

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра авіоніки

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри

_____ Ю.В. Грищенко
«__» _____ 2022

**ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ
«МАГІСТР»**

**Тема: «Тривимірна візуалізація маршрутного польоту системи попередження
зіткнень»**

Виконавець: Поліщук Володимир Володимирович _____

Керівник: доцент Чужа Олексій Олександрович _____

Нормоконтролер: _____
(підпис)

В.В. Левківський
(П.І.Б)

Київ 2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Ю.В. Грищенко

«___» _____ 2022р

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи (проекту)

Поліщук Володимир Володимирович

1. Тема роботи: ‘Тривимірна візуалізація маршрутного польоту системи попередження зіткнень’, до наказу ректора від «13» 09 2022 №1413/ст.
2. Термін виконання роботи 05.09.2021 to 15.10.2021.
3. Вихідні дані роботи: Сучасні методи сканування місцевості та способи обробки зібраних даних для створення точних 3D мап високої роздільної здатності найбільш завантажених пасажирських авіарейсів. Впровадження 3D мап в різні польотні системи та їхні перспективи.
4. Зміст пояснювальної записки: Список скорочень; Вступ; Розділ 1: Фотограметрія; Розділ 2: LiDAR; Розділ 3: Зіткнення із землею в керованому польоті (CFIT); Розділ 4: Труднощі та особливості роботи в умовах поганої видимості та як 3D-мапінг може вирішити низку цих проблем; Розділ 5: Охорона навколишнього середовища; Розділ 6: Охорона праці
5. Перелік обов’язкового ілюстративного матеріалу: таблиці, рисунки, діаграми, графіки.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Обґрунтування теми дипломної роботи	16.09.2022	
2.	Проведення огляду літератури	17.09.2022	
3.	Підготовка та написання 1 розділу	17.09.2022	
4.	Підготовка та написання 2 розділу	23.09.2022	
5.	Підготовка та написання 3 розділу	29.09.2022	
6.	Підготовка та написання 4 розділу	02.10.2022	
7.	Підготовка та написання 5 розділу	06.10.2022	
8.	Підготовка та написання 6 розділу	08.10.2022	
9.	Оформлення та друк пояснювальної записки	10.10.2022	
10.	Підготовка презентації та доповіді	12.10.2022	
8.	Перевірка на анти плагіат та отримання рецензії на диплом	15.10.2022	

7. Консультанти з окремих розділів

Назва розділу	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв

8. Дата видачі завдання: ‘ ____ ’ _____ 2022

Керівник дипломної роботи _____
(підпис)

Чужа О.О.
(П.І.Б)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис)

Поліщук В.В.
(П.І.Б)

РЕФЕРАТ

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1: ФОТОГРАМЕТРІЯ	11
1.1 Фотограметрія за допомогою використання дрони.....	11
1.2 Специфіка вертолітної та НЛ фотограметрії.....	17
1.3 Вибір датчиків, обладнання та план польоту.....	19
1.4 Процедура фотограметричного процесу.....	26
1.5 Якість отриманого зображення, ортофотомозаїка та вартість.....	28
1.6 Порівняння цін на фотограметрію за допомогою жрона, літака та спутника на конкретному прикладі.....	30
1.7 BlenderGIS.....	38
РОЗДІЛ 2: LiDAR	40
2.1 LiDAR та його принцип роботи.....	40
2.2 LiDAR повної форми сигналу (Full Waveform).....	43
2.3 Обробка даних LiDAR.....	48
2.4 Батиметричний продукт LiDAR	49
2.5 Точність даних.....	50
2.6 Програма і алгоритм.....	51
2.7 LiDAR і фотограметрія.....	52
2.8 Порівняння ціни та якості LiDAR.....	56
РОЗДІЛ 3: ЗІТКНЕННЯ ІЗ ЗЕМЛЕЮ В КЕРОВАНОМУ ПОЛЬОТІ (CFIT)	64
РОЗДІЛ 4: ТРУДНОЩІ ТА ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ В УМОВАХ ПОГАНОЇ ВИДИМОСТІ ТА ЯК 3D-МАПІНГ МОЖЕ ВИРІШИТИ НИЗКУ ЦИХ ПРОБЛЕМ	72
4.1 Особливості зводу на посадку при CAT II/III	73
4.2 Впровадження даних LiDAR та фотограметрії в літакові системи.....	76
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	84

5.1 Проблематика сучасної авіації та її впливу на навколишнє середовище.....	84
5.2 Розрахунок площі сканування, а також висновки щодо впливу на навколишнє середовище.....	87
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	93
6.1 Пожежа у повітрі.....	93
6.2. Електричні пожежі.....	97
ВИСНОВОК.....	100
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	101

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ADI - Attitude Director Indicator

ADIRU - Air Data Inertial Reference Units

AGA – Above the Ground level Altitude

AHRS - Attitude and Heading Reference System

ASA – Above the Sea level Altitude

ASPIS - Advanced SPectroscopic Imaging System

BR – Burst Rate

BVLOS - Beyond Visual Lone of Sight

CAT – Category

CFIT - Controlled Flight Into Terrain

DSLR - Digital single-lens reflex camera

EAARL - Experimental Advanced Airborne Research LiDAR

EFIS - Electronic Flight Instrument System

EGPWS – Enhanced Ground Proximity Warning System

ELVOS - Extended Visual Line of Sight

FL – Focal Length

FLAASH - Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes

FMA - Flight Mode Annunciator

FMS - Flight Management System

Front_L – Front overlap

GCAS - Ground Collision Avoidance System

GNSS – Global Navigation Satellite System

GPS - Global Positioning System

GPWS – Ground Proximity Warning System

GSp – Ground Speed

GUI – Graphical User Interface

HITS - Highway-In-The-Sky

IATA – International Air Transport Association

ICP - Iterative Closest Point
ILS – Instrumental Landing System
ImD – Image Dimension
IMU – Inertial Measurement Unit
InT – Integration Time
IOSA – IATA Operational Safety Audit
ISO - International Organization for Standardization
LiDAR – Light Detection And Ranging
LQG - Linear Quadratic Gaussian
LQR - Linear Quadratic Regulator
MTOW - Maximum Take-Off Weight
ND – Neutral Density
NDVI - Normalized Difference Vegetation Index
OLS - Optical Landing System
PID - Proportional Integral Derivative
PPK – Post-Processing Kinematics
PWM – Pulse Width Modulation
RCF – Random Consensus Filter
RGB – Red Green Blue
RTK – Real-Time Kinematics
SfM - Structure from Motion
Side_L – Side overlap
SIFT - Scale-Invariant Feature Transform
SSz – Sensor Size
SVS - Synthetic Vision System
TAWS – Terrain Awareness Warning System
TEM - Threat and Error Management
TIN – Triangulated Irregular Network
VASIS - Visual Approach Slope Indicator System

VGSI - Visual Approach Slope Indicator System

VTOL – Vertical Take-Off and Landing

АТІС - автоматична термінальна інформаційна система

КФС – кіберфізична система

НЛ – надлегкий літак

УПР – управління повітряним рухом

ЦММ - цифрова модель місцевості

ШІ – штучний інтелект

ВСТУП

Протягом усієї історії авіації погода відіграла величезну роль у питанні «чи буде політ безпечним?». Турбулентність, ожеледь, сильний і непередбачуваний вітер, опади, блискавки, погіршення видимості тощо. Кожна з цих погодних умов впливає на безпеку польотів. З усіх них найбільше проблем викликає погіршення видимості. У деяких частинах світу, де погода змінюється дуже швидко, важко передбачити, коли всю територію вкриє туман. Польоти та зльоти за цих умов дозволені лише з певним обладнанням на борту літака та лише з кваліфікованими та навченими пілотами. За статистикою, 70% усіх затримок рейсів викликані поганими погодними умовами.

Аналізуючи причини, чому посадка літака в умовах поганої видимості настільки напружена і складна, ми можемо почати думати про те, як можна зробити цей процес безпечнішим і надійнішим. Експеримент Університету Іллінойсу показав, що посадка в умовах поганої видимості була дуже складним завданням навіть для досвідчених пілотів. Вони протестували двадцять пілотів з рейтингом Visual Flight Rule у імітованих погодних умовах. Усі двадцять пілотів втратили контроль, коли вони отримали візуальний орієнтир. У деяких випадках пілоти не змогли дотримуватися суворої процедури заходження на посадку в умовах обмеженої видимості. Однак за останні кілька років тестування стало кращим.

Впровадження фотограметрії та технології LiDAR в авіацію демонструє велику користь у підвищенні безпеки польотів. Обидві технології мають свої переваги та способи використання даних, але їх поєднання – найефективніший підхід. Багаторівневі 3D-карти високої роздільної здатності ділянок польоту надають пілотам візуальні орієнтири, оскільки ці карти показують точну видимість для пілотів місцевість незалежно від погодних умов поза бортом літака. Ситуаційна обізнаність є ключем до безпечного польоту, і коли є цифрова форма відображення реальної зони польоту, посадка літака, зліт а також політ в умовах недостатньої видимості стає менш напруженою та ризикованою.

РОЗДІЛ 1

Фотограметрія

Слово «фотограметрія» можна розділити на «фото» (світло), «грам» (малюнок) і «метрія» (вимірювання). Іншими словами – використання фотографій для вимірювання.

1.1 Фотограметрія за допомогою використання дронів.

Мережа дронів працює, будуючи замкнутий цикл, який складається із сприйняття необроблених даних, обміну інформацією, прийняття рішень і остаточного виконання. Ось чому дрони можна розглядати як кіберфізичну систему (КФС). Вбудовуючи кіберпроцеси у фізичні пристрої, КФС забезпечує тісний зв'язок між кібернетичними та фізичними доменами, що означає, що через замкнутий цикл можна забезпечити надійний і ефективний контроль, моніторинг і координацію фізичних тіл у реальному часі. Дані, отримані з фізичного світу, сприймаються датчиком, потім остаточне рішення, прийняте обчисленням і передане зв'язком, перетворюється на команди та, зрештою, впливає на фізичний світ через виконавчі механізми.

Сучасні дрони здатні оцінювати ефективність своїх дій за допомогою процесів зондування та обчислень і коригувати роботу на наступному циклі. Мережа дронів складається з чотирьох ключових елементів:

1) апаратне забезпечення, яке належить до фізичної області, безпосередньо взаємодіє як з фізичним, так і з кіберсвітом, сприймаючи дані, керуючи приводами, забезпечуючи зв'язок і обчислення.

2) програмне забезпечення – належить до кібердомену, включає інтегровані системи, програми та операційні алгоритми, використовується для маніпулювання обладнанням, аналізу вхідних даних та прийняття рішень.

КАФЕДРА АВІОНІКИ

Розробив	Поліщук В.В.			Тривимірна візуалізація маршрутного польоту системи попередження зіткнень	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник	Чужа О.О.					11	103
Н – контр.	Левківський В.В.				АВ-154-М		
Зав. каф.	Грищенко Ю.В.						

3) мережа бездротового зв'язку – належить до кібердомену, включає стандарти зв'язку, протоколи та модулі, відповідає за обмін інформацією між об'єктами системи.

4) служба може бути платформою – належати до кібердомену, може бути міжсистемним, міжплатформним і міждоменним інформаційним центром, включаючи розповсюдження, зберігання та аналіз даних, а також є спільною та інтегрованою платформою обслуговування даних.

Залежно від площі, яку повинен охопити дрон, можна вибрати різні конструкції антен зв'язку та їх кількість. Існує два типи антен, які можна використовувати: всеспрямовані та спрямовані. Обидва мають Недоліки та Переваги, але також можуть працювати разом. Всеспрямовані антени краще підходять для зв'язку у високомобільному середовищі, оскільки вони можуть передавати й отримувати дані з усіх боків, але схильні до витоків зв'язку та інших проблем безпеки.

Спрямовані антени мають набагато більший діапазон передачі даних, ніж всенаправлені антени, що призводить до меншої кількості стрибків і зменшення затримки. Кількість переходів — це кількість перехідних мережевих пристроїв, через які дані мають проходити від джерела до пункту призначення. Безпека даних краща, ніж у всеспрямованих антен. Рекомендується обладнати дрон двома антенами одночасно. Всеспрямований для обміну частою інформацією, такою як керування та навігація, без необхідності знати точне місцезнаходження вузла, і спрямований, який буде зосереджений на високій швидкості передачі даних. Замкнутий цикл потоку даних закінчується керуванням, тому що комунікація, обчислення та датчики мають сенс лише тоді, коли остаточні рішення транслюються в команди приводу.



Рисунок 1.1 Види дронів

Різні дрони мають різні форми управління, оскільки вони використовують різні аеродинамічні сили для польоту, а також призначені для різних завдань відповідно до

своїх характеристик і особливостей. Ось чому контролери польоту є основним компонентом дрона, вони зазвичай використовуються для реалізації автономного керування польотом, генерації маршрутних точок польоту, стабілізації орієнтації тощо. Для досягнення всіх цих функцій контролерам потрібна як апаратна, так і програмна підтримка одночасно. Апаратна складова складається з інерційних вимірювальних пристроїв, бортових комп'ютерів, датчиків, модулів GPS, комунікаційного обладнання, системи керування живленням тощо. Програмна складова включає розподіл завдань, алгоритми обробки контролю висоти та швидкості, генерацію маршрутних точок тощо. Контролери польоту можуть відрізнитися залежно від завдання, яке має виконати дрон. Деякими можна керувати за допомогою спеціальної програми, а для інших потрібне додаткове програмне та апаратне забезпечення сторонніх виробників, як-от Pararazzi, PIXHAWK, Phoenix Pro, OcPoC, DJI, NAVIO2, Trinity тощо.

Дронам різних форм потрібні різні алгоритми керування, щоб гарантувати стабільний, безпечний і плавний процес польоту від зльоту, крейсерського польоту до кінцевої посадки. Традиційні пілотовані літаки та гелікоптери значно покращили керування дронами з нерухомим крилом і моноротором через їх схожість. Відносно новими літальними апаратами є багатороторні дрони, оскільки їх можна використовувати в багатьох унікальних сценаріях завдяки можливості вертикального зльоту та посадки (VTOL), зависання та шести ступенів свободи. Але в розробці алгоритму керування квадатором є чотири основні проблеми:

- 1) Важко побудувати точну модель квадаторного дрона, оскільки це внутрішня нелінійна система;
- 2) Оскільки квадаторні дрони чутливі до зовнішніх перешкод, нестабільність у відкритому контурі вимагає швидкої реакції керування.
- 3) Квадатори є нелінійними системами з недостатнім приводом, тому це означає, що вони мають сильний зв'язок між динамічними станами.
- 4) Існують параметри системи, такі як аеродинамічні коефіцієнти та моменти інерції, які важко виміряти та отримати значення, а також необхідні в процесі керування.

Ці існуючі алгоритми поділяються на дві групи: лінійне керування та нелінійне керування. Лінійний, тому що, незважаючи на те, що квадатори є сильно пов'язаними нелінійними системами, більшість перших спроб досягти автономних польотів ґрунтувалися на лінійних контролерах, враховуючи пропорційно-інтегральний похідний контролер (PID) і лінійний квадратичний регулятор/гаусів (LQR/LQG). Нелінійні, тому що створені для подолання обмежень лінійного підходу на основі нелінійної моделі квадатора, яка включає керування режимом ковзання, керування зворотним кроком, лінеаризацію зворотного зв'язку, адаптивне керування та надійне керування.

Як працює фотограметрія, вона розглядає фотографії місцевості, зроблені з двох або більше місць. Він використовує різні перспективи зображень разом із розташуванням даних, де були зроблені зображення, для триангуляції розташування точок на об'єкті. Чим більше фотографій місцевості буде зроблено з різних місць, тим точнішим буде процес триангуляції.

Результатом є точні розташування точок, нанесені на 3D-простор, що є саме тим, що потрібно для створення 3D-карти. Ідеальними кандидатами для створення 3D-карти відносно невеликої території є дрони, оскільки кожна фотографія має геотеги, це означає, що широта, довгота та висота з GPS дрона та бортових датчиків вбудовані в метадані зображення.

Дроном керує оператор через додаток. Щойно програма відкривається, вона відстежує місцезнаходження оператора та відкриває сітку, яка дає нам змогу вибрати траєкторію польоту дрона, щоб визначити, скільки фотографій він збирається зробити та в якому порядку їх робити. Сітка має 4 точки, за допомогою яких оператор може регулювати робочі зони (geofencing). Оператор може вибрати висоту, на якій він хоче, щоб дрон працював, поки він виконує свою сітку.



Рисунок 1.2 Октокоптер

Чим нижче дрон – тим більша роздільна здатність зображення буде після сканування, але чим вона вища – тим простіше програмному забезпеченню буде зшивати 3D-модель, оскільки воно матиме більше опорних точок. Збільшення кількості інформації, яку збирає безпілотною, можна здійснити за рахунок збільшення покриття. Покриття - це зигзагоподібний рух по площі. Після вибору потрібної області та параметрів дрон виконає автоматичну передпольотну перевірку: GPS, прошивку, стан дрона, компас, контролер, місію та камеру.

Дрон є повністю автономним і рухається за заздалегідь визначеним курсом по сітці, надаючи оператору пряму трансляцію того, що він бачить і знімає. Після завершення операції оператор може від'єднати карту пам'яті від камери та ввести всі фотографії в програмне забезпечення для обробки.

Той факт, що всі фотографії позначено геотегами, допомагає програмному забезпеченню створити карту глибини, яка може показувати, як далеко знаходяться речі від камери. Програмне забезпечення для обробки бере всі ці карти глибини з різних місць, зшиває їх у так звану «сітку», яка є великою 3D-реконструкцією місцевості, і застосовує фотограметричні дані поверх цього місця. Органічні форми, рослинність – це те, що складно передати. Деревина мають гілки та листя, і їх часто моделюють як спотворену сферу. Метадані також містять інформацію про датчик камери та оптику дрона.

Фотограметрія безпілотної авіації стала можливою завдяки впровадженню Structure from Motion (SfM), техніки фотограметричного діапазону зображень, яка автоматично вирішує проблеми пози камери та геометрії сцени за допомогою алгоритму «комп'ютерного бачення», як-от Scale-Invariant Feature Transform (SIFT). Це дає змогу створювати точну 3D-карту місця, використовуючи зображення з великим перекриттям, отримані з цифрових дзеркальних камер споживчого класу. Розробка ланцюжків обробки на основі SfM дозволила отримувати дуже надлишкові, але досить низькоякісні фотографії дронів для точних 3D-карт. Крім того, SfM не вимагає стабілізованих датчиків або кріплень.

Найважливіше під час створення 3D — переконатися, що аерофотознімки перекриваються на 60-80%. 80% перекриття зазвичай використовується під час сканування міст або густонаселених районів для кращого проникнення в місто. Це допомагає процесу триангуляції бути більш точним і відстежувати однакові точки між зображеннями. Під час керування дроном додаток, за допомогою якого здійснюється керування, дозволяє встановити бажане значення перекриття. Друга найважливіша річ — зробити фотографії потрібного місця під різними кутами та на висоті. Як правило, перекриття виконується на висоті від 50 до 60 метрів, потім рекомендується обвести місцевість на більшій висоті під кутом 30° , повернутися на висоту 50-60 метрів і обвести під кутом 45° , і, нарешті, обвести навколо області під кутом 70° . Це допоможе створити 3D-модель вищої якості, надаючи дані текстури та зображень сторін області та об'єктів на ній.



Рисунок 1.3 Результат обробки без виконання кутового перекриття



Рисунок 1.4 Результат обробки з даними кутового перекриття

Однак парадигма фотограметрії дронів є дуже перспективною, її сфера застосування обмежена досить низькою потужністю, корисним навантаженням і автономністю, а також проблемами безпеки та нормативними вимогами. У багатьох країнах польоти безпілотників повинні здійснюватися в межах прямої видимості та дотримуватися обмежень щодо максимальної злітної ваги (MTOW) і висоти польоту. Простим, але відносно дорогим рішенням є розміщення камер на вертольоті чи літаку.

1.2 Специфіка вертолітної та НЛ фотограметрії

Висока маневреність гелікоптера є великою перевагою для вертикального огляду. Крім того, вертольоти можуть літати на низьких висотах з дуже малими дорожніми швидкостями. Однак встановити камери на гелікоптер складніше через вібрації та спосіб польоту. Щоб вертоліт летів вперед, його потрібно нахилити в напрямку польоту. Щоб позбутися цього кута, камеру потрібно встановити на стабілізатор камери. Це допоможе позбутися великої порції вібрацій – якість зображення не буде сильно спотворена, але кількість камер обмежена розміром стабілізатора.



