigma_i^2$ = коваріація розподілу моделі за східною та північною віссю.

$d_U^2 = \sum_{i=1}^N S_{U,i}^2 \sigma_i^2$ = дисперсія розподілу моделі, яка перевищує істинний розподіл похибки по вертикальній осі.

S_{east} = часткова похідна помилки положення у східному напрямку по відношенню до псевдодалекомірної помилки на 1-му супутнику.

S_{north} = часткова похідна помилки положення в північному напрямку по відношенню до помилки псевдодальноміра на 1-му супутнику.

S_U = часткова похідна помилки положення у вертикальному напрямку по відношенню до до псевдодальномірної похибки на 1-му супутнику.

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,air}^2 + \sigma_{i,tropo}^2$$

d_{major} = відповідає невизначеності похибки вздовж півосі еліпса похибки.

Для загального позиційного розв'язку за методом найменших квадратів проекційна матриця S визначається як:

$$S = \begin{bmatrix} S_{east,1} & S_{east,2} & \dots & S_{east,N} \\ S_{north,1} & S_{north,2} & \dots & S_{north,N} \\ S_{U,1} & S_{U,2} & \dots & S_{U,N} \\ S_{t,1} & S_{t,2} & \dots & S_{t,N} \end{bmatrix} = (G^T * W * G)^{-1} * G^T * W$$

Де:

1-й рядок геометричної матриці G визначається наступним чином:

$G_i = [\cos El_i \cos Az_i \cos El_i \sin Az_i \sin El_i \ 1] =$ 1-го рядка G коли позитивний азимут визначено за годинниковою стрілкою з півночі.

$$W^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_N^2 \end{bmatrix}$$

Для режиму точного заходження на посадку,

$$w_i = \sigma_i^2$$

Примітка 2: Для режимів, відмінних від точного наближення, ваги не визначені. Для незваженого методу найменших квадратів вагова матриця є матрицею з одиничною діагоналлю ($w_i=1$).[11]

Примітка 3: Коли ваги дорівнюють σ_i^2 матриця

$$\begin{bmatrix} d_{east}^2 & d_{EN} & d_{EU} & d_{ET} \\ d_{EN} & d_{north}^2 & d_{NU} & d_{NT} \\ d_{EU} & d_{NU} & d_U^2 & d_{UT} \\ d_{ET} & d_{NT} & d_{UT} & d_T^2 \end{bmatrix} = (G^T W G)^{-1}$$

***HPL*_{WAAS} Параметри**

К

Значення K_H для обчислення HPL дорівнює:

$$K_H = \begin{cases} 6.18 & \text{для проходження через режими NPA} \\ 6.0 & \text{для режиму точного наближення} \end{cases}$$

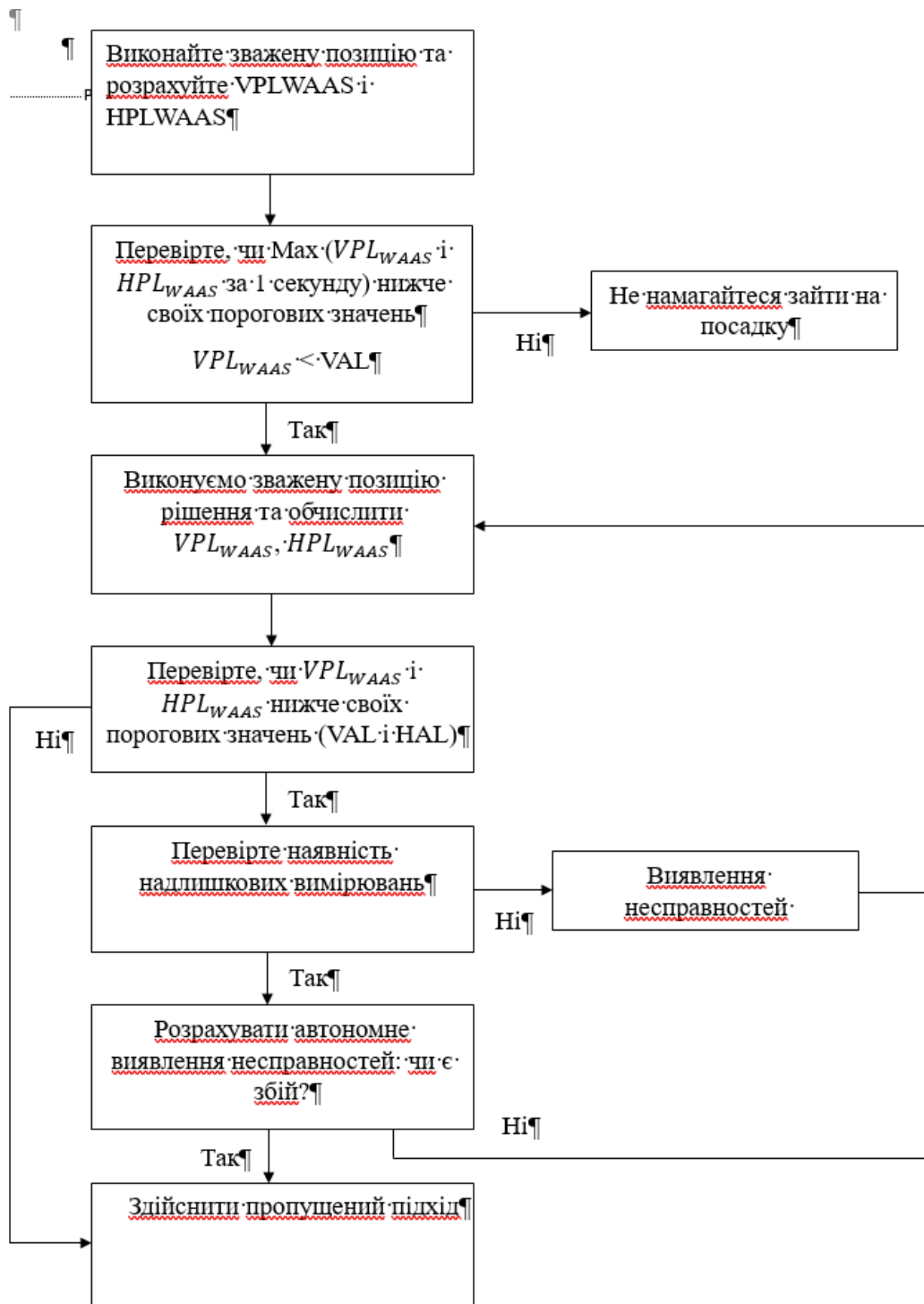
Значення K_V для обчислення VPL дорівнює:

$$K_V = 5.33$$

Помилка позиціонування, що захищається WAAS та зваженим RAIM, - це різниця між фактичним положенням літака та фіксованим положенням, що надається навігаційною системою. Це зазвичай називають помилкою навігаційної системи або NSE. Блок-схема базового алгоритму моніторингу NSE показана на схемі. Як показано на схемі, GPS-приймач обчислює зважене рішення положення, VPL_{WAAS} і HPL_{WAAS} . Якщо VPL_{WAAS} або HPL_{WAAS} перевищує поріг, спочатку дозволений для NSE, посадка не повинна бути ініційована. Оскільки значення VPL і HPL можуть бути зашумлені коефіцієнтом деградації швидкої корекції, для цього прогнозу використовується максимальне значення VPL і HPL, яке спостерігається протягом інтервалу очікування швидкої корекції (Ifc). В іншому випадку приймач продовжуватиме обчислювати ці значення в кожен епоху, після чого буде розпочато зближення.

Після перевірки перед зближенням VPL_{WAAS} і HPL_{WAAS} повинні бути меншими за сумарну похибку, допустиму для NSE. Якщо в полі зору більше 4 супутників, використовується автономне виявлення помилок (подібно до неточного підходу) з ймовірністю хибної тривоги, що дорівнює 10^{-5} за підхід. Для цього розрахунку не має значення, наскільки великими є рівні захисту. Якщо помилку виявлено, видається попередження, і пілот повинен виконати пропущене заходження на посадку. В іншому випадку, якщо помилки не

виявлено або якщо автономне виявлення помилок недоступне, але всі інші умови виконані, пілот продовжує захід на посадку. Обладнання обробляє наступні дані для наступної епохи, і цикл продовжується. [10]



ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У третьому розділі було розглянуто характеристики точності, цілісності, безперервності обслуговування та експлуатаційної готовності SBAS. Проаналізовано вимоги до цих характеристик для систем EGNOS та WAAS.

Також було розглянуто концепцію HPL-VPL та принципи побудови захисних рівнів для забезпечення навігаційної цілісності. Запропоновано для БПЛА використовувати у якості обмежувальної поверхні еліпсоїд.

Крім того, наведено методи та алгоритми розрахунку горизонтального (HPL) та вертикального (VPL) захисних рівнів на основі рівняння GPS вимірювань. Розглянуто загальний метод найменших квадратів та параметри розрахунку захисних рівнів у системі WAAS.

Отже, у цьому розділі детально проаналізовано методи забезпечення навігаційної цілісності SBAS та побудови захисних рівнів для застосування в системах навігації БПЛА.

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ПОСАДКИ

Експериментальні дослідження моделі проводилося з використання робочого місця Лабораторії супутникової навігації кафедри аеронавігації рис.4.1

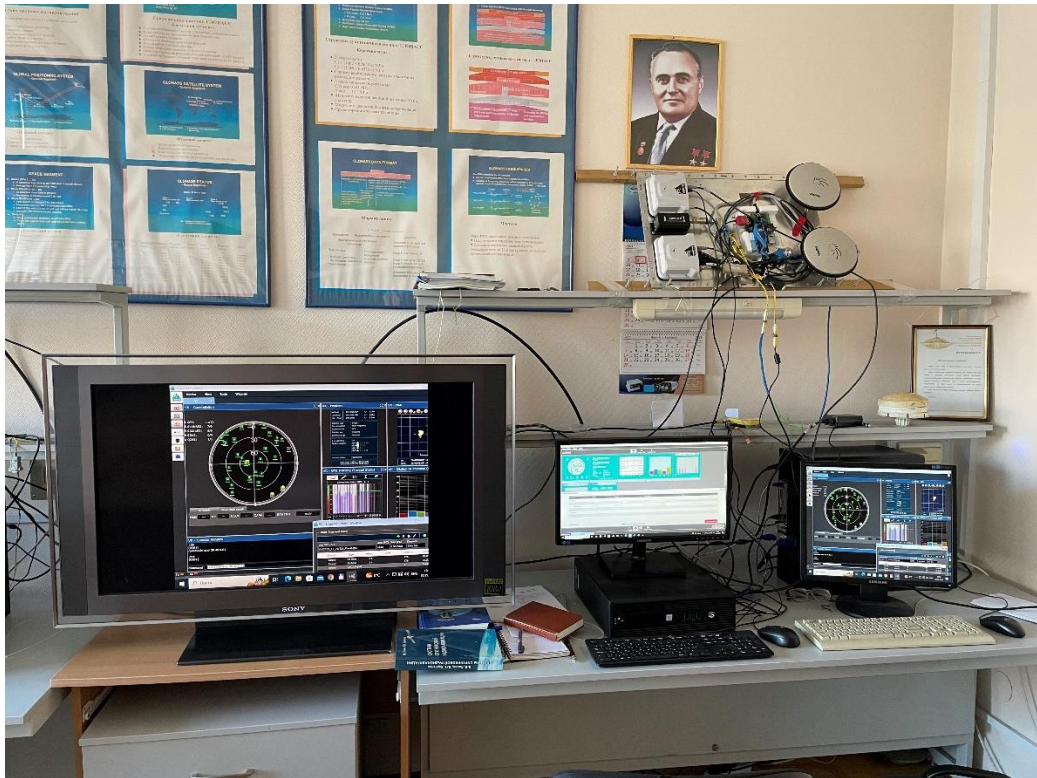


Рисунок 4.1 – Експериментальний стенд

Для оцінки RAIM в OEM 719 використовуються повідомлення Message ID: 42 (BESTPOS) і Message ID: 1286 (RAIMSTATUS). Формати повідомлень наводяться в розділах 3.17 BESTPOS і 3.145 RAIMSTATUS додатка 1.

Стандартний формат повідомлення 42 складається із заголовка (поле 1 BESTPOS, header), змісту повідомлення (поля 2, 3, ..., 22), перевірного коду (поле 23, 32-bit CRC).

Стандартний формат повідомлення 1286 складається із заголовка (поле 1 RAIMSTATUS, header), змісту повідомлення (поля 2, 3, ..., 10), перевірного коду (поле 12, 32-bit CRC).

Заголовок повідомлення наведено в розділі 1.3 Бінарі.

Компоненти заголовка, на які слід звернути увагу під час декодування: номер повідомлення (поле 5, Message ID, після розшифрування має бути цифра 1451), номер GPS тижня (поле 12, Week), час GPS (поле 13, ms, під час розшифрування час переводити в секунди).

Розглянемо основні компоненти повідомлення 42 (див. додаток 1). У полі 2 (sol stat) записується статус рішення. Параметр кодується згідно з Table 90: Solution Status (див. додаток 1). Наприклад, якщо в бінарному вигляді код = 0, то рішення вважається отриманим.

а) У полі 3 (pos type) записується код позиції або типу швидкості, за яких виробляється рішення згідно з Table 91: Position or Velocity Type (див. додаток 1).

б) У поля 4,5,6 записуються широта, довгота і висота позиції користувача на поточний момент часу.

в) У поля 9, 10, 11 записуються середньоквадратичні відхилення широти, довготи і висоти відповідно.

Розгорнуту інформацію про інші компоненти повідомлення 43 можна знайти в посібнику "OEM7 Commands and Logs Reference Manual v18A", July 2021.

Головними компонентами повідомлення Message ID: 1286 (RAIMSTATUS) є рівень горизонтального захисту HPL та рівень вертикального захисту VPL, що записуються в поля 5 та 7 (див. 3.145 RAIMSTATUS).

Повна інформація про інші компоненти повідомлення 1286 розміщена в посібнику "OEM7 Commands and Logs Reference Manual v18A", July 2021.

Для налаштування роботи автономного моніторингу цілісності приймача (RAIM) у приймачі OEM 719 використовується команда RAIMMODE, яка налаштовує режим функціонування RAIM відповідно до характеристик RTCA MOPS. Опис команди наведено в додатку 3 (2.122 RAIMMODE).

Режим RAIMMODE встановлюється за допомогою введення команди

RAIMMODE [hal [val [pfa]]]

де pfa (Pfa) - вірогідність хибного сповіщення, яка визначається як збій визначення місця розташування, тоді як цей збій не стався. Встановлення режиму RAIMMODE відбувається відповідно до вказівок додатка 3 (2.122 RAIMMODE) перед записом повідомлень 42 і 1286

- а) 1 Дослідження проводиться програмою 2021_RAIM_BEST.
- б) Файли та функції програми наведено на рис. 4.2

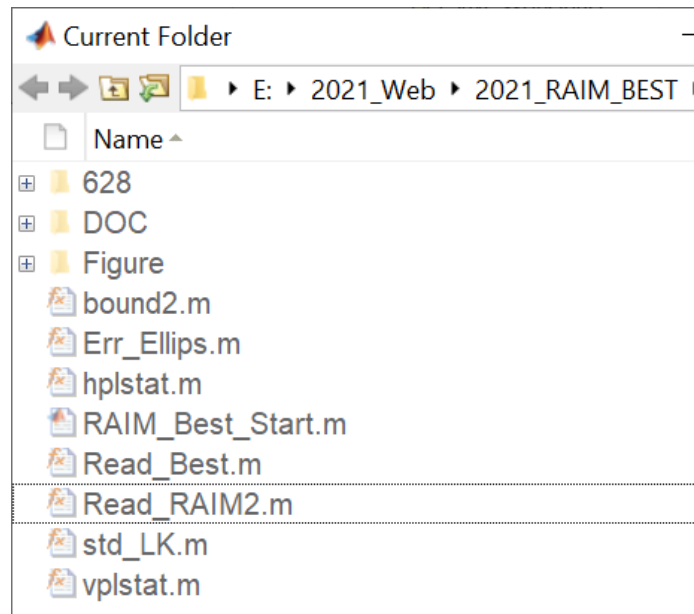


Рисунок 4.2 – Файли та функції програми 2021_RAIM_BEST

Папка 628 містить вхідні файли для обробки.

Папка Figure призначена для збереження графіків.