Рисунок 1.5 Кріплення камер на стабілізаторі вертольота

Для фотограметрії найчастіше використовуються легкі літаки з МТОВ 5670 кг. Завдяки високій автономності та корисному навантаженню важкі камери високої роздільної здатності з механізмом стабілізації та потужним процесором можуть використовуватися для отримання детальних зображень місцевості. Встановити камеру на літаку відносно простіше, оскільки її можна встановити в будь-якому місці фюзеляжу літака. Єдине, що може обмежити місце установки - це довжина дроту. Найкращий варіант для отримання найкращої якості - встановити п'ять камер, які дивляться в різні боки: вниз, вліво, вперед, вправо і назад, знімаючи фотографії під різними кутами. У всьому світі законодавча база для літаків і гелікоптерів, як правило, дуже сувора, від навчання пілотів до технічного обслуговування літаків. Технічна сертифікація поширюється на будь-яку частину літака, від конструкції до заклепок. Сертифікація також необхідна для систем візуалізації (датчиків, підставок, антен тощо), які запобігають використанню зовнішніх корисних навантажень. Ці обмежувальні правила частково пояснюють значні витрати на експлуатацію та технічне обслуговування та сприяли появі надлегких літаків (НЛ) завдяки набагато більш гнучкому регулюванню.

Вони регулюються на національному рівні та мають загальне визначення: двомісний літак з максимальною злітною вагою 450 кг і максимальною швидкістю звалювання

65 км/год. НЛ можуть злітати та приземлятися за межами звичайних аеродромів, які мають злітно-посадкові смуги, і вони також використовують автомобільний бензин, а не реактивне паливо. Завдяки шинам низького тиску надлегкий літак може здійснювати посадку та зліт майже з будь-якої рівної поверхні. Таким чином, НЛ часто використовується у віддалених районах, де звичайні аеродроми є рідкістю, а авіаційне паливо важко купити.

Однією з головних проблем при створенні 3D-карти є спостереження за статичною ціллю за допомогою мобільної літальної системи, яка складається з НЛ, платформи та кількох камер, встановлених на цій платформі. Таким чином, головна мета полягає в тому, щоб налаштувати всю систему для оптимізації процесу фотограметрії (вилучення 3D-вимірів з аерофотознімків), одночасно задовольняючи вимоги до польоту та датчиків. Щоб зрозуміти, чи підходить дана камера для даного плану польоту чи навпаки, необхідно розглянути кілька ключових параметрів, деякі з яких пов'язані з технічними характеристиками камер і безпосередньо впливають на якість зображення..

1.3 Вибір датчиків, обладнання та план польоту

Розмір датчика (SSz), розмір зображення (ImD), фокусна відстань (FL) і швидкість серійної зйомки (BR). Серійна швидкість — це максимальна кількість кадрів за секунду, яку камера може безпечно зберігати. Це постійні параметри камери. Діафрагма (Ap_{tr}), чутливість датчика (ISO) і час інтеграції (InT) регулюються залежно від погодних умов під час зйомки. Залежно від погодних умов під час зйомки параметри діафрагми (Ap_{tr}), чутливості сенсора (ISO) і часу інтеграції (InT) можна регулювати відповідно. InT — це час, необхідний камері для повного циклу (відкриття та закриття). InT_{min} — це мінімальне значення InT , можливе для камери. Інша група параметрів пов'язана лише з планом польоту: наземна швидкість (GSp) і висота над рівнем землі (AGA). Остання група параметрів залежить від комбінації як камери, так і параметрів польоту: просторова роздільна здатність зображення ($ImSR$) і перекриття, яке поділяється на переднє перекриття ($Front_L$) – перекриття послідовних

зображень на одній лінії польоту, і бокове перекриття ($Side_L$) – перекриття зображень сусідньої лінії польоту.

Для використання дрона, без активної стабілізації та з метою створення 3D-карти: $Front_L \geq 80\%$, $Side_L \geq 60-75\%$. Наступні кроки описують, як оцінити, чи характеристики камери (BR та InT) адаптовані до попередньо визначеного плану польоту (AGA та GSp). Важливі обчислювальні параметри та наступні рівняння були засновані на теоремі перехоплення та отримані з неї. Камера орієнтована в альбомному режимі по лінії польоту.

Швидкість серійної зйомки, що необхідна для вибраної конфігурації (BR_{config}), обчислюється за допомогою:

$$BR_{config} = \frac{GSp}{GSW_H \times (1 - Front_L)} \quad (1)$$

$$GSW_H = \frac{SSz_H \times AGA}{FL} \quad (2)$$

Якщо $BR_{config} < BR$ – частота спрацьовування під обраний план польоту, може підтримуватися камерою. Залежно від тривалості польоту слід вибрати відповідне сховище даних..

Час інтегрування для цієї зміни розраховується за формулою:

$$InT_{config} = \frac{GSW_H}{2 \times ImD_H \times GSp} \quad (3)$$

Ділення на 2 було додано як запас за висотою у разі несподіваної турбулентності чи інших рухів. Ефект розмиття може з'явитися на фотографіях, якщо $InT_{config} < InT_{min}$. InT_{min} — це мінімальний час інтеграції для вибраної камери. Розмиті фотографії дуже сильно впливають на фотограметричний процес, виявляючи точки зв'язування, знижуючи успішність вирівнювання і серйозно погіршуючи точність 3D-реконструкції.

Якщо значення BR_{config} та InT_{config} добре відповідають специфікаціям камери, просторова роздільна здатність ($ImSR$) розраховується за формулою:

$$ImSR = \frac{GSW_H}{ImD_H} \quad (4)$$

Під час польоту за шляховою швидкістю (GS_p) впливає зміна швидкості та напрямку вітру. Відстань між послідовним зображенням (DBIm) і переднім перекриттям (FrontL) може відрізнятись, якщо тригер камери налаштований з використанням постійного інтервалу часу.

Якщо пусковий сигнал налаштовано на постійну відстань, може бути перевищена швидкість серійної зйомки (BR) або мінімальний час інтегрування (InT_{min}). Необхідно враховувати можливі зміни висоти над землею (AGA) та колійної швидкості (GS_p).

Storm Rally 105 можна використовувати як приклад НЛ. Він має швидкість звалювання 65 км/год без закрилків, на MTOW і холостому ході двигуна, тому пілот може безпечно літати на низькій швидкості з достатнім запасом швидкості. Стандартна вага порожнього автомобіля становить 345 кг із максимальним корисним навантаженням 253 кг, тобто 598 кг MTOW.



Рисунок 1.6. Платформа НЛ з датчиками під фюзеляжем

У повністю закритій кабіні НЛ навігатор сидить поруч з пілотом, а навігаційна станція отримує інформацію від панелі датчиків, яка відображається на ноутбучі, який живиться від власної батареї та зовнішньої літій-іонної батареї ємністю 6900 мА на 19 В. Якщо пілот відхиляється від маршруту польоту, штурман може попередити його. Пілот отримує інформацію про політ від радіоантени (433 МГц), яка

відображається на екрані «Планувальник місії». Блок датчиків є автономним і складається з силового, сенсорного та літального блоків, які прикріплені до алюмінієвої пластини та захищені склопластиковою коробкою. Щоб позбутися високочастотних вібрацій, встановлено пару антивібраційних гумок.



Рисунок 1.7 Камерний модуль

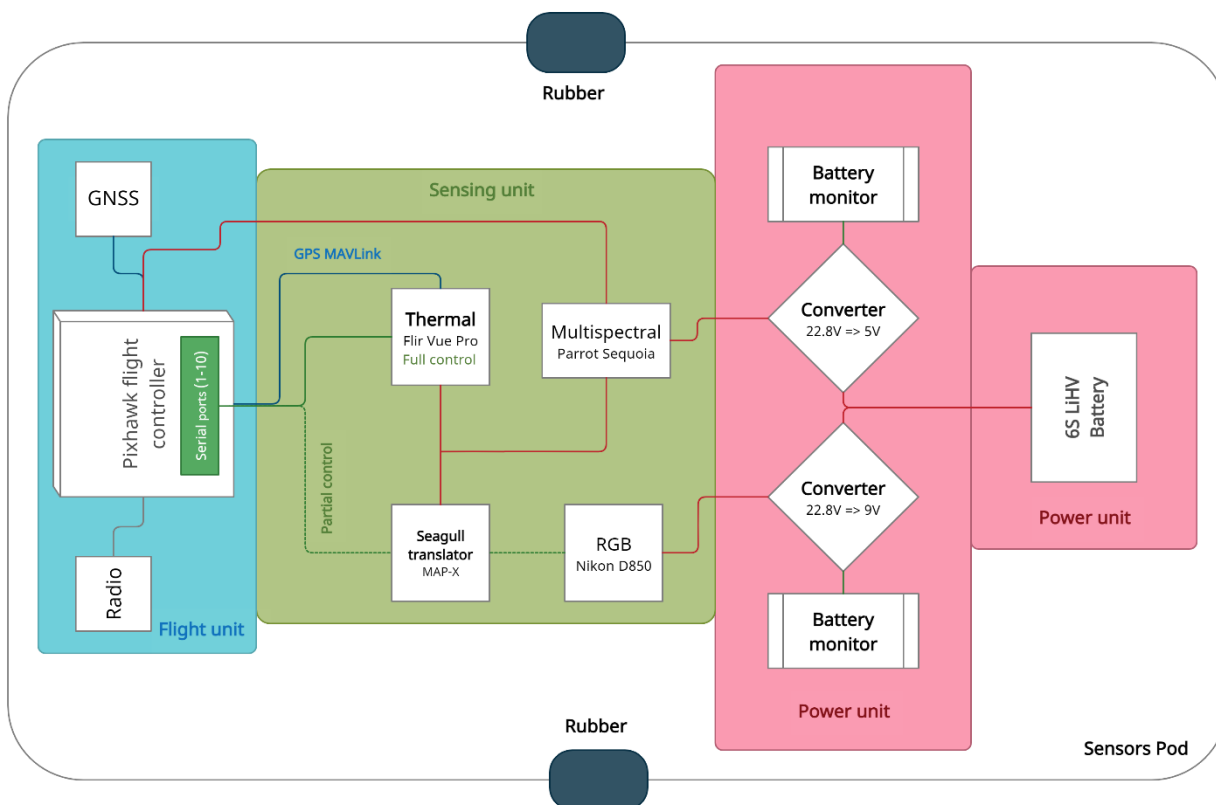


Рисунок 1.8 Схема камерного модуля

Блок польоту складається з відкритого апаратного контролера Pixhawk і програмного забезпечення для автопілота ARDUPILOT з відкритим кодом. UBlox GPS і 3DR Compass із частотою оновлення 5 Гц використовувалися для локалізації в реальному часі як GNSS. Бортовий блок надсилає інформацію через іншу радіоантену 3DR на навігаційну станцію.

Блок зондування складається з вибраних датчиків, підключених до контролера польоту Pixhawk, послідовні порти якого використовують широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ), загальний протокол радіокоманд дрона та камери, але ця інформація не є легкодоступною, тому використовувався перекладач #MAP-X Seagull.

Блок живлення складається з високоемної батареї 6S LiHV ємністю 10000 мА на 22,8 В, двох перетворювачів на 5 В і 9 В і двох моніторів батареї, які показують струм і напругу в «Планувальнику місій» на ноутбучі.

Для зйомки фотограметричних зображень були обрані фотокамери Nikon D850 (знімає зелені, червоні та сині спектри), Parrot Sequoia (знімає червоні, зелені, червоні межі та ближню інфрачервону область) і Flir Vue Pro R 640 (термічна інфрачервона). Фотографії з тепловізійної камери були використані для збору підсвічування гарячих точок на досліджуваній території.

Сучасне програмне забезпечення для планування польотів дозволяє користувачам працювати з GoogleEarth. Коли пілот або планувальник вибирає потрібну зону інтересу, програмне забезпечення може автоматично розрахувати необхідні лінії польоту.

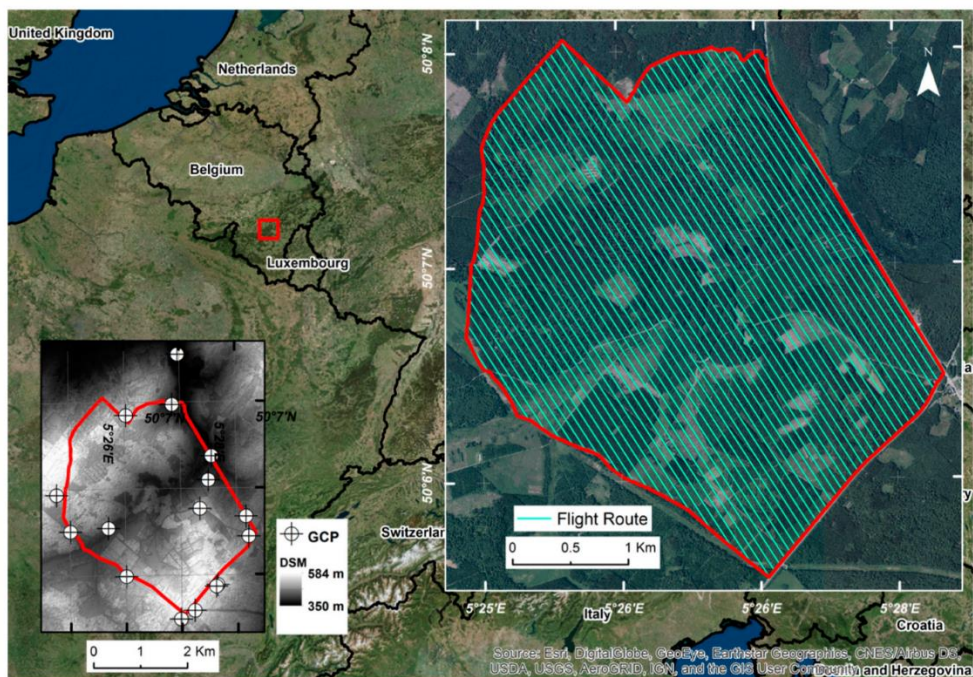


Рисунок 1.9 Район дослідження з наземними пунктами управління та планом польоту

Під час польоту через збурення, спричинені несподіваним вітром або турбулентністю, можуть виникати різні помилки крену, тангажу та курсу. Щоб компенсувати або повністю позбутися цих похибок, на літаку має бути встановлений проміжний вимірювальний блок (IMU). План польоту можна завантажити в IMU, який записує всі збурення літака та може коригувати записані дані.

Помилка крену виникає, коли IMU не вирівняно з камерою навколо осі X.

Помилка кроку виникає, коли IMU не вирівняно з камерою навколо осі Y

Помилка курсу виникає, коли IMU не вирівняно з камерою навколо осі Z.

Якщо IMU не впроваджено – є інші способи виявити ці розбіжності, але необхідно зробити додаткові інструкції щодо плану польоту, наприклад:

- протилежна лінія польоту повинна бути дозволена для визначення похибки крену;
- протилежна лінія польоту на двох різних висотах має бути дозволена для виявлення помилки тангажу;
- до плану польоту необхідно додати перетин лінії польоту для визначення похибки курсу.

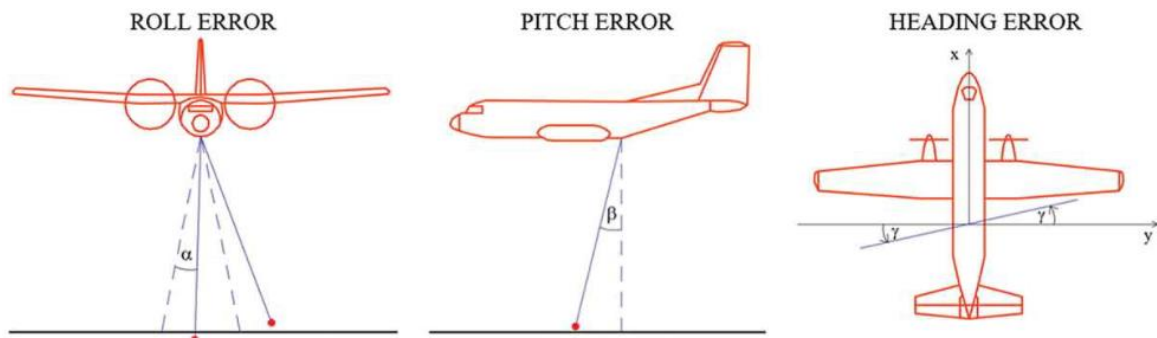


Рисунок 1.10 Візуалізація помилок

Теоретична похибка ($\sigma_{X,Y}$) уздовж обох осей X і Y, які приблизно паралельні землі, обчислюється за:

$$\sigma_X = \sqrt{\left(\frac{\xi}{c} \times \frac{Z}{c} \times \frac{Z}{B} \times \sigma_{P\xi}\right)^2 + \left(\frac{Z}{c} \times \sigma_\xi\right)^2} \quad (5)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\left(\frac{\eta}{c} \times \frac{Z}{c} \times \frac{Z}{B} \times \sigma_{P\xi}\right)^2 + \left(\frac{Z}{c} \times \sigma_\eta\right)^2} \quad (6)$$

Де σ_ξ та σ_η - розрахункова точність вимірювань координат зображення (ξ, η), $\sigma_{P\xi}$ – точність вимірювання паралакса, Z – відносна висота польоту над землею, c - головна відстань прийнятої камери, B – базова лінія між послідовними послідовними центрами перспективи.

Розрахункова точність (σ_Z) розраховується за:

$$\sigma_Z = \frac{Z^2}{c \times B} \times \sigma_{P\xi} \quad (7)$$

План польоту був спрямований на високу просторову роздільну здатність (ImSR) і перекриття, яке є достатнім для оптимальної фотограметрії. Мінімальне переднє перекриття (Front_L) було встановлено на 66%, а бокове перекриття (Side_L) – 50%. Політ виконувався на середній висоті над рівнем моря (ASA) 762 метри з висотою над землею (AGA) в діапазоні 173-377 метрів. Середня швидкість руху була встановлена на рівні 140 км/год, щоб вона була сумісною зі швидкістю серійної зйомки всіх трьох камер. Загальна довжина польоту оцінювалася в 191 км і була розділена на 49 ліній з тривалістю польоту 3 години 27 хвилин. На політ по лініях було витрачено 1 годину 49 хвилин, на повороти – 1 годину 38 хвилин.

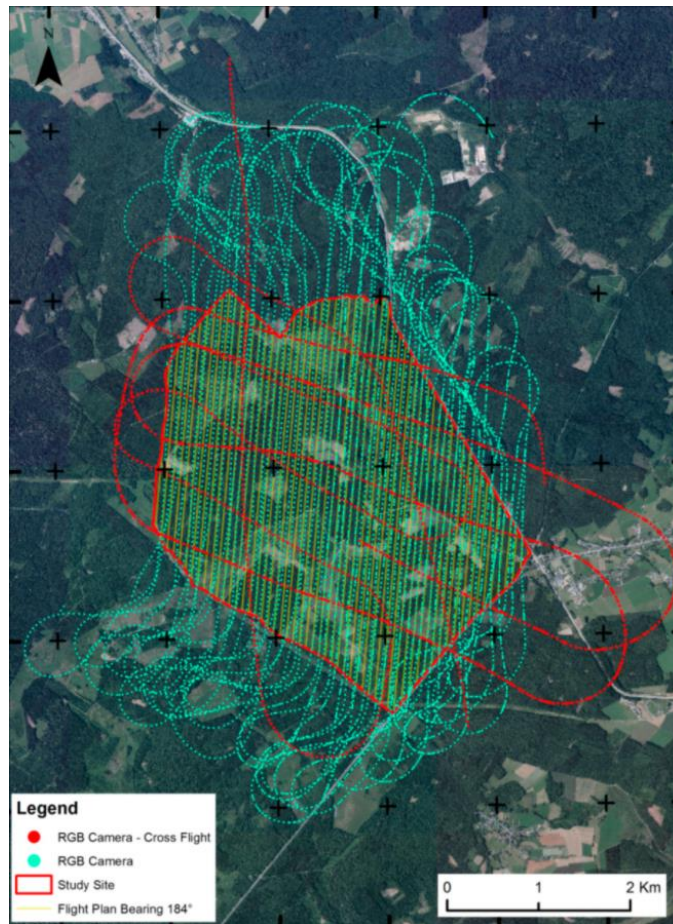


Рисунок 1.11 Виконаний політ

1.4 Процедура фотограметричного процесу

Після зйомки фотографій з камери вони були оброблені програмним забезпеченням Agisoft PhotoScan Professional через мережу з двох комп'ютерів із 64 ГБ оперативної пам'яті, 20 ядрами на 3,1 ГГц і графічним процесором GTX1080 NVIDIA з увімкненою обробкою. Для Nikon D850 (RGB), Flir Vue Pro R640 (термальний інфрачервоний) і Parrot Sequoia (мультиспектральний) було створено три проекти Photoscan незалежно один від одного. Вирівнювання було виконано з використанням рідної роздільної здатності зображення з високою точністю, стандартним ключем і зв'язуючою точкою, обмеженими 40000 і 4000 відповідно. Було шістнадцять наземних пунктів управління, розташованих точно в полі. Щоб уточнити фокусну відстань, положення головних точок, три коефіцієнти радіальних спотворень (k_1 , k_2 , k_3) і два коефіцієнти тангенціальних спотворень (p_1 , p_2), було проведено процес оптимізації. Кілька кроків було виконано з налаштуваннями за замовчуванням: щільна хмара, включаючи агресивну глибинну фільтрацію та

середню точність, цифрова модель висоти, RGB, мультиспектральна та теплова інфрачервона ортофотомозаїка..