`function` [HPL VPL Time] = Read_RAIM2(fid) декодує повідомлення 1286.

`function` [Lat Lon h Lat_sigma Lon_sigma h_sigma TimeGPS] =...

`Read_Best`(fid) декодує повідомлення 42.

`function` vplstat(VPL,VPE,VAL1,VAL2,src_name),

`function` hplstat(HPL,HPE,HAL,src_name),

`function` [index] = bound2(percent, data, total) функції для зображення стеффордських діаграм,

`function` [MO, MSG, MSG0] = std_LK(kol, x) функція для розрахунку статистичних даних,

`function Err_Ellips(X, Y, File, M, nameX, nameY)` функція для розрахунку еліпса похибок.

а) Для проведення дослідження необхідно встановити режим RAIMMODE і записати в бінарному вигляді повідомлення Message ID: 42, Message ID: 1286 і помістити їх у папку 628.

б) У програмі 2021_RAIM_BEST відкрити стартовий файл RAIM_Best_Start.m і ознайомитися з кодом.

У рядок 11 `Dat_In_GPS= '628\BestRaim01_04.BIN';` записується досліджуваний файл.

Рядки 18-31 формують імена 14 фігур з обробленою графічною інформацією.

Рядки 33-49 - обнулення масивів.

Рядки 61-65 - читання і запис у масиви даних повідомлення 1286.

Рядки 67-72 - читання і запис у масиви даних повідомлення 42.

Рядок 87 - перетворення позиції в топоцентричну систему координат стандартною функцією MatLab.

Рядки 88, 89 - обчислення помилок у горизонтальній площині та по вертикалі відповідно.

Рядки 96, 104 - побудова стенфордських діаграм.

Рядки 98, 106 - запис стенфордських діаграм.

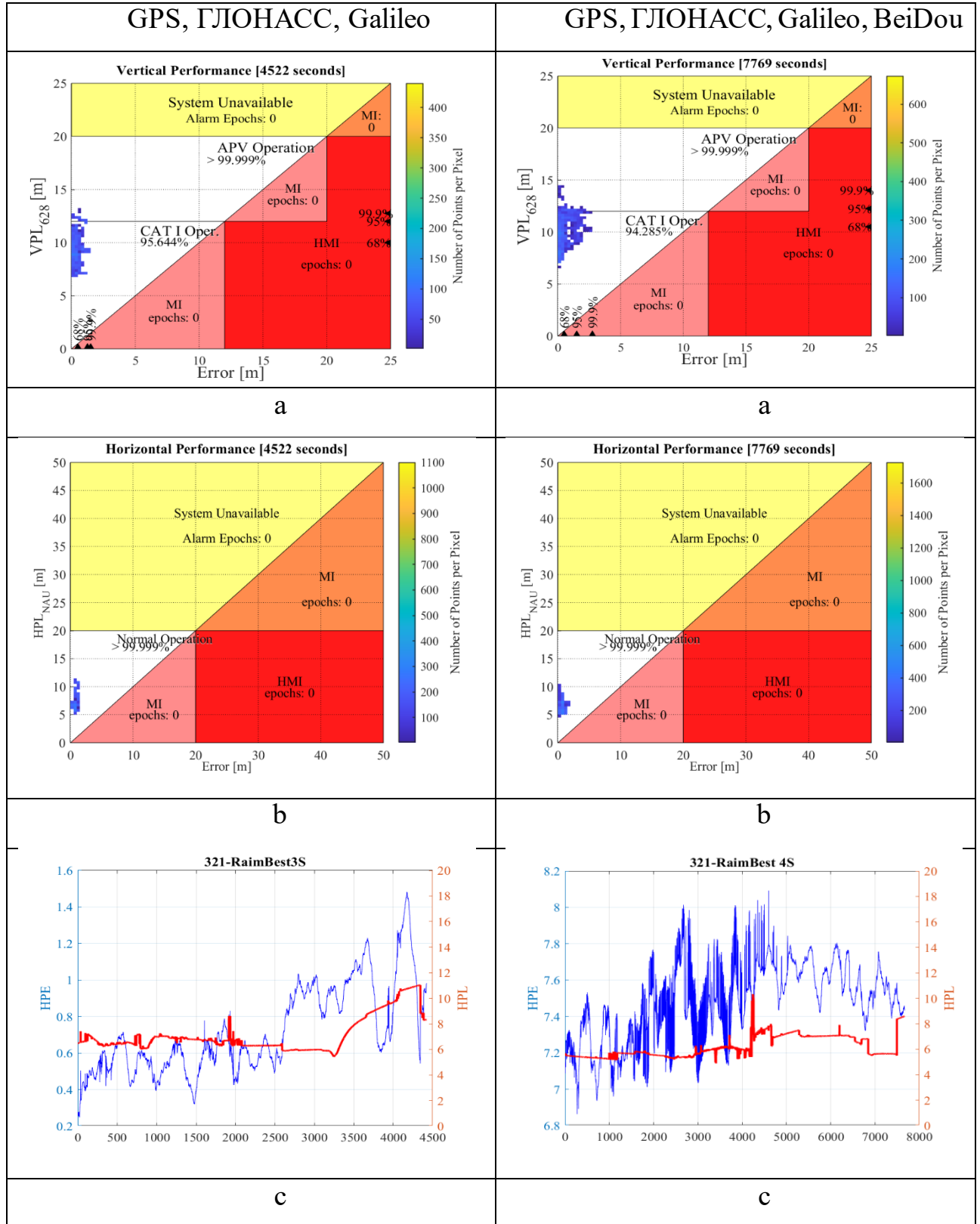
Рядки 108-232 - опрацювання даних методом ковзного вікна, побудова і запис графіків.

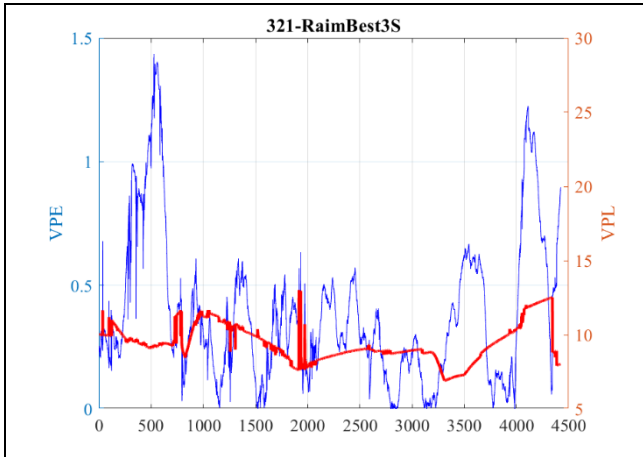
Рядки 233-235 - побудова еліпсів помилок.

Рядки 4, 237- 241 - час розв'язання задачі.

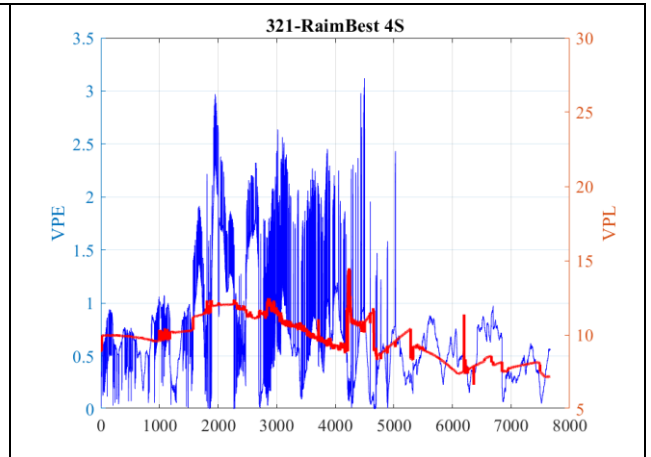
На рис. 4.3 представлено результати опрацювання експериментальних даних за характеристиками захисту. Результати відносяться до параметрів, записаних одночасно під час інтеграції GPS, ГЛОНАСС, Galileo (1 система) і GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou (2 система). Дані записувалися при підключенні двох навігаційних приймачів до однієї антени. Координати антени прив'язано з

геодезичною точністю. Вимірювання проводилися 20.11.2023. Для систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo характеристики записувалися протягом 4522 секунд, для GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou - протягом 7769 секунд.