Для різних фотограметричних виходів встановлювалася найгрубіша просторова роздільна здатність, яка відповідала найбільшій висоті польоту над землею. Позичії наземних контрольних точок були зібрані за допомогою RTK GPS Emlid Reach RS із середньоквадратичною похибкою 3,73 см. За допомогою підходу повторної k-кратної перехресної перевірки були оцінені геометричні похибки трьох ортофотомозаїк (k=5 з 50 ітераціями). Для кожної з цих 50 ітерацій наземні контрольні точки були випадковим чином розділені на льотні групи, і було виконано п'ять оптимізацій, як-от коригування блоку зв'язку. Чотири з п'яти груп використовувалися як навчальні набори для кожної оптимізації, а остання група використовувалася як тестовий набір для оцінки помилок. Глобальну помилку кожної ортофотомозаїки оцінювали після 50 повторів як середнє \pm стандартне відхилення помилок XYZ, пов'язаних із 16 наземними контрольними точками тестового набору.

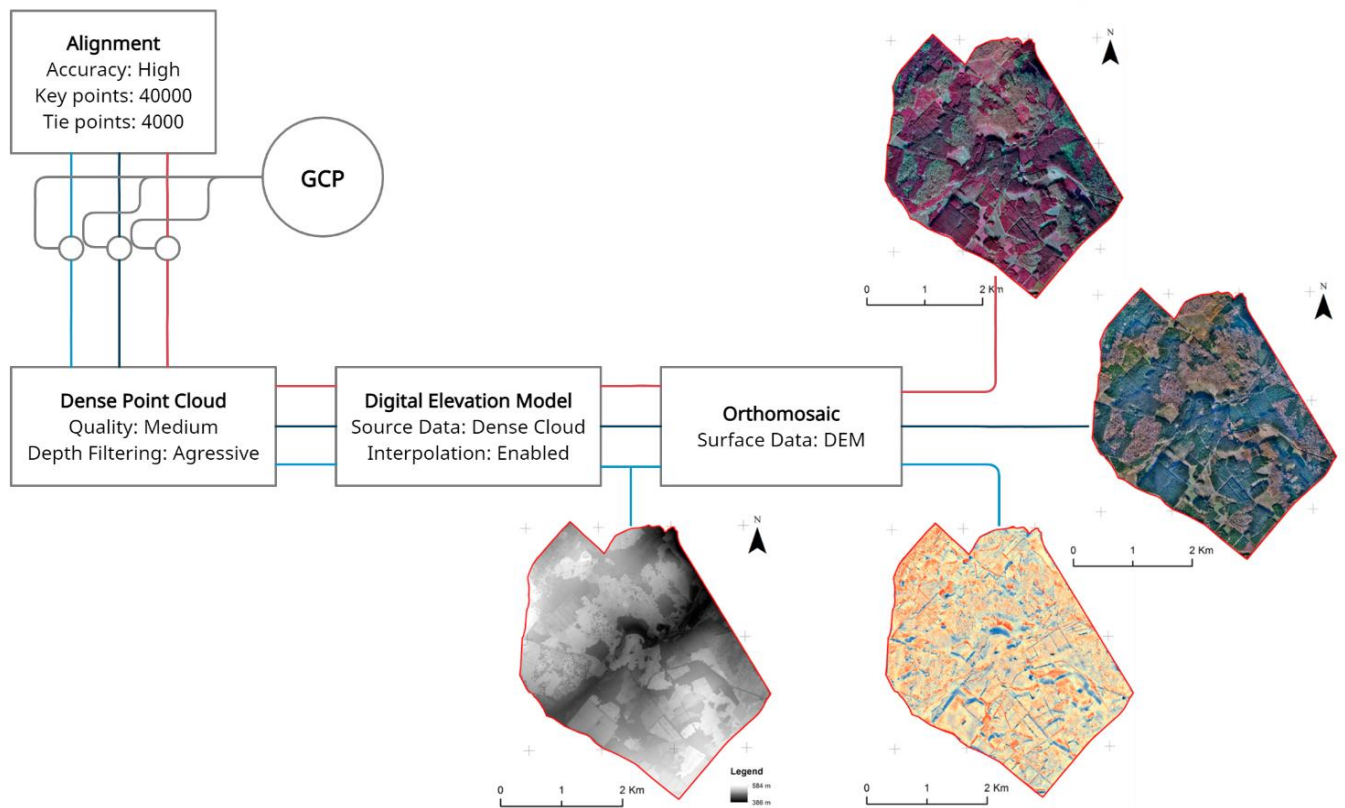


Рисунок 1.12 Модель створення ортофотомозаїк

1.5 Якість отриманого зображення, ортфотомозаїка та вартість

Хороший план польоту є ключем до отримання гарної якості зображення, а сумісність характеристик польоту літака під час виконання плану та вибраного обладнання має вирішальне значення. План польоту був сумісний із ключовими параметрами камери Nikon D850 і Parrot Sequoia, але не з Flir Vue Pro R 640, оскільки мінімальний час інтеграції був з великим. Таким чином, ефект розмиття очікувався та спостерігався на теплових фотографіях і не був виявлений на RGB та мультиспектральних фотографіях. Але фотографії RGB були трохи перетримані через те, що камера не могла правильно обробити обчислення ISO, які були встановлені на 900-6400, через швидкість літака 140 км/год і коливання висоти близько 200 метрів.

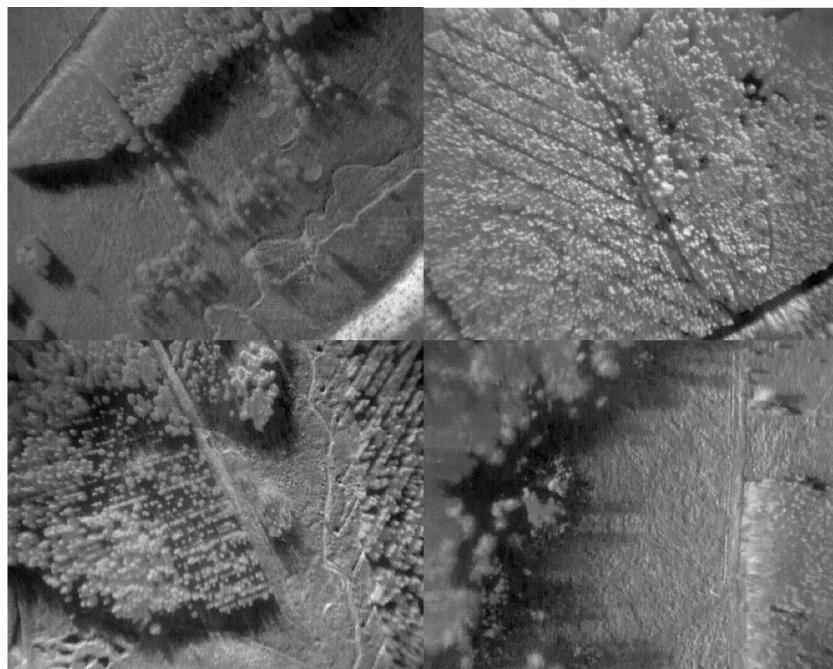


Рисунок 1.13 Змазані інфрачервоні зображення

Загалом для всіх трьох фотограметричних проектів, RGB, багатоспектрального та теплового інфрачервоного, загальний час обробки фотограметричної програми становив близько 44 годин. Геометрична точність складається із середніх \pm стандартних відхилень і становила $0,84 \pm 0,7$ м для RGB, $0,86 \pm 0,6$ м для мультиспектрального та $4,9 \pm 3,4$ м для теплового. Набагато нижчу точність теплового інфрачервоного випромінювання можна пояснити наявністю ефекту розмиття та меншим відсотком перекриття. Оскільки теплові зображення розмиті, 3D-фотограметрична реконструкція спричиняє зміщення.

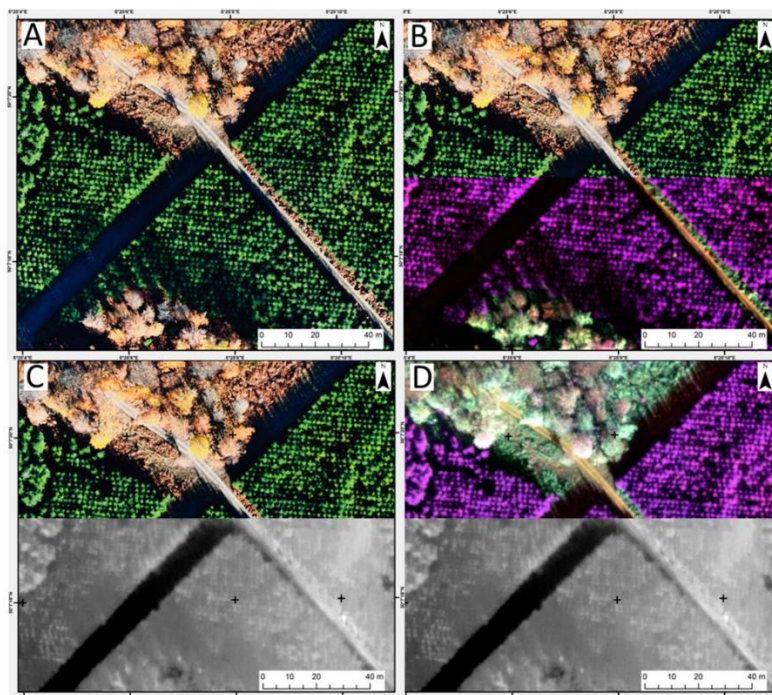


Рисунок 1.14 Збільшення перехрестя, щоб показати зсув термічної ортофотомозаїки.

А) Ортофотомозаїка RGB; В) Комбінація RGB (верхня сторона) та мультиспектральної (нижня сторона) ортофотомозаїки; С) Розбіжність комбінації ортофотомозаїки RGB (верхня сторона) і теплової (нижня сторона); D) Розбіжність мультиспектральної (верхня сторона) та термічної (нижня сторона) ортофотомозаїчної комбінації.

Повністю зібраний модуль із трьома камерами та одним контролером коштує менше 10 000 євро. Вартість Agisoft PhotoScan Professional починається від 500 євро за освітню ліцензію і досягає 3200 євро за стандартну. Ця система має хороше співвідношення ціни та якості технологій дронів, може бути оснащена різними доступними датчиками дронів і є дуже гнучкою з точки зору правил. НЛ не вимагає аеродрому та відповідної злітно-посадкової смуги для зльоту та посадки, вони менш дорогі в обслуговуванні, оскільки використовують паливо для двигуна автомобіля.

Однак завжди є способи покращити, наприклад, НЛ залишає відносно велику тінь, якщо політ виконується приблизно опівдні. Зв'язок між ноутбуком і модулем можна покращити за допомогою Wi-Fi або Bluetooth. Процедура фотограметрії можна спростити. Якість точних результатів, таких як ортофотомозаїка, можна покращити, впровадивши глобальну навігаційну супутникову систему в модуль.

Кількість наземних пунктів управління можна зменшити, оскільки процес їхнього налаштування є трудомістким і складним у таких масштабах віддалених районів.

1.6 Порівняння цін на фотограметрію за допомогою дрона, літака та супутника на конкретному прикладі

Згідно зі статтею «Порівняння платформ дистанційного зондування БПЛА, літаків і супутників для точного виноградарства», команда дослідників провела експеримент, у якому порівняла витрати на отримання та обробку зображень дронами, легкими літаками та супутниками. Вони вибрали два тестових місця, виноградники в регіоні Венето, які мали схожі агрономічні характеристики. Експеримент проводився в один із найтепліших періодів з температурою на $1,5^{\circ}\text{C}$ вищою за середню за минулий період і меншою сумарною кількістю опадів 90 мм порівняно з 230 мм у середньому. 50 білих ПВХ панелей розміром 25 x 25 см кожна були розміщені у випадкових місцях у кожному винограднику для порівняння фотографій.

Для отримання зображення з дрона використовувався Mikrokopter OktoXL із встановленою камерою Tetracam ADC Lite. Усі фотографії були зроблені в умовах ясного неба між 12:00 і 13:00 з одним контрольним кадром відбиття, який використовувався для калібрування безпосередньо перед польотом. Дрон літав на фіксованій висоті 150 м над рівнем землі зі швидкістю польоту 4 м/с, забезпечуючи 72% перекриття переднього зображення та 40% перекриття бокового зображення. Отже, щоб отримати остаточний результат, дані, отримані дроном, спочатку конвертувалися з RAW у TIF за допомогою програмного забезпечення PixelWrench2. Зображення були ортофіксовані за допомогою цифрової моделі рельєфу з роздільною здатністю 5 м. Ортотрансформація — це процес усунення ефектів перспективи зображення (нахил) і рельєфу (рельєфу) з метою створення планіметрично правильного зображення. Потім зображення були зібрані в мозаїку в програмному забезпеченні Autorano Pro 3.6. Координати згаданих раніше ПВХ-панелей були виміряні за допомогою диференціального GPS високої роздільної здатності Leica GS09 GNSS, а програмне забезпечення QGIS виконувало задачу геоприв'язки. Через

те, як давно проводився цей експеримент, на той час дрони не мали функції автоматичного прив'язування, як у сучасних дронів. Спектрорадіометр FieldSpec Pro використовувався для калібрування радіометричних показань у польових умовах, тому цифрове число кожного пікселя спочатку перетворювалося в спектральне випромінювання, а потім у коефіцієнт відбиття.



Рисунок 1.15 Фотографія з дрону

Для колекції аерофотознімків використовувалася платформа Sky Arrow ERA. Політ відбувся в той же день, що і безпілотний, але на висоті 2300 м від рівня землі, що відповідає просторовій роздільній здатності 0,5 м. На літаку було встановлено Advanced SPectroscopic Imaging System (ASPIS) у поєднанні з блоком Systron Donner C MIGITS III INS/GPS і лазерним висотоміром Riegl LD90. Для розрахунку нормалізованого індексу різниці рослинності (NDVI), який є числовим показником якості та кількості рослинності на полі, були оброблені спектральні смуги червоного та ближнього інфрачервоного діапазонів. За допомогою Terrasystem srl були застосовані радіометричні поправки до датчика. Атмосферну корекцію проводили за допомогою модуля ENVI FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes). Програмне забезпечення PCI Geomatica використовувалося для внесення геометричних корекцій, таких як усунення внутрішніх оптичних спотворень датчика, які були спричинені висотою польоту, за допомогою техніки, яка передбачає

отримання наземних контрольних точок на зображеннях із геоприв'язкою високої роздільної здатності.

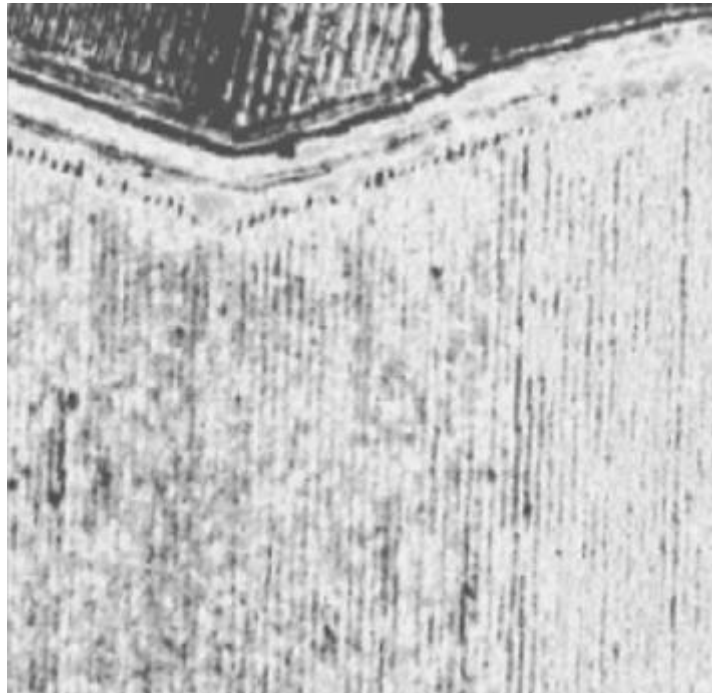


Рисунок 1.16 Фотографія з літака

15 вересня 2012 року об 11:03 ранку мультиспектральні зображення, надані BlackBride, зроблені із супутника RapidEye, який є сузір'ям із п'яти супутників, що обертаються навколо Землі на висоті 630 км, які отримують мультиспектральні дані (синій 440-510 нм), зелений 520-590 нм, червоний 630-690 нм, червоний край 690-730 нм і ближній інфрачервоний діапазон 760-880 нм) з просторовою роздільною здатністю 6,5 м, повторена дискретизація до розміру пікселя 5 м у видимій і ближній областях. інфрачервоні діапазони. Отримані файли були у 16-бітному форматі NTIF, а радіометричні поправки були зроблені за допомогою RapidEye Level 2. За допомогою модуля ENVI FLAASH були реалізовані атмосферні поправки, геометричні поправки були здійснені програмним забезпеченням PCI Geomatica.

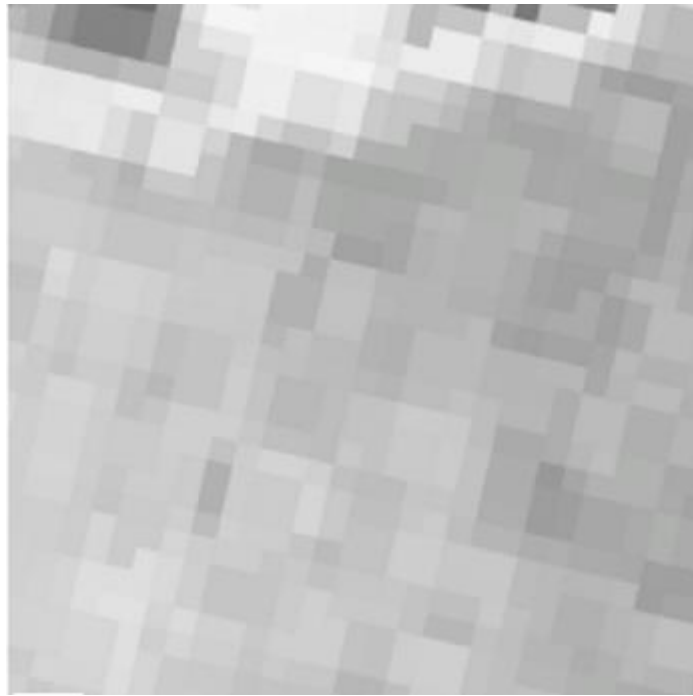


Рисунок 1.17 Фотографія з супутника

Оскільки супутникові зображення є комерційним продуктом і всі витрати на обробку та експлуатацію включені в ціну за файл, а планування місії літака для захоплення зображень є додатковим витратою, порівняння цих платформ було непрактичним. Низхідний підхід до порівняння, згрупований у три категорії, був обраний для врахування всіх пов'язаних обсягів збору та обробки даних:

- витрати на придбання (С), які сплатили всі витрати на отримання необробленого файлу. Для супутника – придбання комерційних знімків, для літака – планування місії та встановлення обладнання для захоплення, для дрона – планування місії та організація процесу.

- геоприв'язка та ортотрансформація (Р1) – усі витрати на людино-години (одна людино-година оцінюється як 50 євро) для отримання файлу `goereferred` та `orthorectification`.

- обробка зображень (Р2) – оплачується за кожну окрему операцію в людино-годинах, яка необхідна для отримання кінцевого результату. Одну людино-годину також оцінили в 50 євро.