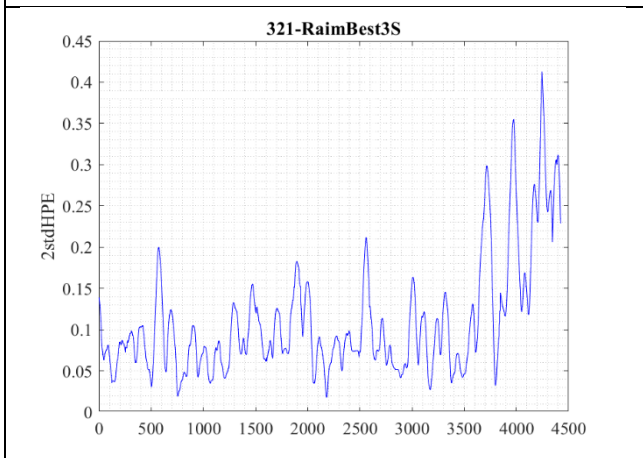




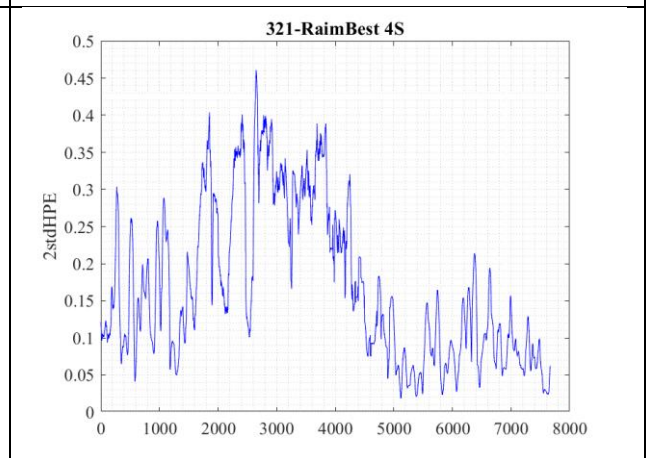
d



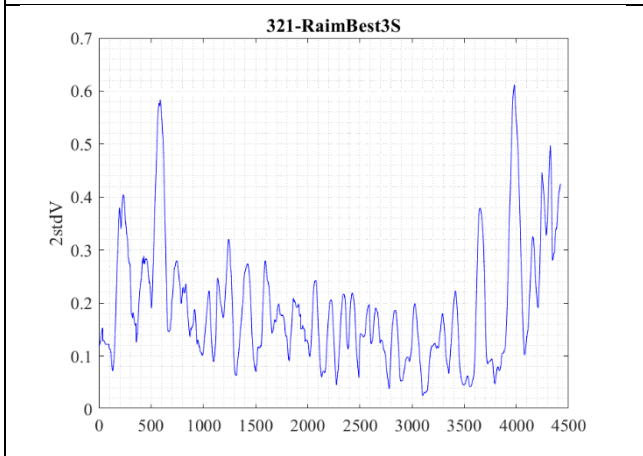
d



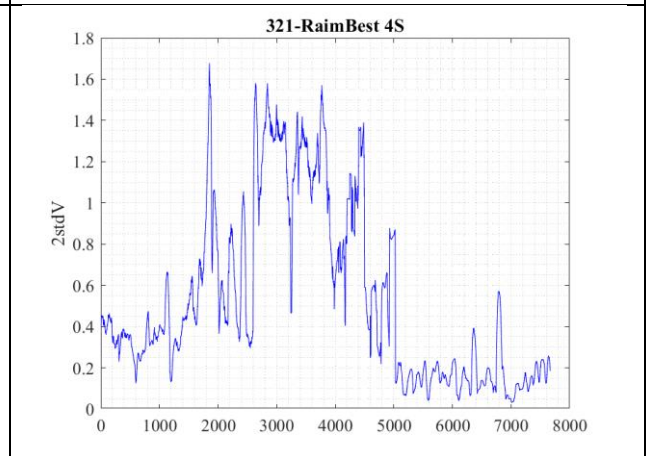
e



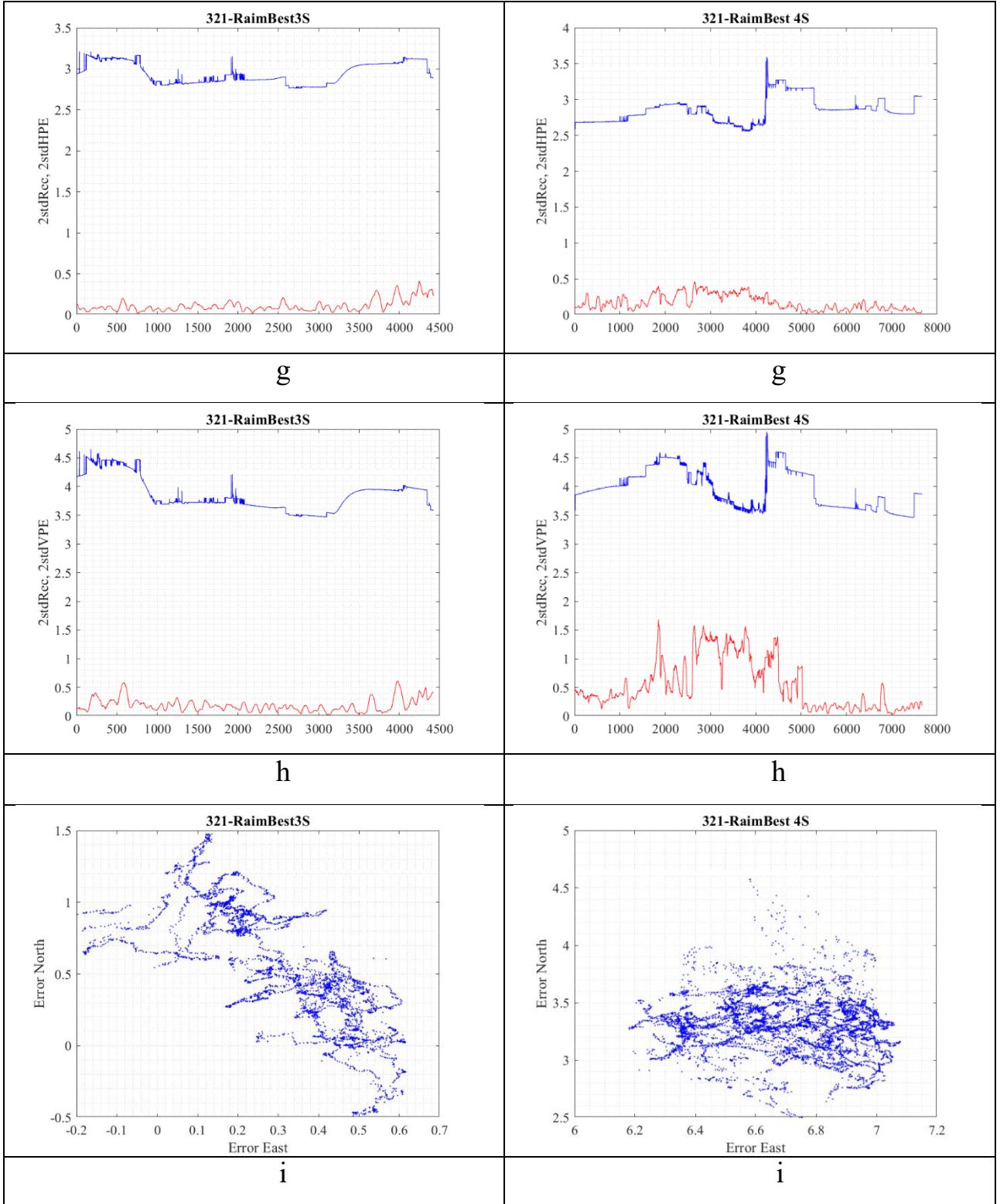
e

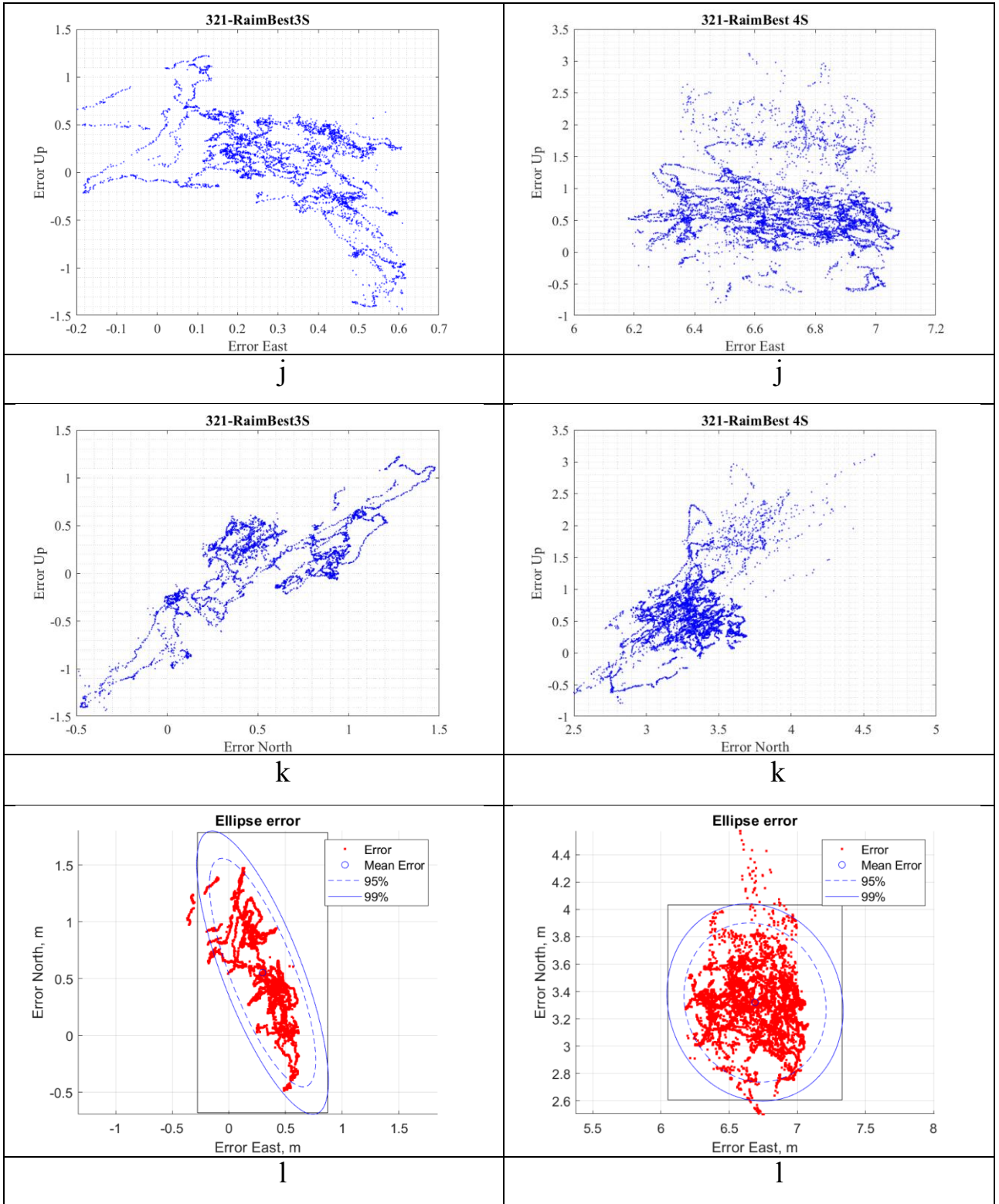


f



f





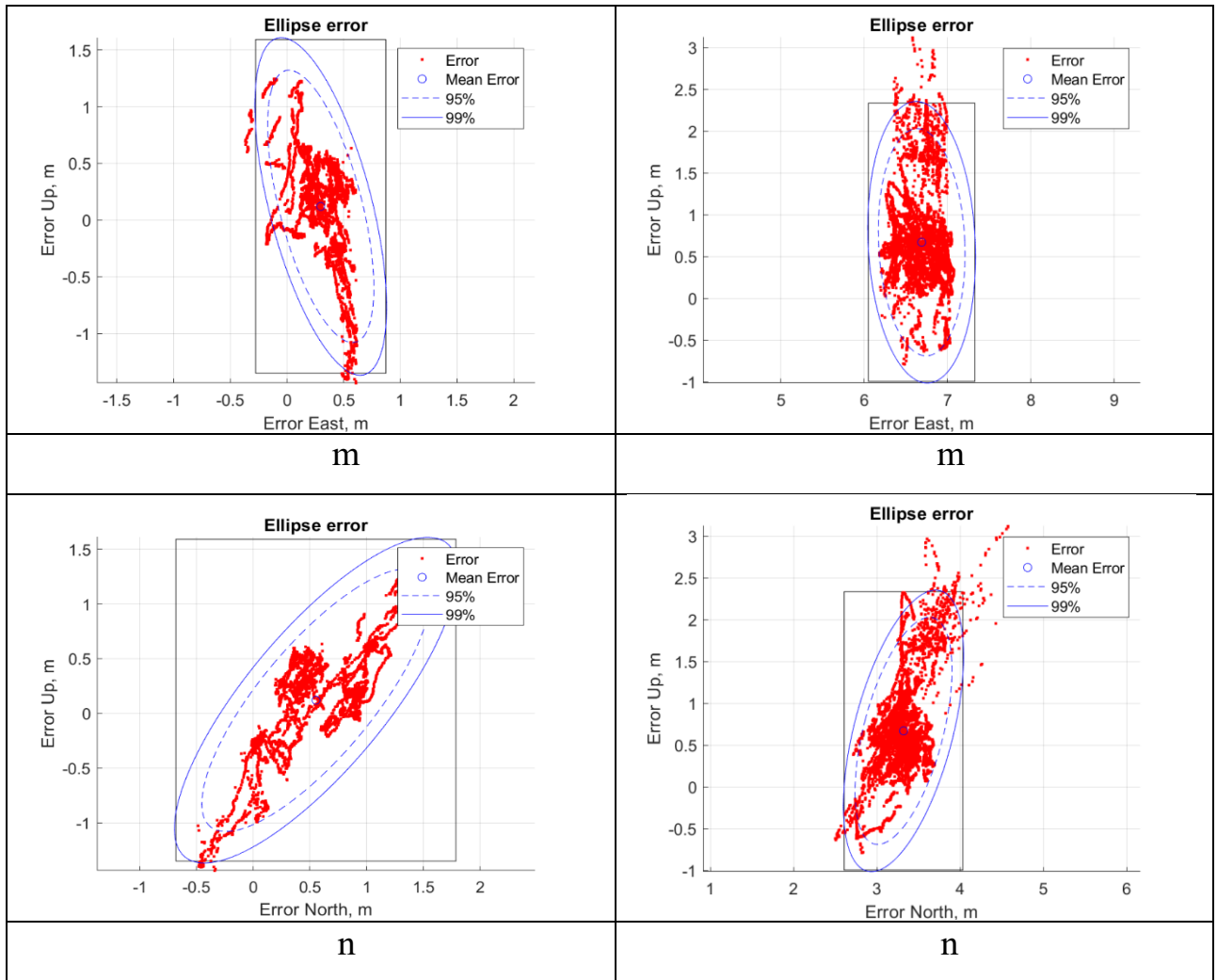


Рисунок 4.3 – Експериментальні характеристики захисту

Дані рис. 4.3 характеризують наступне:

Рис. 4.3,а - захисні рівні у вертикальній площині дають змогу на заданому інтервалі часу виконувати операції посадки за CATL 1 у 95.644% для першої системи і в 94.285% для другої. Доступність операцій для посадки з вертикальним наведенням (APV) - понад 99.999%.

Рис. 4.3,б - доступність операцій для посадки в горизонтальній площині для CAT 1 понад 99.999%.

Рис. 4.3,с - помилка в горизонтальній площині (HPE, синій, шкала ліворуч), захисний рівень у горизонтальній площині (HPL, червоний, шкала праворуч).

Рис. 4.3,д - помилка у вертикальній площині (VPE, синій, шкала ліворуч), захисний рівень у горизонтальній площині (VPL, червоний, шкала праворуч).

Рис. 4.3, d і e - середньоквадратичні відхилення (дві сигми) для горизонтальної та вертикальної площин відповідно.

Рис. 4.3,g і h - середньоквадратичні відхилення (дві сигми) для горизонтальної та вертикальної площин відповідно, вироблені приймачем і розраховані за реальними вимірами.