Було проаналізовано два різних масштаби вартості: 5 гектарів, територія, нанесена на карту дроном, і 50 гектарів, нанесена на карту літаком. Необхідна кількість фотографій, необхідних для картографування необхідної території (N),

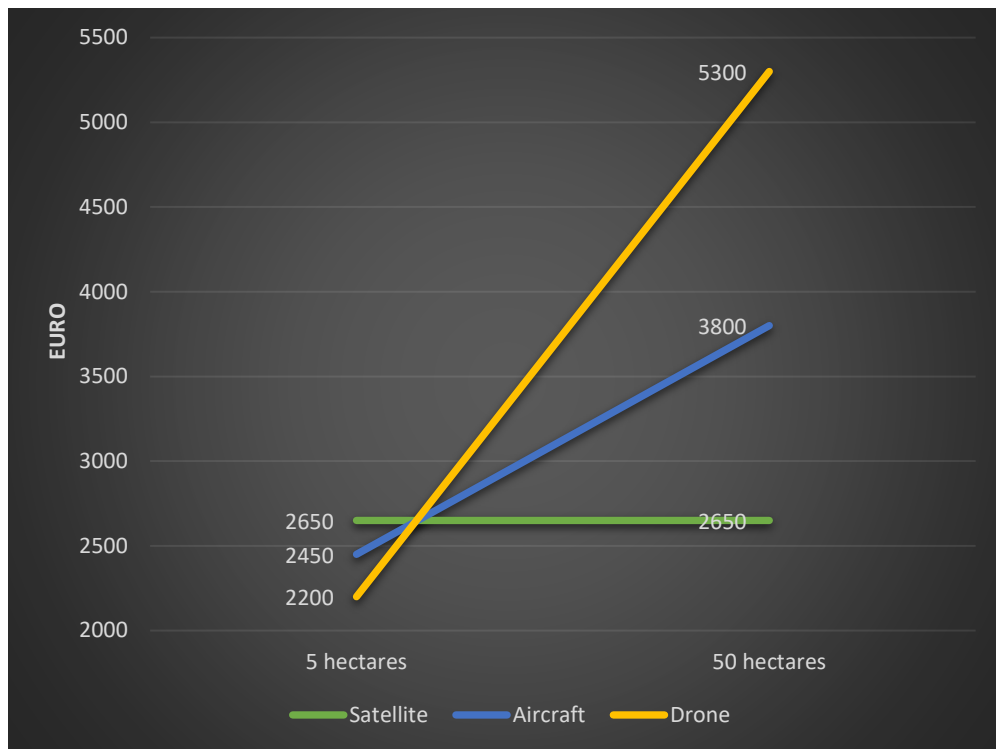
масштабувалася експоненціально від супутника до літака та дрона, що призвело до збільшення вартості ланцюга обробки фотографій P1 і P2. Вартість отримання супутникових фотографій для обох областей була фіксованою через розмір фотографії, яка могла охоплювати обидві області одночасно. Для літака та безпілотної вона зростає з 5 до 50 га в 1,36 і 2,66 рази відповідно.

Розрахунок вартості та вигоди проводився на основі послуги, запропонованої третьою стороною – він не включав вартість дрона, приладів і обслуговування. Найефективніше використання дрона було на невеликому полі, 5 га, завдяки низькій вартості збору даних і простоті експлуатації. Але коли площа ділянок досягла більшого розміру, 50 га, вартість збору даних різко зростає. Вартість знімання з супутника на 5 та 50 га істотно не змінилася. Рішення для середнього літака продемонструвало лише незначні додаткові витрати на отримання даних через довший час польоту та додатковий час обробки, що вимагає обробки кількох зображень, щоб отримати зображення площею 50 гектарів, оскільки типове зображення, отримане з літака, зроблене з 8-10 га. У разі 5 гектарів достатньо було лише одного зображення.

	5 гектарів				50 гектарів			
	N	C	P1	P2	N	C	P1	P2
Супутник	1	2500	50	100	1	2500	50	100
Літак	1	2200	100	150	10	3000	500	300
Дрон	100	1500	500	200	1000	4000	1000	300

Таблиця 1. Вартість картографування для категорій супутників, літаків і дронів.

Необхідна кількість фотографій, необхідних для картографування необхідної території (N), витрати на придбання (C), геоприв'язка та орторемонт (P1), обробка зображень (P2).



Графік 1.1 Вартість супутникового, авіаційного та дронного картографування території 5 та 50 га

Аналіз витрат показав, що робота з дронами вигідна на невеликих площах, а точка беззбитковості є на площі більше п'яти гектарів; вище цього порогу вартість знімків з літака та супутника буде нижчою.

Висновок: завдяки простоті, гнучкості та економічності фотограметрія безпілотників і НЛ використовується майже в усіх куточках світу. Якщо все зроблено правильно, він надає точні та детальні дані, які можна використовувати для різних цілей. Звичайні камери в поєднанні з тепловими та мультиспектральними камерами можуть дати різні рівні сприйняття зображення, показуючи речі, для виявлення яких за допомогою звичайних методів знадобиться набагато більше ресурсів. Хороша сторона цього методу полягає в тому, що людям, які хочуть зробити фотограметричну 3D-карту, навіть не потрібно володіти дроном і камерою, оскільки є багато організацій і людей, які надають це обладнання в оренду. Постобробка також може бути виконана порівняно легко. До розробки плану польоту, вибору обладнання, розрахунків і планування місії потрібно підходити відповідально, оскільки помилка хоча б в одному з цих пунктів вплине на кінцевий результат. Звичайно, проблему

можна вирішити, але це займе додаткові часові та фінансові витрати. Оскільки аеропорт і район його польотів мають величезну територію, використання дрона для збору фотограметричних даних вважається недоцільним через тривалість автономної роботи дрона. Тривалість польоту НЛ набагато більше, а значить, покриття території буде вище, він швидше дрона, і на нього можна поставити більше техніки обробленої якості. Якщо потрібні дуже точні дані, цей метод стає дорожчим дуже швидко, оскільки потрібно більше наземних контрольних точок і кращий дрон з кращою камерою.

Дрон у порівнянні з методом фотограметрії НЛ.

Переваги:

- дешево
- простий у виконанні;
- повністю автоматичний;
- надає точні дані;
- висока універсальність – є багато речей, які можна змінити, як-от тип дрона, камера, кількість камер, типи кріплень.
- висока маневреність
- немає потреби у злітно-посадкових смугах через VTOL.
- менша кількість обмежень.

Недоліки:

- тривалий час обробки зображення (1 фотографія = 1 хвилина обробки);
- вразливі до вітрового впливу;
- невелика площа покриття;
- малий час роботи.

НЛ порівняно зі звичайним методом фотограметрії з літаків і дронів.

Переваги:

- велика площа покриття;
- менше обмежень, ніж звичайний літак;
- більший розмір кріплення;

- більша кількість датчиків;
- більший контроль роботи;
- менші витрати на обслуговування та експлуатацію;
- більш стабілізоване зображення

Недоліки:

- дорожчий за дрон, але дешевший за звичайний літак;
- для успішного виконання процесу потрібно більше планувати політ;
- менша маневреність.

BlenderGIS

Другий метод є повністю цифровим і виконується за допомогою Blender, набору програмного забезпечення для тривимірної комп'ютерної графіки. Щоб зробити 3D-карту необхідної території, оператору необхідно встановити програмне забезпечення Blender і додаток BlenderGIS на свій комп'ютер. На верхній панелі робочого простору оператор обирає спадне меню «GIS», потім переходить до «Веб-геоданих» і вибирає «Базова карта», де він може вибрати джерело даних із «Google» або «Bing».

Після завершення відкривається карта Землі, і оператор може вибрати будь-яку точку, збільшити масштаб, обрізати потрібний вид і працювати з геоданими цієї місцевості. Щоб додати висоту в плоску площину необхідної місцевості, оператор обирає спадне меню «GIS», потім «Web geodata» та «Get SRTM», дані, які збирають супутники NASA. Також є можливість імпортувати дані про будівлі та додати їх до карти висот місцевості. Якщо це необхідно, оператор повинен вибрати «Отримати OSM», який дозволяє нам вибирати різні об'єкти, такі як будівлі, шосе, землекористування, природні, залізниці та водні шляхи.

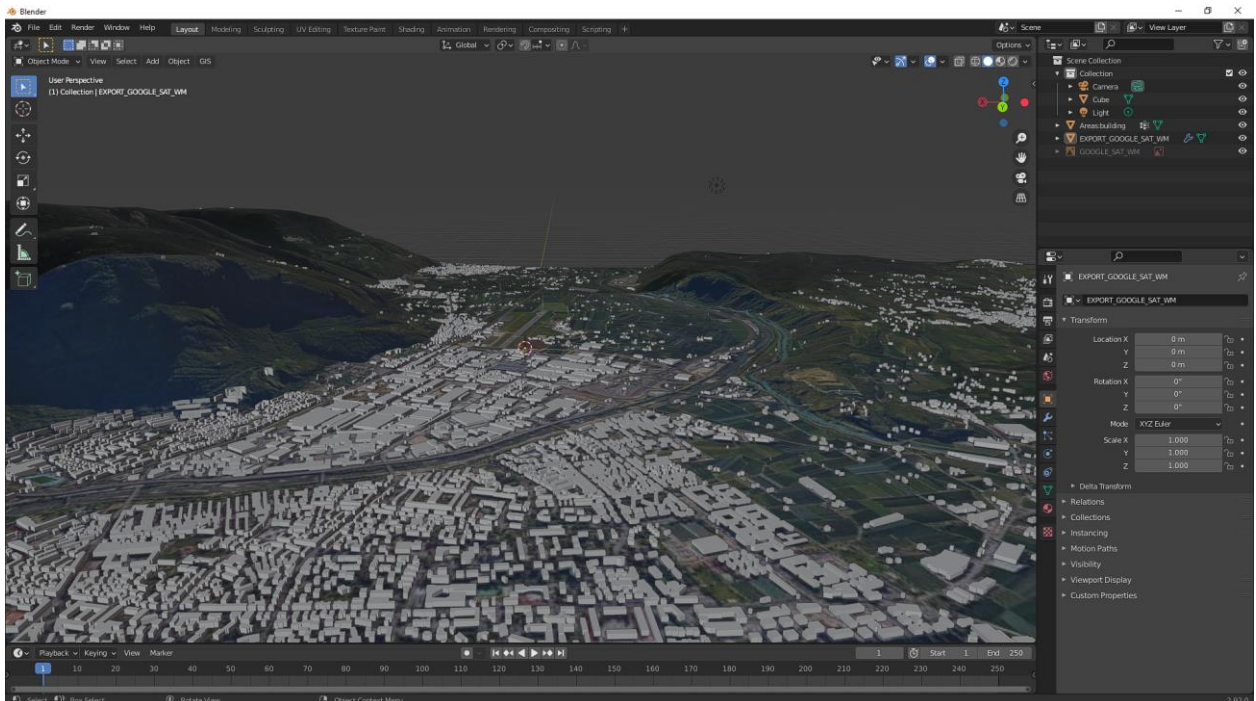


Рисунок 1.18 Тривимірна карта, створена за допомогою BlenderGIS

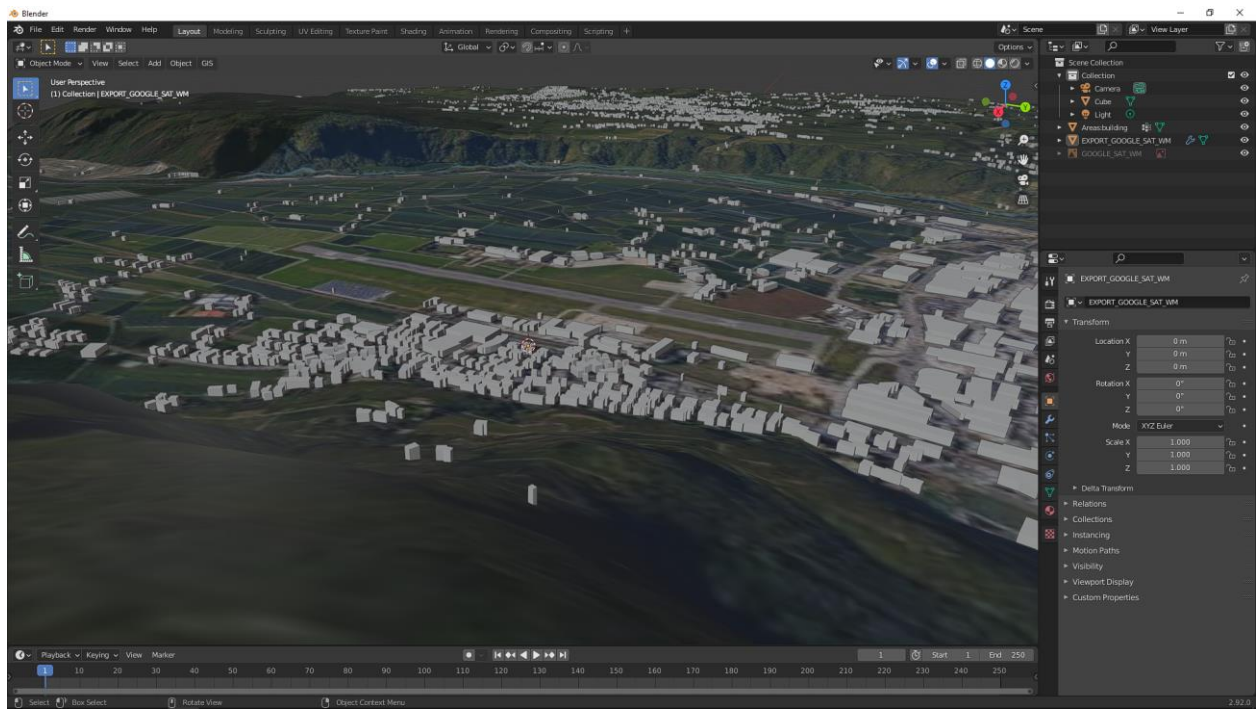


Рисунок 1.19 Висоти і будівлі

Метод BlenderGIS.

Переваги:

- 0 грошових вкладень;
- простий у виконанні;
- різні погодні умови можуть бути додані до потрібної області, імітація реального вигляду локації;
- 3D-карту можна створити в будь-який час і в будь-якому місці.

Недоліки:

- повністю залежить від даних NASA і Google;
- низька якість текстури;
- на карті не зображені рівні ґрунту та рослинності;
- рідкісне оновлення бази даних;
- будівлі візуалізуються лише як прості геометричні фігури без текстури.

РОЗДІЛ 2: LiDAR

2.1 LiDAR та його принцип роботи

Третій спосіб виконується за допомогою LiDAR.

LiDAR – виявлення та визначення дальності за допомогою світла. Це активна система дистанційного зондування, яка використовує світлову енергію та її інтенсивність для створення топографічного зображення.

«Активна система» означає, що ця система сама генерує енергію, в нашому випадку – світло.

Є щось спільне між усіма пристроями LiDAR – повітряним пристроєм LiDAR і налаштуванням диференціальної базової станції GPS. Ці два компоненти мають GPS на базі. На антенному блоці є підключена GPS-антена, лазерний сканер, IMU та приймач GNSS для антени. У деяких моделях може бути суміщена камера.

Принцип роботи: система LiDAR випромінює імпульс світлової енергії. Потім ця енергія відбивається від поверхні назад до датчика LiDAR, де вона реєструється. Щоб обчислити висоту об'єкта на поверхні землі, система вимірює час, який потрібен для того, щоб світлова енергія пройшла від LiDAR до землі та назад до датчика. Потім система використовує швидкість світла, щоб обчислити відстань між верхньою частиною об'єкта та LiDAR, розміщеним на літаку.

$$\frac{(\text{travel time} \times \text{speed of light})}{2} \quad (1)$$

Через турбулентність повітря неточність розрахунків неминуча. Тут на допомогу приходять IMU. Рухи літака реєструються та враховуються цією системою, коли значення висоти обчислюються для кожного повернення світлового імпульсу. Щоб охопити велику площу, система LiDAR сканує поверхню землі з боку в бік. Ось де терміни «надир» і «не-надир» з'являються на місці.

КАФЕДРА АВІОНІКИ

Розробив	Поліщук В.В.			Тривимірна візуалізація маршрутного польоту системи попередження зіткнень	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник	Чужа О.О.					40	103
Н – контр.	Левківський В.В.				AB-154-M		
Зав. каф.	Грищенко Ю.В.						

«Надир» — це напрямок, що вказує прямо вниз, у напрямку сили тяжіння, на місце або на об'єкт. Зображення «надір» і «поза надір» стосуються кута літака по відношенню до його цілі під час збору інформації.

Збір даних про ціль «за межами надира» більш вигідний, оскільки таким чином забезпечується ширше покриття землі за один проліт літака, а також надаються додаткові деталі зображень і важлива інформація про об'єкти, які часто закриті від огляду «надира».

Деякі імпульси поширюються вертикально від літака до землі, безпосередньо в «надір», більшість із них залишають систему під кутом «поза надіром», тому системі LiDAR також потрібно враховувати кут імпульсу, коли вона обчислює висоту.

Залежно від того, на яку поверхню потрапляє світловий імпульс, він може повністю відбиватися або проходити через об'єкт, як листя дерева. Таким чином, світловий імпульс, спрямований на дерево, проходитиме та записуватиме інформацію, починаючи від верхівки крони дерева, через крону й аж до землі. Ці віддачі зсередини крони дерева розповідають нам більше про те, що відбувається всередині об'єкта або його структуру, форму або щільність. Один світловий імпульс має кілька різних віддач з різною інтенсивністю. Розподіл енергії світлового імпульсу створює хвилю. Чим більше енергії повертається датчику, тим вищим є пік форми сигналу.

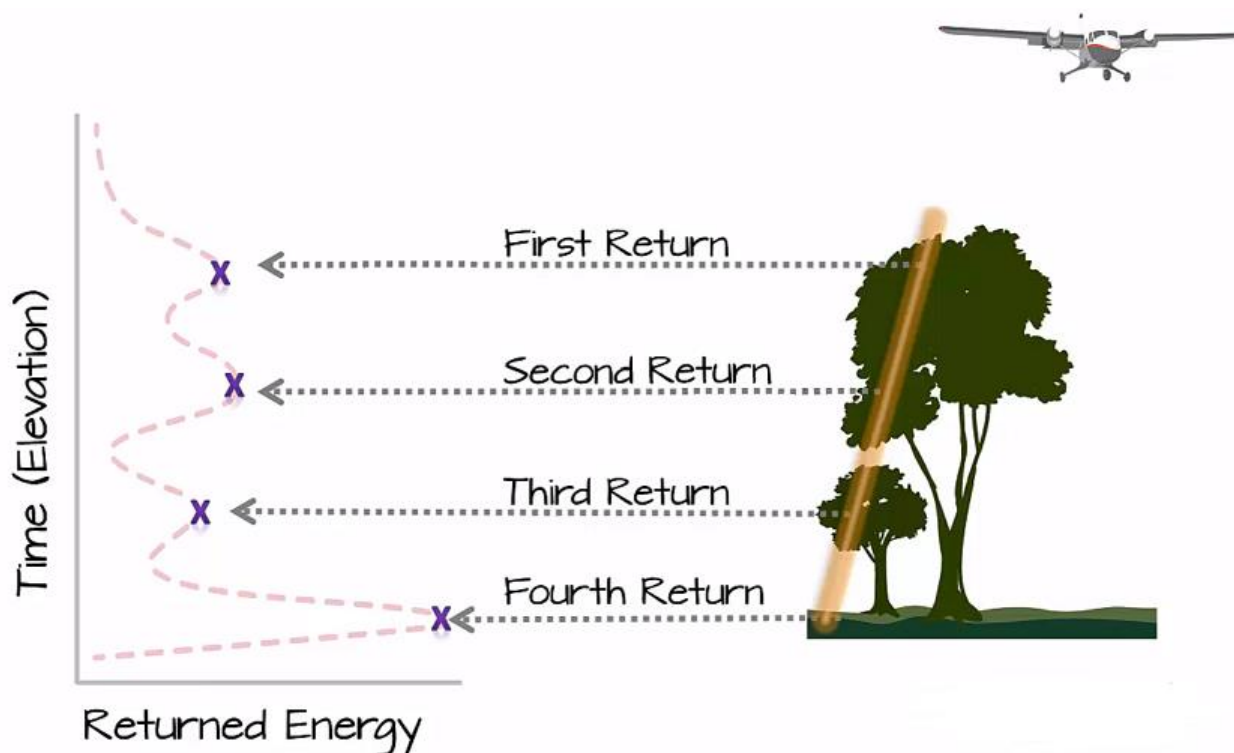


Рисунок 2.1 Розподіл енергії імпульсу від LiDAR

Розподіл енергії (віддача) можна записати двома способами: дискретним і повним сигналом.

LiDAR з дискретним поверненням – це компактна система діаметром 20-80 см, яка реєструє 1-5 повернень через об’єкти на поверхні землі та через купол. Дискретне повернення має для кожного повернення загальну кількість повернень і число повернень, але у файлі результатів (наприклад .las) кожне повернення не прив’язане до відповідного імпульсу (імпульсу, який ініціював повернення). Ще одне вимірювання, до максимальної кількості, дозволеної датчиком, буде записано, якщо інтенсивність відбитого сигналу перевищує встановлений поріг. Якщо на поверхні землі немає навісу – один імпульс матиме один вихід на землю.



Рисунок 2.2 Мультиспектральний Ortech Titan LiDAR дискретного повернення на літаку

Змінні коефіцієнти посилення використовуються для компенсації різного рівня яскравості ландшафту. У деяких системах LiDAR і програмному забезпеченні для обробки призначаються додаткові значення, які визначають, чи було повернення одним або одним із кількох, це позначки даних, а не нові вимірювання. У системі LiDAR з дискретним поверненням використовується алгоритм виявлення цілі. X, Y, Z, інтенсивність та інші атрибути обчислюються для кожної цілі або віддачі для кожного лазерного імпульсу. Дані зазвичай надаються як тривимірна хмара точок.

Проблема з дискретним поверненням LiDAR полягає в тому, що залежно від типу алгоритму, який використовується для аналізу даних, може бути певний проміжок часу, коли він виявляє об'єкт, і системі, можливо, доведеться перезавантажитися, через що вона може пропустити щось на поверхні землі.

2.2 LiDAR повної форми сигналу (Full Waveform)

Система Full Waveform LiDAR записує розподіл енергії повернутого світла та інтенсивність відбитих лазерних фотонів як функцію часу для подальшого аналізу. Experimental Advanced Airborne Research LiDAR (EAARL) від NASA — це відносно

легкий, малопотужний датчик, призначений для встановлення на легких літаках, який включає в себе повнохвильовий адаптивний LiDAR з растровим скануванням і проникненням у воду, кольорову цифрову дзеркальну фотокамеру, що дивиться вниз, багатофункціональну - спектральний сканер і масив точних кінематичних GPS-приймачів, що забезпечує субметрову геоприв'язку кожного лазерного та гіперспектрального зразка. EAARL здатний виявляти, захоплювати та автоматично адаптуватися до кожного зворотного розсіювання лазера у великому динамічному діапазоні сигналу та налаштований на значні варіації вертикальної складності поверхневої цілі.



Рисунок 2.3 Full waveform EAARL на літаку

Двигунна Cessna 310 здатна нести установку LiDAR, рухаючись із номінальною швидкістю 97 вузлів (50 м/с) на висоті 300 м і живлячи лазер зі швидкістю 2000/с. Ширина смуги лазерного сканування становить 240 м на висоті 300 м уздовж траєкторії польоту, що в середньому відповідає одному точковому вимірюванню LiDAR на квадратний метр. EAARL здатний розпізнавати вертикальну складність цілі на поверхні під час польоту, що суттєво зменшує обсяг даних над оголеною місцевістю, одночасно дозволяючи фіксувати детальне відображення імпульсної форми над лісами та мілководдям. Лазерний передавач може створювати до 5000 короткочасних (1,2 наносекунди), малопотужних (70 мкДж) імпульсів із довжиною хвилі 532 нм кожен секунду. Кожен лазерний імпульс енергії фокусується в області діаметром 20 см на робочій висоті 300 метрів.

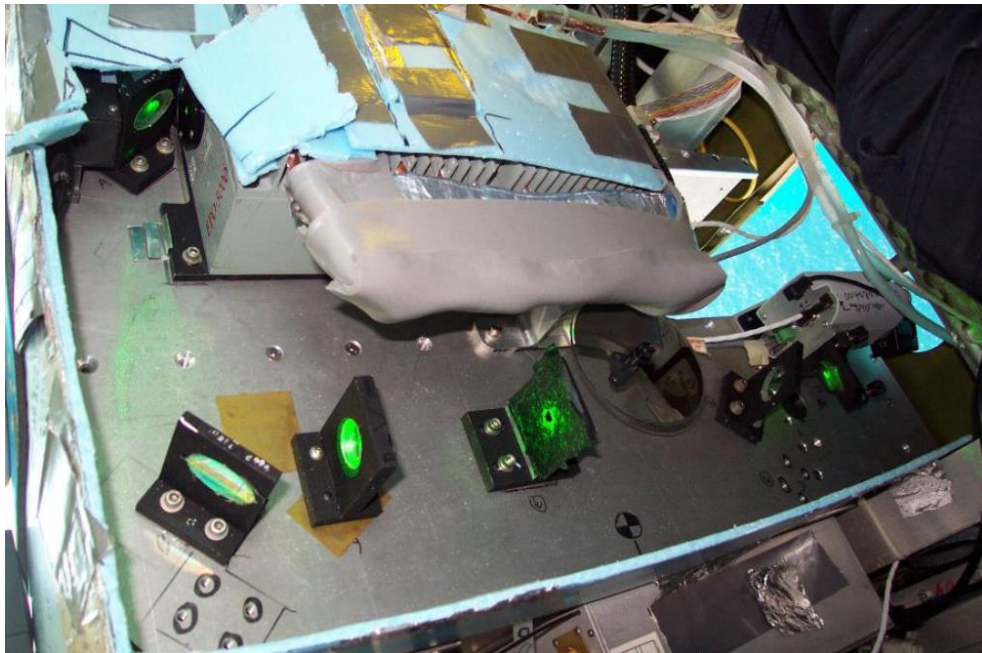


Рисунок 2.4 Робота лазера EAARL

Чотири високошвидкісних оцифровувача форми сигналу синхронно вловлюють енергію зворотного розсіювання кожного лазерного імпульсу. Вони з'єднані з чотирма субнаносекундними фотодетекторами з різною чутливістю до яскравості. Конкретна фракція динамічної енергії зворотного розсіювання лазерної енергії вимірюється кожним фотодетектором, що дозволяє отримувати різні типи поверхні від піщаних пляжів до лісової рослинності. Один зворотно розсіяний енергетичний лазерний імпульс оцифровується в 65 536 зразків, що призводить до понад 150 мілі цифрових вимірювань, що виконуються щосекунди.

Характеристики лазера: призначений для підповітряного та підводного застосування, використовує зелений (532 нм) лазер для максимального проникнення води, охоплює понад 43 км²/год, ширина смуги ~240 метрів, розмір сліду ~15 см, горизонтальний зразок відстань ~1 x 1 м. Кожна форма хвилі лазера вимірюється кожні 1 нс, що еквівалентно, вертикально, кожні 15 см у повітрі та 11 см у воді. Глибина дослідження EAARL становить близько 25 метрів за ідеальних погодних умов.

А як щодо точності? Як правило, один GPS ніколи не буде точнішим, ніж приблизно метр. Це пов'язано з абераціями сигналів, що надходять із супутників. Поки сигнал GPS передається від супутника до GNSS-приймача LiDAR, він може

взаємодіяти з грозовою хмарою або будь-якою іншою іншою погодою, яка відхиляє сигнал через атмосферу. Встановлення диференціального налаштування GPS (базова) виправить це викривлення загального режиму. Отже, щоб спроектувати точку даних з LiDAR на землю, система повинна знати, де вона розташована в повітрі. Він отримує високоточне місцезнаходження від диференціального GPS, він знає, як він орієнтується за допомогою IMU, і на основі всіх цих даних він може вимірювати відстань від лазерного місцезнаходження.

Існує два способи налаштування диференціального GPS:

1) RTK – Real-Time Kinematic – GNSS LiDAR у режимі реального часу отримує дані від супутників, які, як ми вже говорили, вразливі до аберацій, і базової станції, щоб виправити розташування зображення. Оскільки установка GPS є нерухомою, її місцезнаходження точно відоме, а LiDAR рухається, між ними відбувається обмін інформацією, а потім установка GPS надішле назад дані корекції на основі свого розташування відносно LiDAR і супутника. Добре те, що корекція даних завершується відразу після польоту.

Але з методом RTK є певна кількість проблем:

- чим більше технологій використовується – тим більші зміни відмов
- між базою і системою LiDAR, базою і супутником, супутником і LiDAR повинен бути стабільний і безперервний сигнал зв'язку, тобто якщо зв'язок буде перервано - буде втрачена точність вимірювання;
- сканування за межами ELVOS (розширена лінія видимості) або BVLOS (за межами прямої видимості) неможливе;
- дані корекції після обробки недоступні;
- якщо положення базової станції змінюється через сильний вітер чи з іншої причини, його потрібно коригувати лише після завершення польоту – перевага в реальному часі втрачається.

2) PPK – Post-Processing Kinematics – LiDAR і базова станція записують дані із супутників і залишають їх для вилучення після польоту. Після польоту дані з бази додаються до даних LiDAR, щоб виправити помилку аберації супутникового сигналу за допомогою відповідного програмного забезпечення. Цей процес підвищує точність

отриманих даних приблизно до 1-2 см. У випадку РРК передача даних підключення між базовою станцією та LiDAR не потрібна, єдине, що має значення, це телеметрія між дроном і базовою станцією дрона. Якщо на літаку поставити LiDAR, то навіть у цьому немає потреби. Додаткова причина, чому метод РРК є більш точним, полягає в тому, що дані можна використовувати для зворотної та прямої обробки будь-яких прогалів, щоб виправити їх. Цей спосіб набагато простіше налаштувати, оскільки немає потреби в такій кількості постійно працюючих посилок. Також немає потреби в з'єднанні між наземною станцією дрона та базовою станцією. Єдиний недолік цього методу в тому, що корекцію можна проводити тільки після польоту.

Таким чином, це може виглядати так, ніби RTK заощадив час, оскільки виправлені дані надаються в момент приземлення, але, враховуючи кількість речей, які можуть вплинути на цей процес, іноді це неминуче. РРК набагато простіше налаштувати, збір даних є більш надійним, оскільки нестабільні канали телеметрії видаляються, а час після обробки значно менший порівняно з часом, який знадобився б для повторного запуску польоту, якби один із каналів даних RTK передавався невдачу, до якої вони схильні.

Під час сканування особливо великої території, щоб оцінити горизонтальну точність, слід зібрати наземні контрольні точки. Це означає, що чіткі об'єкти (повітряні цілі) повинні бути розміщені на місцевості так, щоб їх було видно для реєстратора даних LiDAR. Це може бути намальований на дорозі квадрат контрастним кольором по відношенню до загального кольору ландшафту, хрестоподібний предмет або наклейка. Потім необхідно розташувати базу прямо посередині цих повітряних цілей і зафіксувати їх точне розташування.



Рисунок 2.5 Контрастні мітки

2.3 Обробка даних LiDAR

Продук даних та постобробка

Перевірка якості даних LiDAR

Для обробки топографічних даних LiDAR необхідні два основні етапи: внутрішня перевірка якості вихідних даних і зовнішня перевірка якості. Перевірка якості в основному означає перевірку трьох ключових моментів: щільність даних (забезпечення правильного виведення цифрової моделі рельєфу), горизонтальна та вертикальна точність даних. Щільність даних може бути недотримана, якщо навігаційна зйомка не виконується належним чином, це призводить до появи розривів між сусідніми смугами або над акваторією, оскільки вода, теоретично, поглинає інфрачервоне випромінювання. Карту щільності з файлами даних зазвичай надають оператори.

Видалення викидів, які можуть бути результатом деяких перешкод на шляху світла, включено до контролю якості топографічних даних. Викиди – це здебільшого вимірювання, які не підкоряються геометрії місцевої поверхні та не пов'язані з топографією області інтересу. Він також включає фільтрування об'єктів, які не цікавлять користувача, щоб отримати цифрову модель рельєфу, що відображає справжню висоту землі. Сигнатури дна набагато складніше виявити на батиметричному LiDAR, сигнатури землі досить легше отримати на топографічному LiDAR, але на практиці всі групи точок переглядаються окремо, і інтерпретатор повинен вирішити, чи було знайдено дно чи ні. Це залежить від аналізу сигналів і контексту сусідніх точок. Стояча рослинність, наприклад морська трава та ламінарія, може модулювати зворотне розсіювання світла, що ускладнює виявлення дна.

Триплети (xyz), які виражені в еліпсоїдному вертикальному відліку та в будь-якій відповідній горизонтальній системі координат, є першим продуктом, який оператор LiDAR просять надати.

Продукт	Формат	Тип	Коментар
ЦММ	xyz (z=LP)	4 км ² tile	Відфільтрований до землі

DEM	xyz (z=LP)	4 км ² tile	Усі дані Z
Рослинність	Xyz (z=перш. імп. – ост. імп.)	4 км ² tile	Рослинність > 0,5м
Інтенсивність	xyi (інтенс. ПІ) xyi (інтенс. ОІ)	4 км ² tile	Некалібрований цифровий кол
TIN MNT	TIN (напр. ArcGIS)		
Меш MNT	GRID (напр. ArcGIS)	5м (повний розмір)	Тільки швидкий огляд
Щільність точки	GRID(напр. ArcGIS)	5м	Показує прогалини в даних

Таблиця 2.1 Набір даних LiDAR

Набори даних мають бути оброблені, щоб отримати справжні дані про висоту без викидів. У більшості випадків його слід ще раз перевірити за допомогою відповідного програмного забезпечення, здатного працювати з великими базами даних. Хоча продукт сітки може бути створений шляхом швидкої інтерполяції на сітці середнього розміру, як правило, 5 метрів, для використання як швидкого перегляду даних, користувачеві може знадобитися готовий до використання файл сітки ЦММ з найкращою роздільною здатністю, наприклад як метрика.

2.4 Батиметричний продукт LiDAR

Система LiDAR передає положення дна (xyz) за допомогою еліпсоїда WGS 84 і висоти води, яка дає рівень поверхні води, який визначається за великим вікном усереднення для більшої надійності та висоти хвилі. Кожна крапка позначена прапорцем, який вказує, чи було виявлено землю чи воду, а в останньому випадку – чи було виявлено дно. Мітки часу дозволяють порівнювати дані з даними про припливи. Амплітуда сигналу також доступна, однак, якщо фотони, що повертаються, проходять через фотопомножувач, результуючий сигнал виражається у вольтах, що ускладнює розрахунок енергетичного балансу. Деякі системи LiDAR

можуть надавати відповідне програмне забезпечення для візуалізації хвиль у кожній точці, що покращує індикацію типу дна.

1	WGS84 довгота дна
2	WGS84 широта дна
3	WGS84 глибина дна (м), -100 = не знайдено
4	Північ (м) дна
5	Схід (м) дна
6	Глибина (м), без приливної поправки
7	Індекс пікселя
8	Позначка часу (час GPS у секундах тижня)
9	Клас глибини, 0 = не знайдено, 4 = земля, 7 = дно
10	Висота хвилі (м)
11	Амплітуда глибини (амплітуда приймаючого імпульсу)
12	Витягнуті атрибути сигналу
13	Використані дані приймача
14	Скринінг виведення вручну

Таблиця 2.2 Батиметричний вихідний продукт LiDAR

2.5 Точність даних

Зазвичай повідомляється про вертикальну та горизонтальну точності батиметричного LiDAR $\sim 0,15$ та $\sim 0,30$ середньоквадратичного значення (середнє квадратичне значення). Батиметричні дані зазвичай добре узгоджуються зі стандартною якістю Міжнародної гідрографічної організації (ІНО), тобто із середньоквадратичною точністю 5 м по горизонталі та 0,25 м по вертикалі. Знижена точність пояснюється більшою розбіжністю зеленого променя, який зазвичай створює відбиток діаметром 3 м на поверхні моря. Оскільки відбиток нижче має принаймні такий самий розмір, пікове світло, розсіяне назад, відбивається від великої площі, що знижує точність.

2.6 Програма і алгоритм

Програма, яка використовується для обробки даних LiDAR, заснована на LINUX і називається «ALPS» (Airborne LiDAR Processing System), розроблена NASA і USGS, заснована на мовах програмування Yoric і TCL/TK. Це дозволяє користувачам використовувати графічний інтерфейс користувача (GUI) для виконання необхідних завдань обробки. Обробка виконується невеликими частинами плиток розміром 250 x 250 м, які групуються у великі індексні плитки 2 км x 2 км. Це сприяє підвищенню організованості та ефективності процесу. Перший погляд на встановлені дані забезпечується шляхом поєднання необроблених даних про форму хвилі LiDAR, точної навігації та інформації про висоту. Цей алгоритм обробки був розроблений для виділення діапазону до першого та останнього значного повернення в межах кожної форми сигналу.

Форми сигналів Pixel перевіряються на ослаблення лазера у воді, автоматичний контроль підсилення, порогове значення, перше й останнє виділення, а потім вони коригуються для вибору справжньої поверхні землі чи морського дна. Перевірка точності параметрів виконується шляхом повторення цього процесу, і залежно від області та якості води можна виконувати різні коригування. Якщо є дані з помилками, їх можна видалити вручну, просто намалювавши навколо них додаткові багатокутники та вилучивши цю область із набору даних. Той самий процес повторюється для всіх даних, зібраних LiDAR під час польоту, а потім він запускається через конвертер даних, щоб перетворити їх у NAD83/GRS 80, NAVD88, що призводить до створення вихідних даних ASCII хуз.

Є два додаткові кроки постобробки для покращення якості даних EAARL, вони застосовуються до даних хмари точок:

- 1) Використання відповідного фільтра даних у пакеті ALPS. Дані точок, пройшовши через фільтр, імпортуються до Fledermaus Pro, яке є програмним забезпеченням для редагування та візуалізації, де вони перевіряються та редагуються. Після цих операцій відредаговані хмари точок поділяються на сітки та перевіряються на наявність вертикальних і горизонтальних розбіжностей відносно попередніх

сканувань і наземних контрольних точок. ALPS може виконувати два типи процесу фільтрації. Перший, у більшості випадків, використовується для першого повернення даних і називається фільтром випадкового консенсусу. Аналітик даних визначає розмір горизонтального квадрата та вертикальний допуск, який вибирається на основі щільності точкових даних і топографічної складності середовища, а також визначає область дії фільтра. Для кожного квадрата, що не перекривається, фільтр шукає вертикальне положення, яке максимізує кількість точок даних у обсязі фільтра, і всі точки, розташовані за межами цього об'єму, виключаються фільтром.

2) Він називається ітеративним фільтром випадкового консенсусу, який набагато повільніший за попередній і використовується для фільтрації топографічних даних останнього повернення та батиметричних даних під водою. Перше повторення — це використання RCF — пошук перших оцінок земної поверхні, що представляють елементи хмари точок, у яких так звані «виключені» точки зберігаються, але позначаються відповідним чином. З перших оціночних базових точок створюється триангульована нерегулярна мережа (TIN). Ітераційний процес починається з перекласифікації «виключених» точок, які входять в діапазон їхньої відповідної грані в триангульованій нерегулярній мережі, які потім обчислюються з «прийнятими» точками, повторюючи процес, використовуючи решту пулу «виключених» точок.

Відфільтровані точкові дані редагуються в програмному забезпеченні Fledermaus Pro, де вони розділяються на блоки по ~150 000 точок, редагованих у перпендикулярних до берега зрізах шириною максимум 25 метрів. Помилкові результати можна знайти в останніх і перших даних повернення, оскільки ефективність процесу фільтрації не є 100%. Вони розташовані вище або нижче загального середнього рівня поверхні на кілька метрів або більше, їх легко визначити та видалити.

2.7 LiDAR і фотограметрія

Залежно від методу захоплення, активного чи пасивного, точність набору даних хмари точок може відрізнятися, маючи різні нерівності, мінливість щільності точок, деякі відсутні дані, шум і точки, що перекриваються. Очевидно, що дані LiDAR

набагато точніші, ніж фотограметричні дані, оскільки останні результати є змінними. Дані LiDAR не орієнтовані на створення детальної 3D моделі реального світу; він більше зосереджений на показі різних рівнів того, що знімається, наприклад поверхні землі, низької, середньої та високої рослинності. Пасивні датчики, камери, роблять набагато більш реалістичною 3D модель реального середовища.

Новий метод покращення якості хмари точок був розроблений GeoSpatial Laboratory при Ліванському університеті, який базується на поєднанні хмари даних LiDAR і структури з руху (SfM) та інтеграції фільтра нейтральної щільності на пасивному датчику. Вони підвищили точність хмари точок SfM, збільшили щільність хмари точок LiDAR, а також покращили кольори хмари точок. Випробовуючи злиття хмари точок і вплив чотирьох нейтральних фільтрів щільності, таких як ND-4, ND-8, ND-16 і ND-32, на забарвлення хмари точок, було досліджено кількісне та якісне покращення хмари точок.

Набори даних від об'єднання даних LiDAR і SfM підвищують зручність використання, створюючи хмару точок за допомогою методів LiDAR і SfM і використовуючи метод ітеративної найближчої точки (ICP). Сенс цих методів полягає в тому, щоб об'єднати хмари точок LiDAR і фотограметрію в один кадр картографування. Оскільки на зображення з дрона може впливати яскраве сонячне світло, рекомендується знімати дані, коли інтенсивність сонця нижча, або використовувати фільтри нейтральної щільності.

Як було написано раніше, геореференцію як LiDAR, так і фотограметрії в одній системі координат можна зробити за допомогою RTK і PPK. Зменшення відстані між вихідними хмарами точок LiDAR і найближчими парами точок фотограметрії стало можливим завдяки ітераційному алгоритму найближчої точки, що підвищило точність. Однією з сильних сторін цього методу є пряме використання вимірних даних, що означає, що інтерполяція та інше редагування даних не потрібні. Він намагається знайти оптимальне найбільш відповідне перетворення між двома хмарами точок шляхом мінімізації середньої відстані відповідної пари точок.