Рис. 4.3,i - помилки в площині схід-північ.

Рис. 4.3,j - помилки в площині схід-вгору.

Рис. 4.3,k - помилки в площині північ-вгору.

Рис. 4.3, l, m, n - еліпси помилок для площин схід-північ, схід-вгору, північ-вгору відповідно для (двох і трьох сигма).

За виконаними дослідженнями можна зробити висновки:

а) друга система, що складається з GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, має гірші захисні рівні порівняно з першою системою. Однак, не можна стверджувати, що це остаточний висновок. Необхідно провести подальші дослідження, виявити внесок кожного сузір'я в характеристики захисних рівнів і набрати статистику;

б) обидві системи з певними обмеженнями можуть використовуватися для посадки.

ВИСНОВОКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У четвертому розділі представлено результати експериментальних досліджень моделі системи посадки на основі даних, отриманих від приймачів OEM 719 під час інтеграції сигналів GPS, ГЛОНАСС, Galileo (перша система) та GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou (друга система). Вимірювання проводились 20.11.2023р протягом 4522 с для першої та 7769 с для другої систем.

Аналіз захисних рівнів у вертикальній площині показав, що перша система забезпечує можливість виконання операцій посадки за CAT I у 95,644% випадків, а друга – у 94,285%. Доступність операцій для посадки за APV (Approach with Vertical guidance) для обох систем перевищує 99,999%.

В горизонтальній площині доступність операцій посадки за CAT I для обох систем становить понад 99,999%. Максимальне значення HPL (Horizontal Protection Level) склало 12,3 м для першої та 16,7 м для другої системи. Максимальна HPE становила 7,2 м та 8,9 м відповідно.

Аналіз СКВ підтвердив адекватність оцінок точності, що формуються приймачами - розбіжності між розрахованими та вимірними СКВ не перевищили 18% по горизонталі та 14% по вертикалі.

Еліпси похибок свідчать, що систематична складова переважає у вертикальній площині, а випадкова - у горизонтальній. Співвідношення півосей еліпсів складає 1:2...1:4. Це узгоджується із характерним розподілом похибок у системах даного класу.

Отже, за результатами експериментальних досліджень можна зробити висновок, що розроблена модель системи посадки на основі інтегрованої обробки сигналів GPS, ГЛОНАСС, Galileo та GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou з високою ймовірністю може бути застосована для забезпечення посадки літальних апаратів за метеомінімумом CAT I. Внесок додаткового сузір'я BeiDou в даний час викликає незначне погіршення характеристик, проте з розвитком системи аналогічний вплив може бути компенсовано.

Для остаточних висновків необхідно провести подальші комплексні дослідження з визначення внеску кожного сузір'я в сумарну похибку та накопичити репрезентативну статистику за різних умов.

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Охорона праці при виконанні професійних обов'язків

Охорона праці - це система правових, соціально-економічних і організаційно-технічних заходів, а також санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини у процесі праці. (відповідно до Закону України "Про охорону праці" ст. 1) Відповідно до ст. 2 Закону "Про охорону праці" дія Закону "Про охорону праці" поширюється на всі підприємства, організації та установи, незалежно від форм власності і видів їх діяльності, на всіх громадян, які працюють, а також на тих, хто залучається до роботи на цих підприємствах.

Відповідно до статті 4 Закону України "Про охорону праці", державна політика в галузі охорони праці визначається відповідно до Конституції України Верховною Радою України і спрямована на створення належних, безпечних і здорових умов праці, запобігання нещасним випадкам та професійним захворюванням.

За невиконання законів та інших нормативно-правових актів про охорону праці, перешкоджання роботі посадових осіб органів державного нагляду за охороною праці, а також представників професійних спілок, їх організацій та об'єднань винні особи притягаються до кримінальної, дисциплінарної, адміністративної, матеріальної відповідальності згідно із законом (стаття 44 Закону "Про охорону праці").

Наземний персонал аеропорту може наражатися на різні види фізичних небезпек, залежно від конкретних робочих функцій. Найбільш значні професійні небезпеки можуть включати: стрес, пов'язаний з перенесенням важких вантажів; повторювані рухи, пов'язані з операціями з обслуговування безпілотних літальних апаратів; зіткнення з обертовими частинами БПЛА (особливо з відкритими обертовими гвинтами), наземними транспортними засобами, вантажними або літаковими безпілотниками під час руління, зльоту і, особливо,

при здійсненні ними посадки; вплив погодних умов. Працівники також можуть наражатися на небезпеку від реактивних двигунів.

5.2 Правила переміщення обладнання

Оператори повинні забезпечити розміщення попереджувальних знаків і маркування на допоміжних поверхнях для руху і стоянки наземних транспортних засобів, стоянках повітряних суден, руліжних доріжках і в будь-яких інших місцях, де існує ризик зіткнення наземних транспортних засобів з повітряними суднами.

Визначені зони підвищеного ризику повинні включати зони розрідження під час роботи реактивних двигунів для захисту працівників, які обслуговують повітряні судна.

а) Керівники (супервайзери) повинні забезпечити підготовку та сертифікацію всіх працівників, які мають доступ до аеродромних робіт. Працівники, які беруть участь в експлуатації допоміжного обладнання повітряних суден, повинні бути ознайомлені з правилами забезпечення безпеки робіт в зонах стоянок повітряних суден і на руліжних доріжках, в тому числі зі способами зв'язку з диспетчерською вишкою.

б) Необхідно підтримувати в справному стані допоміжні пристрої безпеки наземних транспортних засобів, включаючи звукові сигнали заднього ходу, огороження, що рухаються, і вимикачі аварійної зупинки.

в) Не встановлюйте мультикоптер із закрученими гвинтами! Гвинти є джерелом підвищеної небезпеки!

г) У разі зовнішнього механічного пошкодження виділяється вибухонебезпечний газ! Не можна використовувати набряклу батарею!(Рисунок 4.1)



Рисунок 5.1 – Вигорівша батрея

5.3 Інструкції з техніки безпеки під час експлуатації електрообладнання

- а) Інструкція поширюється на всі підрозділи підприємства.
- б) Згідно з цією інструкцією персонал повинен проходити навчання перед початком роботи (первинний інструктаж), а потім кожні 3 місяці (повторний інструктаж).
- в) Власник повинен застрахувати персонал від нещасних випадків та професійних захворювань.
- г) За невиконання цієї інструкції персонал несе дисциплінарну відповідальність, матеріальну, адміністративну та кримінальну відповідальність.
- д) До самостійного обслуговування електроустановок допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд і не мають медичних протипоказань, які пройшли спеціальне навчання, атестацію і мають відповідне посвідчення, які пройшли вступний інструктаж з охорони праці, стажування на робочому місці та інструктаж з питань пожежної безпеки.
- е) Працівники, які обслуговують електроустановки, повинні мати відповідну групу з електробезпеки.

ж) Посвідчення про перевірку знань працівника є документом, який засвідчує право на самостійну роботу в електроустановках на зазначеній посаді за професією.

з) Під час виконання службових обов'язків працівник повинен мати при собі посвідчення про перевірку знань. За відсутності посвідчення або за наявності посвідчення з простроченим терміном перевірки знань працівник до роботи не допускається.

и) Посвідчення про перевірку знань підлягає заміні у разі зміни посади або відсутності місця для записів.

Вимоги безпеки перед виконанням робіт:

а) Перевірити і надіти засоби індивідуального захисту (спецодяг, спецвзуття тощо). Спецодяг електрика повинен бути добре підігнаний і застебнутий, так як подоли і рукава можуть бути захоплені рухомими частинами механізмів і машин. На голові обов'язково повинен бути головний убір.

б) Оглянути робоче місце і перевірити справність роботи вентиляційних систем, відсутність несправностей в роботі електрообладнання, яке підлягає технічному обслуговуванню, наявність і справність засобів пожежогасіння, засобів колективного захисту, наявність необхідного для роботи інструменту.

в) Видалити з робочої зони сторонніх осіб, звільнити робоче місце від зайвих предметів і матеріалів, огородити робочу зону і встановити знаки безпеки.

г) Перед виконанням робіт з підвищеною небезпекою, які проводяться за нарядом або розпорядженням-допуском, переконатися в правильності оформлення документації, пройти цільовий інструктаж і виконати заходи, передбачені розпорядженням-допуском, нарядом, вимогами правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Вимоги безпеки під час роботи:

а) Забороняється самостійно відкривати електричні шафи, обладнання, проводити будь-який ремонт електрообладнання, відкривати (знімати) блокувальні та захисні пристрої.