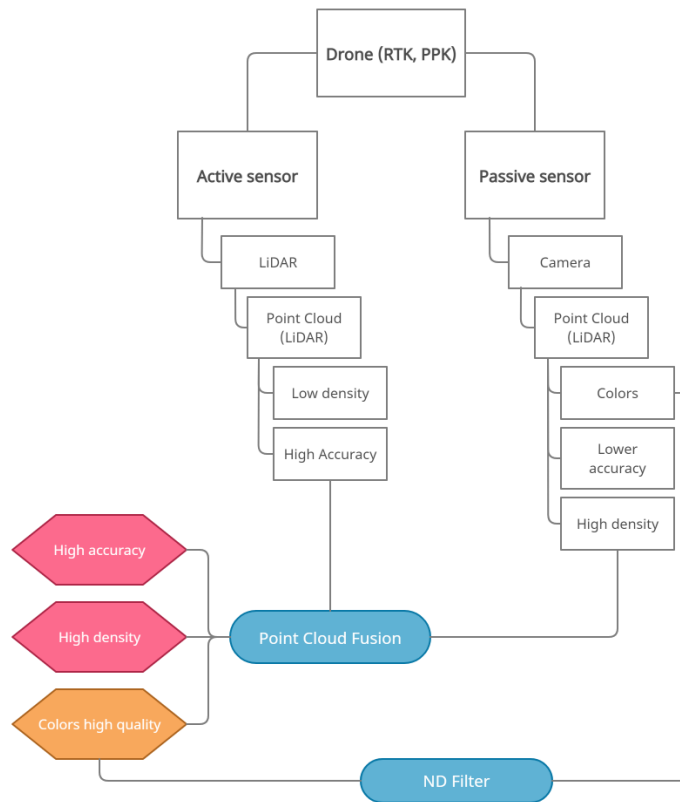


Рисунок 2.6 Якісне та кількісне вдосконалення хмари точок LiDAR

Нова комбінована хмара точок може бути описана високою точністю LiDAR і високою щільністю хмари точок SfM. У вибраній області було зібрано 845669 точок LiDAR, а також 343 кадри, зроблені камерою, все на одній платформі та на висоті 150 метрів. Після застосування технології SfM було створено хмару точок у шість мільйонів точок. Візуальний якісний аналіз використовує такі характеристики, як форма, форма та щільність. Кількісний аналіз використовує щільність хмари точок. Візуалізація хмар точок різних наборів даних показує різницю між шумом, щільністю точок і деталями, і через цей шум із непередбачуваністю різних фотограметричних хмар точок існують обмеження у використанні фотограметрії та хмари точок LiDAR для виявлення меж будівель.

Крім того, оскільки LiDAR є активною системою, заснованою на лазерному промені, він може виявляти тонкі структури, такі як огорожі ліній електропередач тощо. Візуальний аналіз меж будівельних ліній показав, що LiDAR створює точніші геометричні форми, тоді як на дані SfM впливають тіні, сліпі плями, що призводить до порожніх точкових областей. За допомогою алгоритму ICP ця проблема

вирішується, оскільки він заповнює ці порожні області точок даними з хмари точок LiDAR.

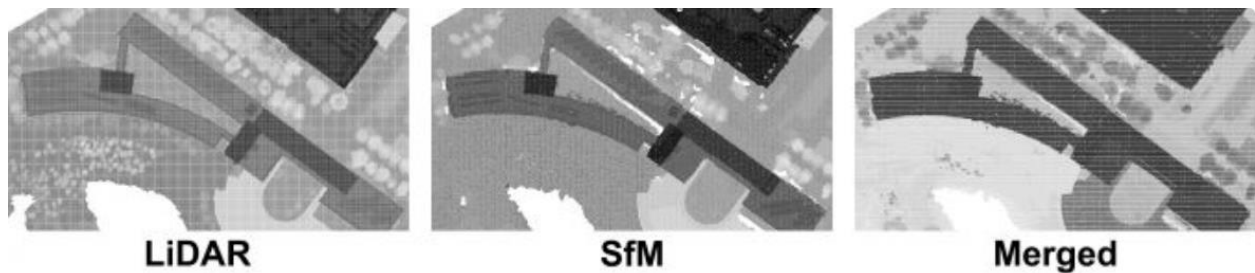


Рисунок 2.7 Дані зібрані за допомогою LiDAR, SfM та їх комбінованої хмари точок

Фільтр нейтральної щільності не змінює колір світла, яке проходить крізь нього, але може зменшувати світло на одну, дві, три та більше ступенів, що дозволяє зменшити швидкість затвора. Було здійснено п'ять польотів на тій же території, щоб перевірити ці фільтри ND з використанням камер без фільтра, з ND-4, ND-8, ND-16 і ND-32. Після обробки результатів п'ять хмар точок мали однакові характеристики, але різні кольори, текстуру та радіометрію. Найбільш детальними хмарами точок були ND-8 і ND-16. Найгірший результат показав ND-32, але його варто використовувати тільки при високій інтенсивності сонця.

Номер фільтра	Фільтр оптичної щільності	F/Stop Зменшення	% Пропускання
ND4	0.6	2	25%
ND8	0.9	3	12.50%
ND16	1.2	4	6.25%
ND32	1.5	5	3.13%

Таблиця 2.3 Технічні характеристики фільтра ND

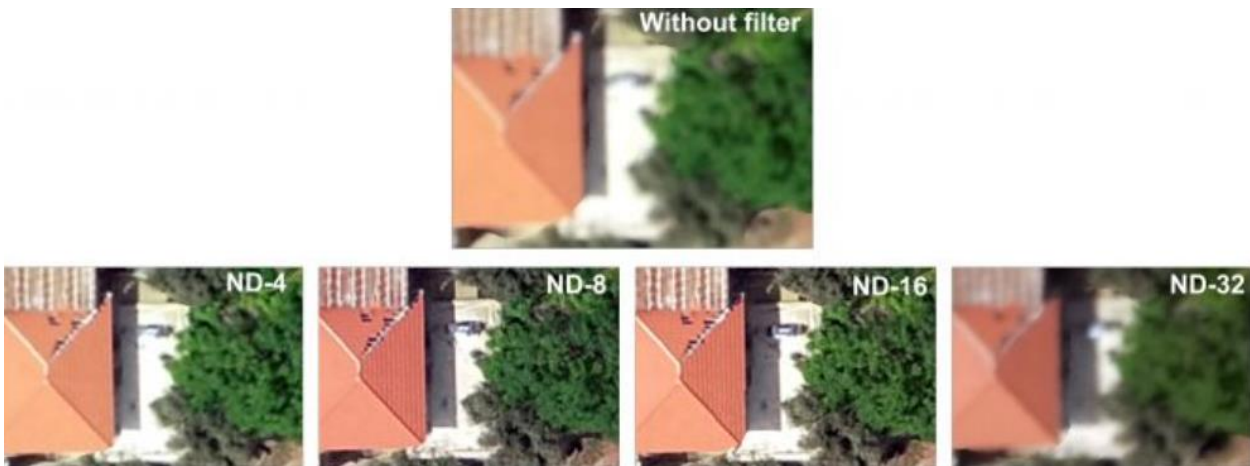


Рисунок 2.8 Хмари точок з використанням різних фільтрів

Висновок: дані LiDAR і фотограметрії, об'єднані в хмару точок, дозволяють заповнити прогалини у фотограметричній хмарі точок, покращити хмару точок низької щільності LiDAR. Обидва методи збору даних доповнюють один одного, збільшуючи загальну кількість деталей, надзвичайно підвищуючи точність зображення, що показує нижню частину дуже густої рослинності, і надаючи щільні текстури високої роздільної здатності набору даних.

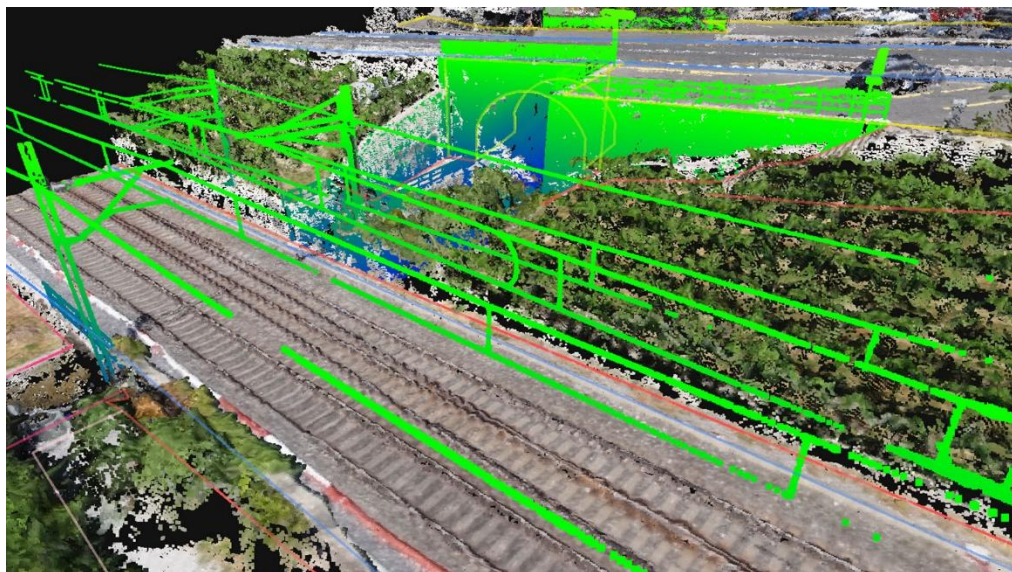


Рисунок 2.9 Комбінація хмар точок LiDAR і фотограметрії

2.8 Порівняння ціни та якості LiDAR

І DJI LiVOX mid-40 (700 \$), і RIEGL miniVUX (180 000 \$) будуть тестуватися в однакових умовах: однаковий план польоту, над землею (AGL) і однакова швидкість польоту. Висновок «дорожче означає краще» буде зроблено за чотирма критеріями:

- 1) скільки точок на квадратний метр створюється на безперешкодній поверхні, як-от дорога чи тротуар;
- 2) скільки точок на квадратний метр створено під густою рослинністю;
- 3) загальна точність цих точок на основі трьох різних місць у наборі даних;
- 4) загальна працездатність і простота використання системи та польотні характеристики.

RIEGL miniVUX буде встановлено на дрон DJI Matrice M600 із 6 роторами для резервування та контролером польоту DJI A3, який має потрійний резервний GPS та IMU, тобто якщо один із них виходить з ладу, дрон автоматично перемикається на наступний, зберігаючи автопілот. Цей безпілотник має велику вантажопідйомність, що підходить для цієї системи LiDAR, і шість батарей, кожна з яких має потужність 99 Вт/год.

DJI LiVOX mid-40 встановлюється на DJI M210 із системою RTK, рейтингом IP, тому він захищений від води та пилу, у нього вбудована камера огляду від першої особи, а також уникнення перешкод на передній і нижній сторонах, що дозволяє дрону підходити для безпечних посадок.

1) Тест проводився тричі на різних ділянках. На площі 5 м x 5 м, в середньому, точкові дані RIEGL miniVUX становлять 118 точок на квадратний метр; а на DJI LiVOX mid-40 – 298 точок на квадратний метр. LiVOX отримує майже втричі більше балів за квадратний метр порівняно з RIEGL.

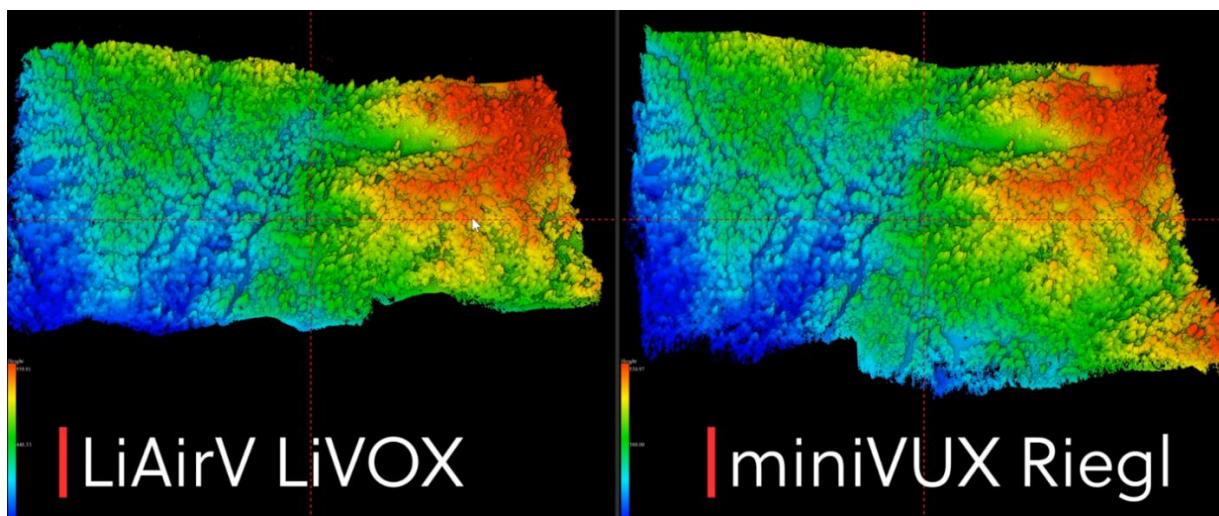


Рисунок 2.10 Хмари точок LiVOX і RIEGL

2) Для проведення цього тесту набір даних LiDAR необхідно класифікувати на ґрунт, низьку рослинність, середню рослинність і високу рослинність, щоб відокремити рослинність від ґрунту на кінцевому зображенні результату.



Рисунок 2.11 Хмара наземних точок LiVOX

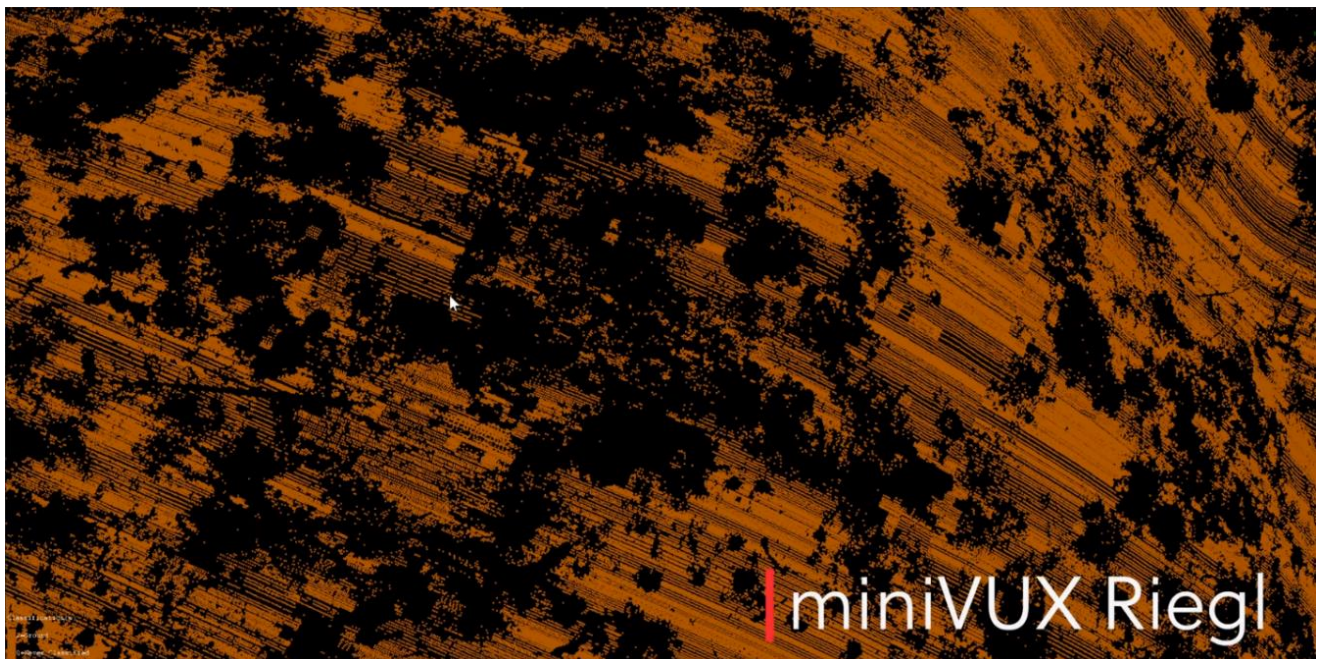


Рисунок 2.12 Хмара наземних точок RIEGL

Середні дані про наземну точку, зібрані LiVOX, становили 23,6 точки на квадратний метр, тоді як RIEGL зміг зібрати лише 13,9 точки на квадратний метр. Різницю в зборі даних можна пояснити тим фактом, що LiVOX робить 100 000 точок на секунду, спрямованих прямо до землі, при цьому має унікальний шаблон пелюстків, тому

імпульс має більше можливостей досягти землі під різними кутами. У той час як RIEGL також робить 100 000 точок за секунду, але при обертанні на повні 360 градусів, тому більшість цих точок піднімаються в повітря збоку.

3) Для оцінки відносної точності будуть обрані три місця. Хмари точок були розфарбовані за часом, щоб можна було відрізнити два набори даних один від одного, а також точки перекриття були вимкнені, тому можна було бачити лише точки в одному рядку сканування. Отже, про відносну точність цих двох дронів можна буде судити, дивлячись на відносну точність, на розповсюдження даних, щоб побачити різницю у відстані від найвищої та найнижчої точок.



Рисунок 2.13 Порівняння розкиду LiVOX і RIEGL на твердих дорогах RIEGL має набагато щільніший шаблон розкиду середніх точок вимірювань із 3,25 см, тоді як LiVOX має 7 см. Ці вимірювання були зроблені на ділянці на твердій дорозі.

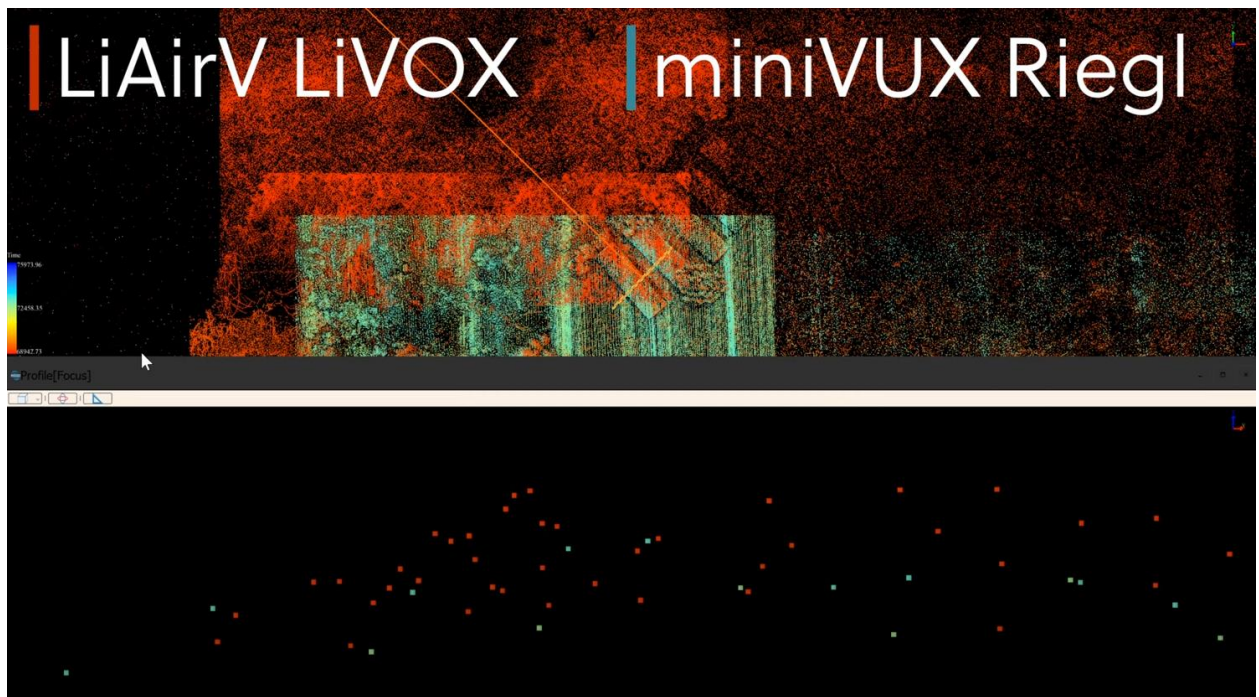


Рисунок 2.14 Порівняння точкового розносу кутової поверхні LiVOX і RIEGL Далі — поверхня під кутом. Середня схема точкового розносу для LiVOX становила 7 см, тоді як RIEGL мав 3 см.

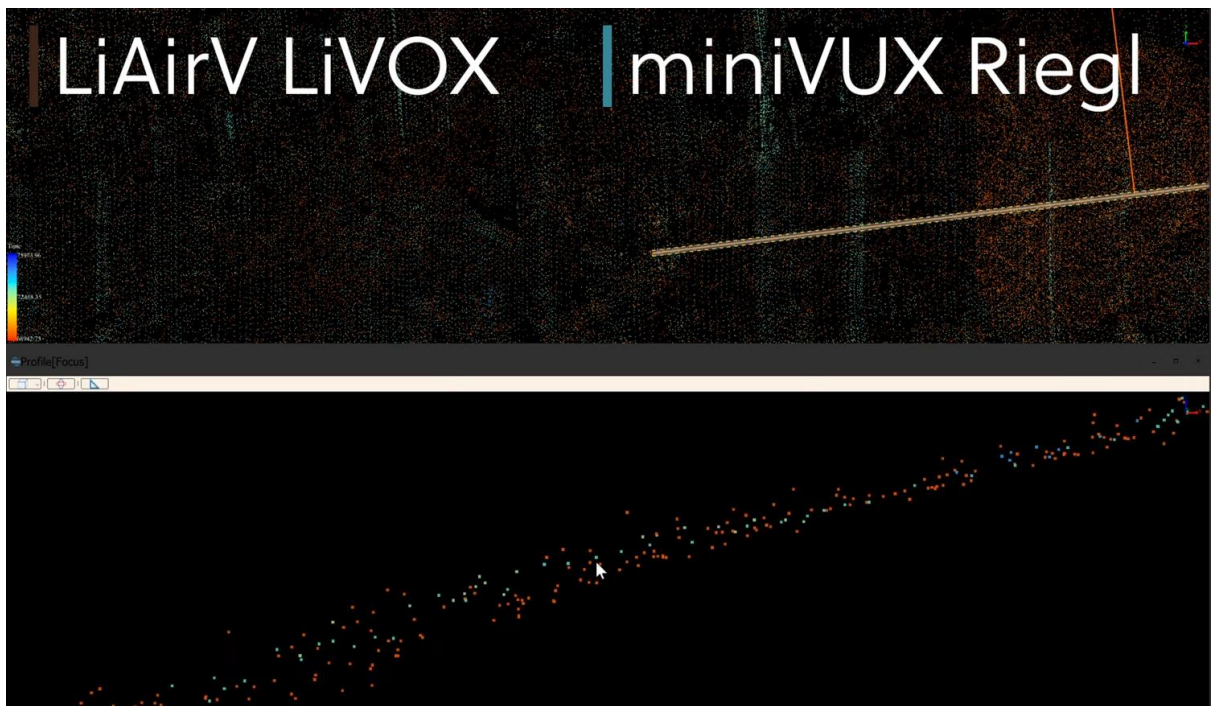


Рисунок 2.15 Порівняння точок розносу рослинності LiVOX і RIEGL Третій і останній тест на рослинній ділянці. Зрозуміло, що LiVOX LiDAR має набагато більший розкид точок, ніж RIEGL. Однак розмір розкиду можна пояснити реальним ефектом від високих трав. Середній розмір діафрагми LiVOX становив 17 см, а RIEGL — 13 см.

4) DJI Matrice M600 з RIEGL miniVUX — це вражаюча платформа з великою вантажопідйомністю, стабільністю та відмінними показниками безпеки польоту. Але це обходиться ціною сумісності: 6-роторний безпілотник, здатний піднімати важке обладнання, має величезні розміри, і для транспортування з місця на місце потрібен великий транспортний кейс (80 см x 71 см x 72 см). Як було сказано раніше, M600 потребує шість батарей на один політ, а для збору необхідних даних знадобилося чотири польоти, в результаті чого ми маємо 24 використані батареї. RIEGL має джерело живлення від зовнішніх акумуляторів для LiDAR, що означає можливість гарячої заміни батарей і продовження місії одразу після цього.

DJI M210 з DJI LiVOX mid-40 — набагато компактніша установка. M210 набагато менший, ніж M600, тому кейс для транспортування компактніший (70 см x 69 см x 40 см), має набагато меншу вантажопідйомність, ніж M600, і вдвічі дорожчий. M210 знадобилося два польоти, щоб зібрати необхідну та дві батареї для кожного польоту, що загалом становить чотири використані батареї. LiVOX LiDAR не має внутрішньої батареї, тому, якщо вийняти обидві батареї, вся система вимикається, і місію потрібно починати заново. Отже, гаряча заміна для продовження виконання місії є трохи складнішою, і її потрібно робити обережніше. Встановлення LiVOX на M210 є складною операцією через обмежену вагу дрона, і це більше стосується точного знаходження ідеальної точки центру ваги. Однак, якщо все зроблено правильно, політ стабільний без проблем.

Висновок: дешевший датчик LiVOX краще фіксував точки на квадратний метр на вільній поверхні та під рослинністю, тоді як RIEGL продемонстрував більш вузький середній розподіл точок і більш гнучкий діапазон використання обладнання, навіть незважаючи на те, що розмір і вага системи набагато більші. Все залежить від того, де, як часто і з якою метою ці системи будуть використовуватися. Але враховуючи те, що M600 з більшою вантажопідйомністю майже вдвічі дешевше M210, то розумніше віддати перевагу M600, незважаючи на те, що для польоту потрібна більша кількість батарей. Незважаючи на те, що LiVOX показав дуже хороші

результати, його не можна використовувати в операціях, де потрібні сканування на 360 градусів і більш точні вимірювання.

У випадку з LiDAR використання дронів має сенс, оскільки, наприклад, RIEGL може сканувати територію на 360 градусів, що в рази збільшує потенційну зону покриття. Хоча автономність дронів поки під питанням. Тому, знову ж таки, НЛ в цьому плані набагато вигідніше. Дані LiDAR у поєднанні з даними фотограметрії мають найвищі показники точності, деталізації та редагування. Отримані карти мають кілька рівнів відображення і ідеально підходять для впровадження в систему літака.

LiDAR на дроні:

Переваги:

- велика кількість даних про рельєф і рослинність;
- більш широкий діапазон використання інформації;
- більш інформативне зображення та дані;
- здатний збирати дані про морське дно;
- більш висока точність даних;
- повністю автоматичний політ;
- відносно дешево - залежить від того, яке сканування місцевості потрібне: якщо сканування на 360 градусів – потрібен дорогий датчик, якщо ні – датчик за 700 доларів зробить роботу ідеально
- висока маневреність
- немає потреби у злітно-посадкових смугах через VTOL.

Недоліки:

- надзвичайно дорого, якщо потрібно 360-градусне сканування (умовно);

LiDAR на літаку:

Переваги:

- велика кількість даних про рельєф і рослинність;
- більш широкий діапазон використання інформації;
- більш інформативне зображення та дані;
- здатний збирати дані про морське дно;

- більш висока точність даних;
- більша площа покриття;

Недоліки:

- для успішного виконання процесу потрібно більше планувати політ;
- менша маневреність;
- потрібен спеціально модифікований літак;
- потрібен фахівець, який вміє поводитися з обладнанням.

LiDAR і фотограметрія:

Переваги:

- максимально точні дані;
- максимально детальні дані;
- дані з максимально широким діапазоном доступного редагування;
- найширший спектр використання інформації;
- максимально інформативне зображення та дані

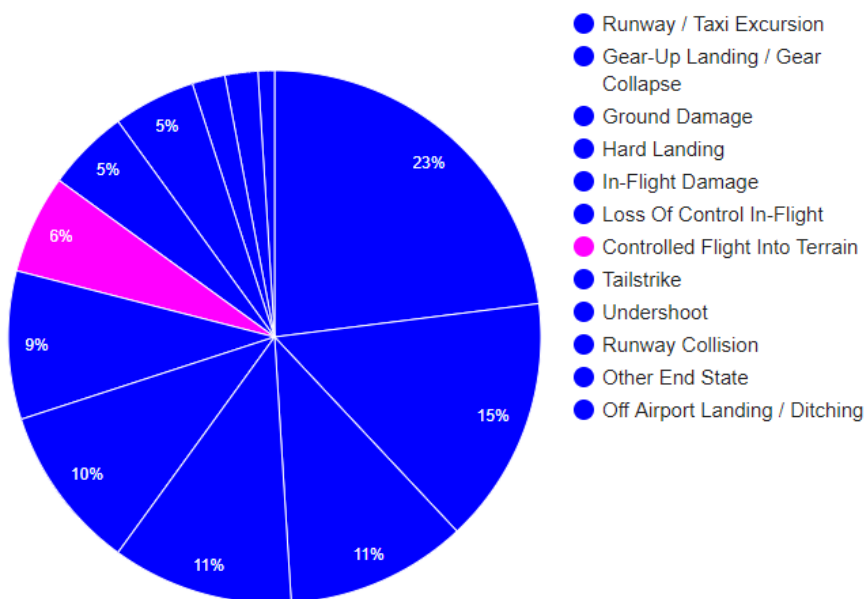
Недоліки:

- польоти виконувати з наземними базовими станціями, розташованими на тих же місцях;
- найдовший час обробки;

РОЗДІЛ 3: Зіткнення із землею в керованому польоті (CFIT)

Відповідно до звіту «IATA Controlled Flight Into Terrain Accident Analysis Report 2008-2017» 6% з усіх аварій, які сталися за цей період часу, були класифіковані як CFIT. Це друга категорія за кількістю смертельних випадків, що включає 42 аварії зі смертельними наслідками та 28% від загальної кількості аварій зі смертельними наслідками, а також категорію з найнижчим коефіцієнтом виживання (829 смертельних випадків). 24 аварій CFIT (51%) були пасажирські перевезення, 18 аварій CFIT (38%) були вантажні перевезення і 5 аварій CFIT (11%) були рейси поромів. Слід зазначити, що цей звіт не враховував авіацію загального призначення, ділову та військову авіацію, польоти в рамках незаконної діяльності, польоти з гуманітарною допомогою, обприскування посівів та інші сільськогосподарські польоти, події, пов'язані з безпекою, такі як викрадення, експериментальні, тестові польоти та аварії на тренувальних польотах.

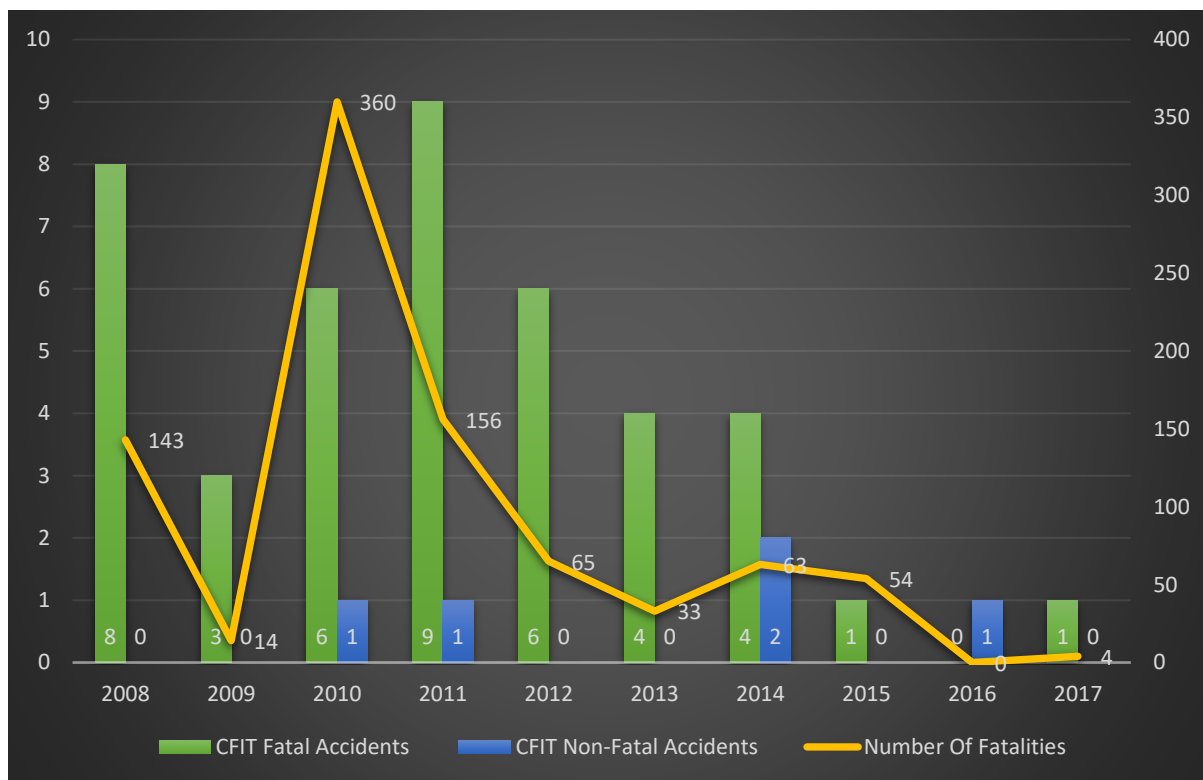
PERCENTAGE OF COMMERCIAL ACCIDENT CATEGORIES IN RELATION TO THE TOTAL ACCIDENTS



Графік 3.1 Відсоток категорій комерційних нещасних випадків по відношенню до загальної кількості нещасних випадків

КАФЕДРА АВІОНІКИ							
Розробив	Поліщук В.В.			Тривимірна візуалізація маршрутного польоту системи попередження зіткнень	Лім.	Арк.	Аркушів
Керівник	Чужа О.О.					64	103
Н – контр.	Левківський В.В.				АВ-154-М		
Зав. каф.	Грищенко Ю.В.						

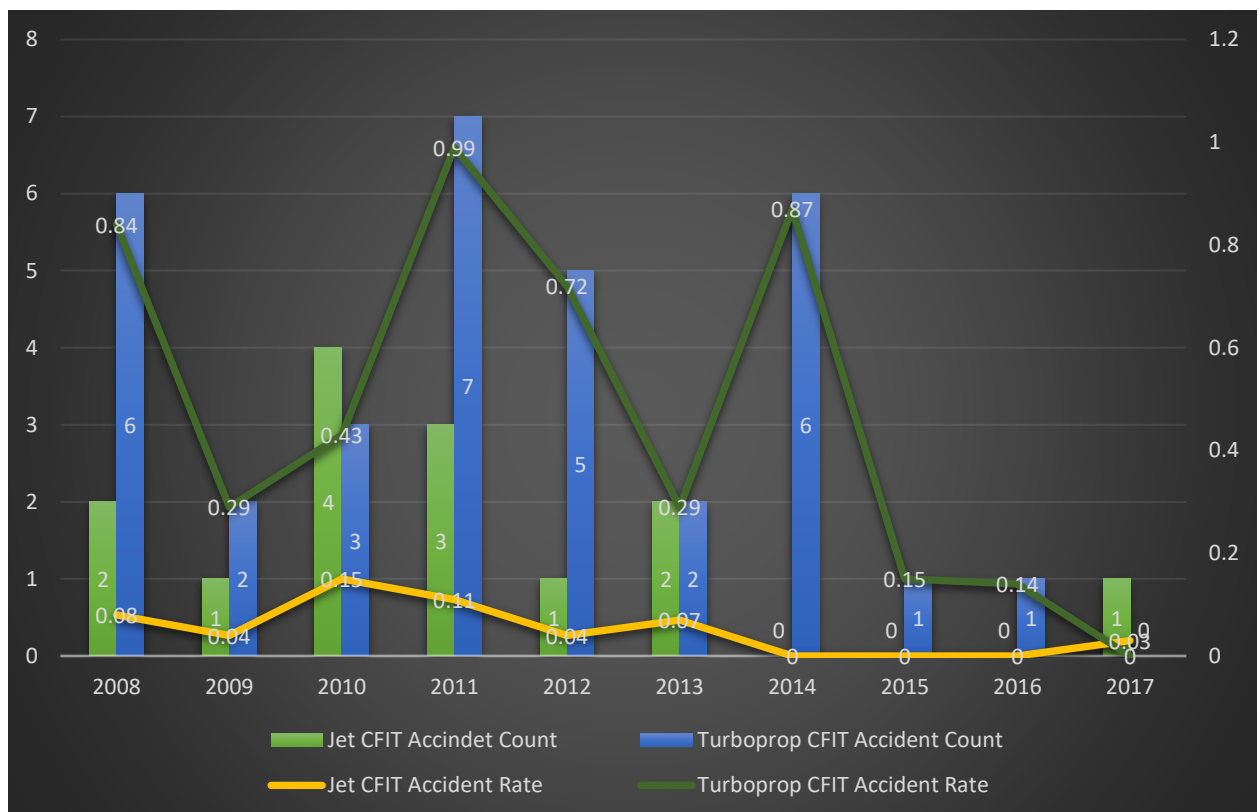
Протягом багатьох років рівень CFIT знижувався як у смертельних, так і без смертельних випадків. Найбезпечнішим роком із найменшою кількістю смертельних випадків (0) був 2016 рік. Тенденцію до зниження можна пояснити створенням та впровадженням системи попередження про наближення до землі та системи попередження про місцевість. Існує багато різних факторів і вдосконалень, які могли сприяти цьому зниженню прямим чи опосередкованим чином, наприклад, покращення дизайну літака та стандартів польоту, краща підготовка пілотів, заміна процедури неточного заходження на посадку на процедуру точного заходження на посадку, візуальне та інструментальне заходження на посадку, керівництво та процедура, техніка кінцевого заходження на посадку безперервного зниження та система попередження про мінімальну безпечну висоту.



Графік 3.2 Розподіл аварій зі смертельним і несмертельним наслідком CFIT та кількість загиблих

Розподіл аварій CFIT можна розділити за типом авіаційної рушії, в якій реактивні літаки зазнали 14 аварій (30% від загальної кількості), а турбогвинтові літаки – у 33 аварій (70% від загальної кількості аварій CFIT). У 2014, 2015 та 2016 роках не було аварій за участю реактивних літаків, а в 2017 році стався лише один

нещасний випадок. Якщо ми перетворимо частоту аварій реактивних і турбогвинтових літаків у кількість аварій на мільйон секторів, виявиться, що реактивні літаки мали помітно низький середній рівень CFIT (0,05), ніж турбогвинтові літаки (0,47). У 2017 році з усіх комерційних рейсів 16,5% виконувались на турбогвинтових двигунах і на них припадало 44% усіх аварій CFIT, з яких 5 (із 6 загальних) аварій були смертельними.

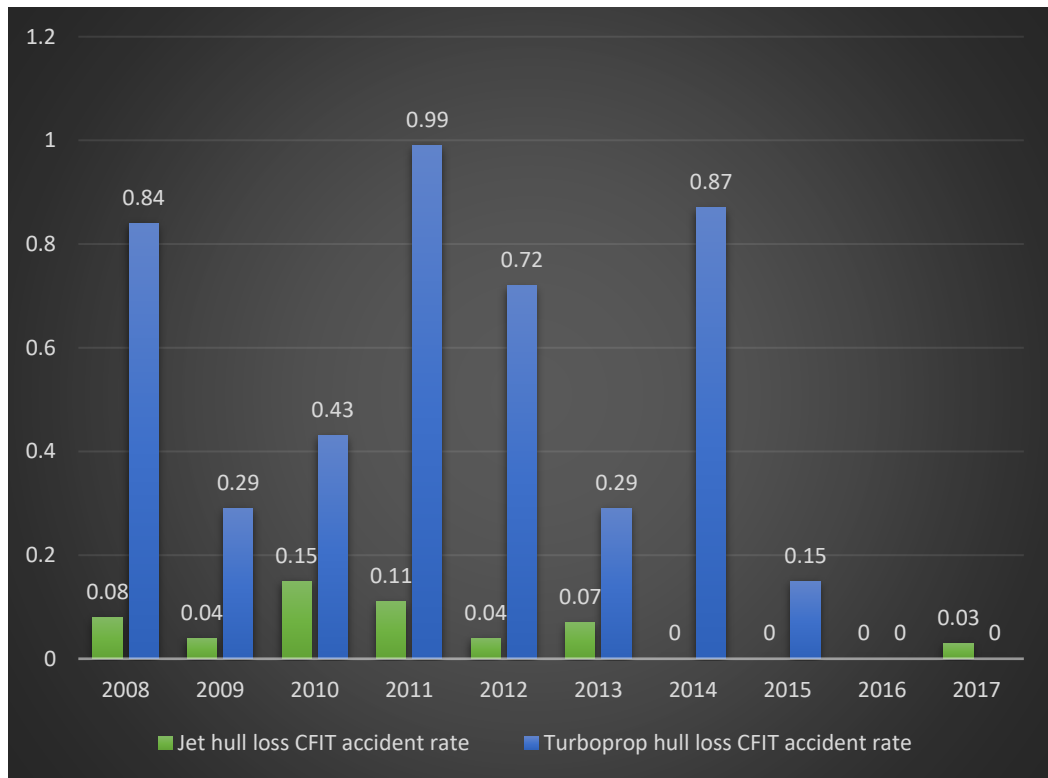


Графік 3.3 Розподіл рівня та кількості аварій реактивних і турбогвинтових CFIT

Аварії CFIT найчастіше трапляються на етапах заходу на посадку, посадки та набору висоти. Протягом цих років 21 смертельна аварія CFIT сталася під час заходу на посадку та 3 несмертельні аварії CFIT. Під час посадки сталося 5 летальних і 2 несмертельних аварій CFIT. Під час сходження сталося 5 нещасних випадків CFIT зі смертельним результатом. Із 47 аварій CFIT 46 призвели до втрати корпусу, з яких 42 аварії спричинили 892 загибелі. Лише 4 аварії закінчилися втратою корпусу і не було загиблих, і лише 1 аварія призвела до значних пошкоджень літака.