б) У разі необхідності, якщо це передбачено інструкцією, користуватися електрозахисними засобами. Захисні засоби повинні бути випробувані і мати спеціальний штамп про проведення випробування.

в) Електротехнічний персонал, який виконує роботи поблизу струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, повинен розташовуватися так, щоб ці струмоведучі частини були перед ним тільки з одного боку. Забороняється виконувати роботи, якщо струмоведучі частини, що знаходяться під напругою, розташовані позаду або з обох боків від працівника.

г) Затверджені переліки робіт зі зняттям і без зняття напруги, які виконуються електротехнічним персоналом на закріпленій дільниці протягом однієї зміни в порядку поточної експлуатації та за нарядами на електроустановках напругою до 1000 В, а також затверджені переліки робіт, які виконуються за нарядом.

д) Під час виконання робіт у колах вимірювальних приладів і пристроїв релейного захисту всі вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму і напруги повинні бути постійно заземлені.

е) Не дозволяється знімати огороження тих частин електродвигунів, які обертаються під час роботи електродвигуна.

Вимоги безпеки після закінчення роботи:

а) Вимкніть електрообладнання та прилади, які використовувалися під час роботи.

б) Зібрати деталі, матеріали, інструменти, пристосування, привести їх у належний стан (почистити, протерти), прибрати інструменти та пристосування у відведене місце.

в) Прибрати робоче місце, зібрати відходи в урну і винести її з приміщення у відведене місце.

г) Зняти і прибрати у відведене місце спецодяг та інші засоби індивідуального захисту, які використовувалися під час роботи.

Вплив погоди на умови праці

Керівники операторів повинні навчати працівників, як запобігти стресу від високої або низької температури, в тому числі, як виявити ранні симптоми і як їх запобігти (наприклад, пити воду, відпочивати). Працівники повинні бути забезпечені відповідним одягом і рідиною для запобігання стресу, пов'язаного з погодними умовами, а також дотримуватися інших відповідних рекомендацій щодо температурних умов праці, викладених у загальних настановах з охорони здоров'я, безпеки та гігієни праці.

5.4 Охорона праці та безпека місцевого населення

Заходи щодо захисту здоров'я місцевого населення та впливу на безпеку під час експлуатації, будівництва та виведення з експлуатації заводів з виробництва дронів та іншого електронного обладнання аналогічні заходам, що застосовуються для більшості промислових підприємств і розглядаються в загальних рекомендаціях з охорони праці.

До небезпечних і шкідливих виробничих факторів, характерних для експлуатації безпілотників, відносяться, перш за все

- а) Шум
- б) Джерела фізичної безпеки
- в) Джерела хімічної безпеки

Вказівки щодо запобігання та контролю поширених фізичних, хімічних, біологічних та радіологічних небезпек також наведені в Загальних настановах з охорони праці та здоров'я (EHS). Професійні небезпеки повинні бути охоплені системою безпеки, що включає в себе інші відповідні аспекти безпеки польотів на повітряних суднах. Стратегії охорони здоров'я та безпеки, що застосовуються у випадку операторів аеропортів, залежать від трудових відносин з потенційно

постраждалими працівниками, багато з яких можуть працювати в авіакомпаніях або на наземному обслуговуванні.

ВИСНОВОКИ ДО РОЗДІЛУ 5

Основними законодавчими актами з охорони праці є Закони України: "Про охорону праці", "Про охорону здоров'я", "Про пожежну безпеку", "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення", Кодекс законів про працю (КЗпП) та державні міжгалузеві і галузеві нормативні акти, які є обов'язковими для виконання всіма державними та недержавними установами на всій території України.

2. Згідно з великою кількістю зібраної статистичної інформації, однією з основних причин електротравматизму є ураження електричним струмом, тому важливим аспектом є приділення достатньої уваги встановленню та дотриманню правил охорони праці при роботі з електричним струмом. Було приділено увагу розрахунку контурного заземлення для ділянки, де розташоване електрообладнання.

3. Розглянуто основні групи профілактичних заходів для уникнення травматизму. Висвітлено засоби та заходи захисту від ураження електричним струмом, травм та нещасних випадків.

4. Описано основні інструкції по роботі з різними видами електрообладнання, враховано особливості підготовки нормативної бази.

РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Екологічна ситуація на планеті критична: щорічно зникають десятки видів тварин і рослин, висихають річки й озера, неухильно скорочується площа лісу - головного джерела кисню на планеті. Виникнення найгостріших глобальних екологічних проблем багато в чому спровоковано прогресом і стрімким розвитком техногенного середовища проживання. Однак досягнення технічного прогресу можуть стати на захист екології: для спостережень в екологічній сфері дедалі частіше використовують дрони - всюдисущі та надійні помічники людини.

Завдання, які стоять перед нашими розумними помічниками - дронами, дуже різноманітні, і з усіма вони успішно справляються. Еко-дрони буквально стали "очима" і "вухами" влади, захисників довкілля, ентузіастів і вчених-екологів. Наприклад, у Китаї дрони допомагають боротися із забрудненнями навколишнього середовища, контролюючи промислові райони. Стрімке погіршення екологічної ситуації в країні, пов'язане з модернізацією економіки, бурхливим зростанням кількості промислових підприємств, заводів і фабрик - найгостріша проблема. Китай буквально задихається - забруднення повітря, особливо в мегаполісах, досягає катастрофічної позначки. Коптери, оснащені тепловізорами, патрулюють промислові території в нічний час для своєчасного виявлення незаконних хімічних викидів. У результаті цієї акції вже було виявлено десятки підприємств, які порушують правила утилізації промислових відходів.

В ОАЕ квадрокоптери уважно стежать за екологічним порядком: проводять аерофотозйомку в пустелі, місцях відпочинку і на вулицях міст, фотографуючи порушників, які викидають сміття в недозволених місцях. Безпілотник передає інформацію, отриману за допомогою аерозйомки, поліцейським, які виписують хуліганам штрафи.

В Африці дрони допомагають рейнджерам і волонтерам захищати диких тварин від браконьєрів. Проєкт "Повітряний пастух" продемонстрував небувалу

ефективність - в окремих районах кількість злочинів вдалося знизити на 97%, причому без залучення сотень співробітників і добровольців.

У лісовому господарстві квадрокоптери допомагають проводити класифікацію та інвентаризацію лісових насаджень, оцінювати ступінь ерозії ґрунтів, виявляти наявні проблеми, наприклад, захворювання дерев і нашествия шкідників, і, найголовніше, вчасно повідомляти про випадки загорянь. Лісові пожежі, які щорічно призводять до загибелі багатьох тисяч гектарів лісу, - одна з найсерйозніших сучасних проблем. За допомогою безпілотних літальних апаратів, що передають інформацію в режимі реального часу, можна своєчасно виявляти навіть дрібні осередки загоряння, швидко ліквідувати їх, зберігаючи "легені планети". Безпілотники також допомагають точно оцінювати ступінь пошкодження лісових насаджень завдяки фото і відео найвищої роздільної здатності, зроблених з висоти пташиного польоту.

У нафтогазовій галузі безпілотники допомагають контролювати й оцінювати стан довкілля в районах видобутку і транспортування, повідомляти про пошкодження трубопроводів, виникнення витоків і розливів нафти.

Дрони добираються навіть туди, куди людині шлях категорично заборонений, наприклад, у Чорнобиль. Віднедавна українські безпілотні літальні апарати допомагають вченим проводити екологічний моніторинг, оцінювати біорізноманіття та отримувати оперативну інформацію про ситуацію в зоні відчуження.

Дистанційні методи дослідження за допомогою БПЛА допомагають провести оцінку стану екологічного стану віддалених і важкодоступних територій, а саме: дослідити природні та антропогенні процеси, визначити джерела забруднень і планувати природоохоронні заходи.

Дронами можна контролювати сотні квадратних кілометрів місцевості, природоохоронних зон, водночас значно економляться час, гроші та людські ресурси (не потрібно залучати для робіт велику кількість фахівців).

Галузі застосування БПЛА для моніторингу екологічної безпеки:

- а) Контроль промислових об'єктів і територій поруч із підприємствами.
- б) Виявлення несанкціонованих і незаконних звалищ.
- в) Контроль метеообстановки.
- г) Аналіз газового складу повітря.
- д) Оперативна інспекція довкілля під час НС і техногенних катастроф.
- е) Перевірка стану лісових територій і водойм.
- ж) Виявлення браконьєрів, незаконних вирубок лісу.

Застосування БПЛА дає змогу зібрати детальну інформацію про об'єкт і територію досліджень, обробити й проаналізувати дані, використовуючи ПЗ.

ВИСНОВОКИ ДО РОЗДІЛУ 6

Застосування дронів дає значні переваги для вирішення нагальних екологічних проблем та здійснення моніторингу стану довкілля. Вони допомагають оперативно виявляти порушення, забруднення, незаконні скиди шкідливих речовин, пожежі та інші негативні явища, а також оцінювати наслідки для екосистем.

Переваги дронів: швидкість реагування, мобільність, здатність проводити зйомку важкодоступних місць, економія людських і матеріальних ресурсів для моніторингу великих територій. Порівняно з пілотованою авіацією у БПЛА є низка переваг для проведення моніторингу екологічної ситуації. Дрони можуть максимально наблизитися до об'єкта навіть у складних кліматичних умовах і передати актуальні дані з безпечної для пілота відстані. До того ж використовувати безпілотник економічно доцільніше, ніж літак або вертоліт.

Можливість дистанційно отримати докладну інформацію про стан довкілля та аналізувати її за допомогою ПЗ.

Отже, застосування безпілотних технологій істотно розширює можливості у сфері екологічного контролю та охорони навколишнього середовища.

ВИСНОВКИ

У даній роботі було проведено комплексне дослідження методів та засобів забезпечення посадки повітряних суден за приладами.

У першому розділі проаналізовано можливості традиційних радіотехнічних систем посадки типу ILS, MLS, VASI/PAPI. Показано, що вони дозволяють здійснювати заходи на посадку з високою точністю, проте мають обмеження за пропускнуою спроможністю, вартістю та складністю.

У другому розділі розглянуто перспективу використання супутникових радіонавігаційних систем, зокрема GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou та їх функціональних доповнень. Проаналізовано характеристики глобальних, регіональних та локальних систем. Показана можливість забезпечення посадки літаків за I категорією ICAO з використанням технології GBAS.

У третьому розділі досліджено методи забезпечення цілісності та побудови захисних рівнів у системах функціональних доповнень GNSS. Запропоновано використовувати для БПЛА у якості захисної поверхні еліпсоїд обмеження.

У четвертому розділі представлено результати експериментальних досліджень запропонованої моделі інтегрованої системи посадки на основі обробки сигналів GPS, ГЛОНАСС, Galileo та GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou. Підтверджено можливість її застосування для посадки літальних апаратів у складних метеоумовах з ймовірністю 95-99%.

У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці при експлуатації радіотехнічного обладнання, проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори. Запропоновано заходи з електробезпеки та попередження травматизму.

В шостому розділі показана актуальність застосування безпілотних літальних апаратів для вирішення екологічних завдань та моніторингу навколишнього середовища.

Отже, у роботі комплексно досліджено точність двох систем. Запропоновано використовувати інтегровану обробку сигналів від декількох глобальних

навігаційних систем з побудовою спеціальних захисних рівнів. Експериментально підтверджено ефективність такого підходу.

Результати досліджень можуть бути використані для розробки перспективних засобів посадки літаків та безпілотних літальних апаратів за складних метеоумов, підвищення точності, доступності та безпеки польотів. Запропоновані методи дозволяють реалізувати концепцію всепогодних операцій.

Перспективи подальших досліджень полягають у накопиченні репрезентативної статистики за різних умов поширення радіохвиль, уточненні моделей похибок та аналізі внеску окремих джерел в сумарну похибку визначення місцеположення.

Отже, у роботі запропоновано нові технічні рішення щодо радіонавігаційного забезпечення посадки повітряних суден за приладами на основі інтеграції сигналів супутникових навігаційних систем з побудовою спеціальних захисних рівнів. Це дозволяє реалізувати концепцію всепогодних польотів та посадок і підвищити безпеку авіації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. GNSS Double Differences Used as Beacon Landing System for Aircraft Instrument Approach / T. Dautermann та ін. International Journal of Aeronautical and Space Sciences. 2021.
2. Loh R. GPS Wide Area Augmentation System (WAAS). Journal of Navigation. 1995. Т. 48, № 2. С. 180–191.
URL: <https://doi.org/10.1017/s0373463300012649>
3. SC-159 R. (. Minimum operational performance standards for GPS local area augmentation system airborne equipment. Washington, DC : RTCA, 2008.
4. Hofmann – Wellenhopf, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., 2008. GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, GALILEO and more. Springer, WienNew York. 516 pages.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. 3-е изд., переработанное / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова – М.: Радиотехника, 2010. 688 с.
6. RTCA DO-245A. (2004). Minimum Aviation System Performance Standards for the Local Area Augmentation System (LAAS)
7. R. Odolinski, P. J. G. Teunissen & B. Zhang (2020) Multi-GNSS processing, positioning and applications, Journal of Spatial Science, 65:1, 3-5, DOI: 10.1080/14498596.2020.1687170
8. В. В. Конин и В. П. Харченко, “Системы спутниковой радионавигации: монография.” Киев: ХОЛТЕХ 2010.
9. European GNSS Agency. (2016). European GNSS (GalilEo) open service signal-in-space interface control document. Issue 1.3
10. China Satellite Navigation Office. (2017). BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signals B1C and B2a (Test Version)

- 11.Международная организация гражданской авиации.(2006). Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Том I. Авиационная электросвязь. Издание шестое.
- 12.FAA-E- 2892b. (2001). U.S. department of transportation federal aviation administrationwide area augmentation system (WAAS).
- 13.Международная организация гражданской авиации. (2017). Глобальная навигационная спутниковая система(GNSS) Руководство. Третье издание.
- 14.EGNOS. (2018).Safety of Life (SoL)Service Definition Document. Issue 3.3
- 15.Instrument landing system. Aircraft Communications and Navigation Systems. 2013. С. 165–168. URL: <https://doi.org/10.4324/9780080941523-80>
- 16.Microwave landing system. [Washington, D.C.: Federal Aviation Administration], 1994. 40 с.
- 17.FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Precision approach path indicator (PAPI) systems. Washington, D.C : U.S. Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, 1985. 20 с.

Додаток 1

Типова Операція	Точність у горизонтальній площині 95%	Точність по вертикалі 95%	Цілісність	Час до попередження	Безперервність	Експлуатаційна готовність
На маршруті	3,7 км (2,0 м. милі)	Не зазначена	$1 - 1 * 10^{-7}/ч$	5 хв	$1 - 1 * 10^{-4}/ч -$ $1 - 1 * 10^{-8}/ч$	0,99–0,99999
На маршруті, у зоні аеродрому	0,74 км (0,4 м. милі)	Не зазначена	$1 - 1 * 10^{-7}/ч$	15 с	$1 - 1 * 10^{-4}/ч$ $1 - 1 * 10^{-8}/ч$	0,99–0,99999
Початковий захід, проміжний захід, неточний захід (НРА), виліт	220 м (720 фут)	Не зазначена	$1 - 1 * 10^{-7}/ч$	10 с	$1 - 1 * 10^{-4}/ч$ $1 - 1 * 10^{-8}/ч$	0,99–0,99999
Захід на посадку з управлінням по вертикалі (АРV-I)	16,0 м (52 фут)	20 м (66 фут)	$1 - 2 * 10^{-7}$ за один будь-який захід	10 с	$1 - 8 * 10^{-6}$ За 15 с	0,99– 0,99999
Захід на посадку з управлінням по вертикалі (АРV-II)	16,0 м (52 фут)	8,0 м (26 фут)	$1 - 2 * 10^{-7}$ за один будь-який захід	6 с	$1 - 8 * 10^{-6}$ За 15 с	0,99–0,99999
Точний захід на посадку за категорією I (примітка 7)	16,0 (52 фут)	6,0-4,0 м (20-13 фут)	$1 - 2 * 10^{-7}$ за один будь-який захід	6 с	$1 - 8 * 10^{-6}$ За 15 с	0,99–0,99999