Майже 70% усіх аварій із загибеллю корпусу CFIT припадає на турбогвинтові літаки, решта 30% – на аварії реактивних літаків. 2016 рік став найбезпечнішим як

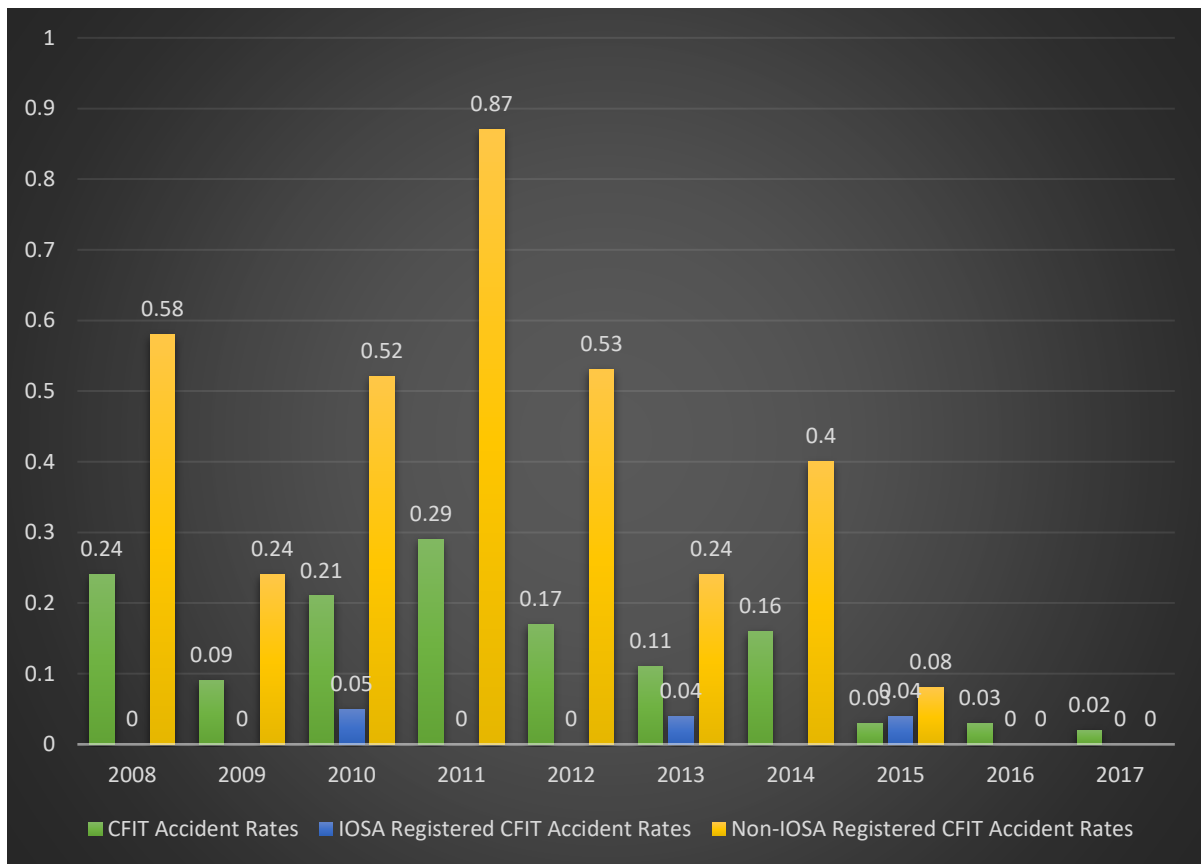
для реактивних, так і для турбогвинтових літаків з точки зору аварій з втратою корпусу CFIT. У 2014 та 2015 роках було 0 записів втрати корпусу CFIT реактивних літаків. Коли ми нормалізуємо дані за коефіцієнтом на мільйон секторів, розподіл частоти аварій із втратою корпусу CFIT за типом силової установки літака виглядає так:



Графік 3.4 Розподіл частоти аварій із втратою корпусу CFIT за типом силової установки літака

Після того, як аудит експлуатаційної безпеки IATA став умовою членства в IATA, рівень аварій як для реактивних, так і для турбогвинтових літаків був найнижчим. IOSA — система оцінки, яка враховує дані щодо наявності та руху повітряних суден за етапами життєвого циклу та фазами в межах кожного етапу; дані обліку напрацювання, результати контролю та діагностики стану ПС, у тому числі дані реєстраторів інформації та бортових автоматизованих систем керування; облікові дані для застосування контрольних дій (наприклад, під час виконання відповідних програм технічного обслуговування). Жодна авіакомпанія не може стати членом IATA без реєстрації IOSA. Однак є 146 не членів IATA, акредитованих IOSA.

Якщо ми розіб'ємо статистику аварійності членів IOSA та операторів без реєстру IOSA, то ефективність цієї системи оцінки стає незаперечною: у членів IOSA рівень аварій CFIT у 17,5 разів нижчий, ніж у незареєстрованих членів IOSA.



Графік 3.5 Показники аварій CFIT для перевізників, зареєстрованих IOSA, порівняно з незареєстрованими перевізниками

СНД (Співдружність Незалежних Держав) показує найвищий рівень аварій CFIT 0,95 аварій на мільйон секторів. Одна з головних причин такої високої кількості аварій полягає не в тому, що TAWS/EGPWS не встановлені, а в тому, що екіпаж неналежно діяв на сигнали системи. Найбезпечнішим регіоном, який становив 6 аварій CFIT на рік або менше, були Європа (1 аварія CFIT), Північна Азія (2 аварії CFIT) і Близький Схід/Північна Африка (3 аварії CFIT).

Є багато різних факторів, які спричиняють аварію CFIT. Деякі фактори прості, як-от неправильна реакція льотного екіпажу на сигнали GPWS, а деякі складні, як-от працівник технічного обслуговування випадково пошкодив проводку антени ILS, а пілоти не змогли посадити літак за важких погодних умов, оскільки ILS показувала

неправильну інформацію. Щоб запобігти або звести до мінімуму нещасні випадки CFIT, ми повинні розуміти зв'язок між сприяючими факторами та нещасним випадком. Існує чотири основні групи сприяючих факторів, які створюють структуру управління загрозами та помилками (ТЕМ). Ця структура складається з:

Прихований стан – коли загроза може бути спричинена причинами, які не є безпосередньо очевидними або не помітними екіпажу польоту, які були присутні в обладнанні або передпольотній перевірці до настання аварії. Наприклад, скорочений графік роботи, проблема в конструкції обладнання, виникнення оптичної ілюзії.

Екологічні загрози поділяються на 4 основні групи:

- погодні загрози: грози, турбулентність, ожеледь, зсув вітру, бічний/попутний вітер, екстремальні температури, туман;

- УПР: помилка УПР, мовні труднощі, зміна злітно-посадкової смуги, зв'язок АТІС, одиниці вимірювання;

- аеропорт: забруднений, коротка злітно-посадкова та руліжна доріжки, птахи, будівництво аеропорту;

- рельєф місцевості: височина, схил, відсутність посилянь, ефект чорної діри.

Помилки льотного екіпажу – коли льотний екіпаж відхиляється від очікуваної реакції та дій.

Небажаний стан повітряного судна – коли льотний екіпаж неефективно керує помилками, його дії призводять до ситуації, що загрожує безпеці, що зменшує запаси всіх літаків.

Суворі погодні умови, такі як погана видимість, відсутність візуальної орієнтації, включаючи туман, темряву та ефект чорної діри, спричинили 46% аварій CFIT. Обмежена кількість світла на злітно-посадковій смузі різко підвищує ризик аварії CFIT. Пілотам слід надати точний прогноз погоди, щоб зменшити ймовірність CFIT. Інші системи, такі як VGSI (система візуального індикатора нахилу заходження на посадку), VASIS (система візуального індикатора нахилу заходження на посадку)

і OLS (оптична система посадки), можуть забезпечити безпеку літака, але вони майже абсолютно марні під час сильного туману чи дощу.

23 серпня 2000 року Airbus 320-200 під час розходу на друге коло вночі після неточного заходу на посадку не зміг набрати нормальний набір висоти і на великій швидкості впав у море, вбивши всіх 143 пасажирів. Аварія сталася майже за 5 кілометрів від аеропорту. Ця аварія CFIT сталася через людський фактор – пілот надто багато уваги приділяв показнику швидкості за рахунок ADI та ефекту соматографічної ілюзії.

24 березня 2015 року Airbus 320, запущений на безперервне зниження першим офіцером, зіткнувся з землею, убивши 150 пасажирів. Причиною аварії вважають самогубство. Особа, відповідальна за цю аварію, страждала на психічне захворювання до польоту, і симптоми не були виявлені у відповідному сертифікаті пілота.

20 грудня 1995 року Boeing 757-223 впав у гору, загинуло 159 пасажирів, 4 вижили. Катастрофа була спричинена поганим плануванням та виконанням заходження на посадку, ігноруванням сигналів екіпажем та нездатністю припинити заходження на посадку, недостатньою обізнаністю про ситуацію та нездатністю екіпажу повернутися до базової радіонавігації.

28 листопада 1979 року McDonnell DC-10-30 врізався в гору Еребус, убивши всіх 257 пасажирів. Виправлення траєкторії польоту, непоінформованість льотного екіпажу та перенаправлення комп'ютера від протоки Мак-Мердо прямо до гори Еребус стали причиною цієї катастрофи.

Висновок: незважаючи на те, що рівень CFIT знижувався протягом останнього року, проблема з посадкою літаків за поганих погодних умов все ще існує, і небезпека, яку створюють ці умови, переводить пілотів у режим стресу, що змушує їх робити більше помилок, що робить погану ситуацію ще гіршою. З появою нових поколінь літаків проблему безпеки все ще важко вирішити, оскільки є надто багато факторів,

про які слід знати. Аварії CFIT посідають друге місце за кількістю смертельних випадків і перше місце за рівнем живучості пасажирів. Однак завдяки системі висоти, як-от IOSA, яка перевіряє доцільність використання та технічного обслуговування літака, безпека польоту, статистично, забезпечена. Але не кожна авіакомпанія чи компанія є її членом, що збільшує потенційну кількість аварій CFIT. Підготовка пілотів також відіграє велику роль у створенні потенційної аварії CFIT, оскільки недосвідчені пілоти можуть не мати належного досвіду в польотах із поганою видимістю, щоб робити швидкі та правильні виклики. Отже, можна з упевненістю сказати, що належне технічне обслуговування, сертифікація та навчання пілотів є ключем до безпечного польоту.

РОЗДІЛ 4: Труднощі та особливості роботи в умовах поганої видимості та як 3D-мапінг може вирішити низку цих проблем.

Важливість створення 3D карти об'єктів в зоні польоту пояснюється багатьма факторами, що впливають на безпеку польоту. Незважаючи на те, що аварії з контрольованим польотом на місцевість зараз є відносно рідкісним випадком, статистика, зібрана протягом багатьох років, свідчить, що 46% із загальної кількості аварій сталися через погані погодні умови. Туман, мряка, піщана буря, дощ, сніг тощо, усі ці погодні явища відіграють вирішальну роль у тому, як виконуються різні операції аеропорту, яким літкам дозволено приземлятися та злітати. Щоб літак міг приземлитися в умовах обмеженої видимості, він повинен бути оснащений ILS і мати сертифікат CAT II і CAT III, що означає, що літак повинен мати два робочі двигуни, дві різні гідравлічні системи. та електричні системи, два різних інерціальних еталонних блоки повітряних даних (ADIRU) і два робочі автопілоти, два робочі незалежні приймачі ILS і кілька додаткових незначних речей, таких як робочі склоочисники.

Категорія	Висота прийняття рішення	Roll-out Control / Guidance System	Дальність видимості на ЗПС
II A	>30 м	Немає необхідності	200 м
III B	>30 м	Fail-passive	150 м
III B	>15 м	Fail-passive	125 м
III B	>15 м або висота без прийняття рішення	Fail-operational	75 м

Таблиця 4.1 Пояснення категорії підходу

КАФЕДРА АВІОНІКИ							
Розробив	Поліщук В.В.			Тривимірна візуалізація маршрутного польоту системи попередження зіткнень	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник	Чужа О.О.					72	103
Н – контр.	Левківський В.В.				АВ-154-М		
Зав. каф.	Грищенко Ю.В.						

Оскільки під час заходу на посадку CAT III пілоти будуть набагато ближче до злітно-посадкової смуги, перш ніж вони зможуть її побачити, стає набагато важливішим, щоб усі ці системи працювали належним чином. Сам аеропорт також має бути схвалений CAT II та CAT III, що означає, що в ньому має бути повністю вільна чутлива зона ILS.

Чутлива зона ILS – це зона, що виходить за межі критичної зони, де рух транспортного засобу та паркування контролюються для запобігання перешкод сигналу ILS під час наближення ILS. Ця зона має бути рівною, без будівель чи будь-яких потенційних перешкод.

Літак, який вирулює на зліт, не може підійти так близько до злітно-посадкової смуги, як зазвичай. Аеропорт повинен мати резервні генератори з мінімальним часом перемикання, тому в разі відключення електроенергії в аеропорту вони зможуть увімкнутися за дуже короткий проміжок часу. Також має відбутися калібрування самої системи. Така ж проблема існує з літаками, які приземляються, оскільки вони будуть у критичній зоні, а це означає, що літаки позаду літаків, що приземляються, повинні мати більшу відстань. Збільшене віддалення створює схеми очікування літаків навколо аеропорту. Це означає, що буде набагато менше літаків, які приземляються на годину, що неефективно, і аеропорт використовує лише заходи CAT II та CAT III, якщо це дійсно необхідно.

4.1 Особливості заходу на посадку при CAT II/III

Перш ніж навіть думати про захід на посадці CAT III, є перелік речей, які потрібно перевірити та переконатися:

- якщо аеропорт схвалив мінімальні значення CAT III, пілоти можуть побачити це на табличці плану польоту. У деяких випадках, навіть якщо злітно-посадкова смуга може бути затверджена до мінімумів CAT II/III, вона повинна бути перевірена та сертифікована авіакомпанією.

- технічний бортовий журнал літака, тому що він може бути сертифікований CAT II/III, але якщо є будь-які технічні несправності, вони можуть зробити його не

CAT II/III. Наприклад, якщо виникла проблема з автоматичним дроселем, і без роботи автоматичного дроселя літак не сертифікований CAT II/III.

- переконайтеся, що самі пілоти мають сертифікат CAT II/III. Під час рейтингу типу пілоти виконують спеціальну практику заходження на посадку CAT II/III, потім кожні шість місяців, коли вони проходять повторне навчання, вони також тренуються процедуру низької видимості, плюс кожні шість вони повинні виконувати принаймні одну фактичну CAT II/ III процедура для отримання сертифікату.

- пілоти беруть короткий довідник, усередині якого є контрольний список, у якому зазначено, що перший офіцер буде пілотом, який виконує заходження на посадку, капітан буде спостерігати за пілотом, але капітан здійснюватиме посадку. Буде перелік обмежень, тобто не може бути жодного звіту про зріз вітру, оскільки літак не сертифікований для посадки через зріз вітру; існують вимоги до вітру, заходження на посадку CAT II можна виконувати, лише якщо зустрічний вітер менше 25 вузлів, боковий вітер менше 20 вузлів і попутний вітер менше 10 вузлів.

- процедури обмеженої видимості повинні бути забезпечені, пілоти знають про це, слухаючи автоматичну термінальну інформаційну систему (ATIS);

- перший офіцер проведе інструктаж щодо заходження на посадку, який дуже схожий на інструктаж ILS, але замість використання барометричних мінімумів пілоти перемикають мінімальні сектори на радіовисотомір, який використовуватиметься для мінімального наведення, оскільки вони дуже точні.

- коли пілоти вільні для заходу на посадку та знаходяться на перехопленні, прямуючи до злітно-посадкової смуги, пілот, що летить, встановлює другого автопілота. Це дуже важливо, тому що якщо про це забути, то на висоті нижче 450 метрів, в якийсь момент заходження на посадку, пілоти більше не зможуть задіяти другого автопілота.

Вся процедура посадки CAT II/III для пілотів відрізняється від звичайної через обмежену інформацію через низьку видимість. Приблизно за чотири кілометри до злітно-посадкової смуги пілоти опускають шасі, перемикають закрилки на 15 градусів, виконують контрольну, перемикають закрилки на 40 градусів. Причина перемикавання на 40 градусів замість звичайних 30 градусів полягає в тому, що літак

матиме дещо нижче положення носа з приблизно 0 нахилом вгору та вниз. З закрилками 30 він має нахил приблизно на один градус, і проблема полягає в тому, що видимість настільки низька в цих умовах поганої видимості, що кут зрізу кабіни може бути різницею, коли пілот бачить достатньо на мінімальній висоті або йде на другий план.

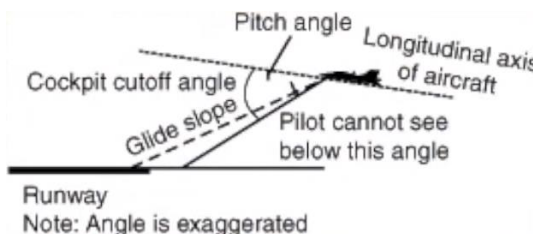


Рисунок 4.1 Пояснення кута при заході

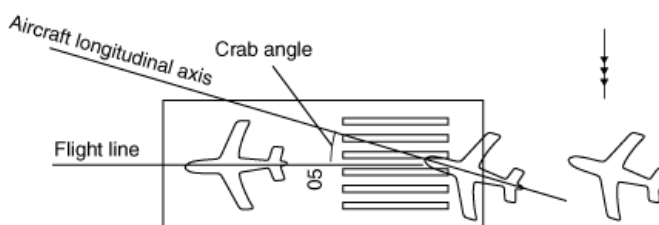


Рисунок 4.2 Пояснення кута зносу

Те ж саме з бічним вітром: боковий вітер з правого боку літака призведе до того, що літак буде рухатися носом трохи праворуч, зберігаючи кут зносу, що допоможе капітану краще бачити зону заходу на посадку. На висоті 150 метрів, на основі вимірювань радіовисотоміра, пілоти повинні переконатися, що літальний апарат готовий виконати автоматичну посадку: капітан викликає «150 метрів по радіо», перевіряє наявність сповіщувача режиму польоту (FMA) і викликає «FLARE», який означає, що літак справді готовий до автоматичної посадки. Під час виконання звичайного підходу CAT I ILS, одного каналу, цього не станеться. На висоті 120 метрів диферент починає рухатися назад, роблячи носову частину літака легкою, чого не сталося б на одноканальному ILS. Існує три причини, чому це відбувається: наприклад, якщо автопілот від'єднається, літак буде налаштований на підвищення тангажу; допомогти літаку виконати ракетну ракету; допомогти пілотам у разі сходження на друге коло.

Як було сказано раніше, щоб виконати заходження на посадку CAT II/III, літак повинен бути оснащений двома автопілотами, які повністю відокремлені один від одного та використовують власний приймач ILS і комп'ютер керування польотом (FCC), щоб повідомляти літаку, що робити. Під час польоту літальний апарат використовує обидва ці вхідні дані, і якщо один із них, наприклад, дає команду літаку повернути праворуч, а інші команди продовжують летіти прямо, літак не знає, яку команду автопілота йому слід слухати. Тому на Boeing-737 автопілот використовує так звану систему «Fail-passive». Канал автопілота, який дає найменший вхідний сигнал, буде керуючим, а потім від'єднайте обидва автопілоти, оскільки система не знає, який вхідний сигнал автопілота правильний. У точці роз'єднання пілоти змушені виконувати відхід на друге коло через нездатність виконувати автоматичну посадку.

Ось чому також потрібен автоматичний триммер, якщо цей сценарій стався на малій висоті, літак спочатку буде нахилитися, щоб відійти від землі. Але це також означає, що як тільки задній диферент працює і фактично трапиться збій, і автопілоти відключаться, пілот, який летить, повинен пам'ятати, виконуючи відхід на друге коло, що весь цей задній диферент увімкнено, літак збирається підвищення висоти, особливо якщо він додав тягу двигуна – це може призвести до надто великого імпульсу висоти. Пілот, який виконує політ, у більшості випадків перший офіцер, повинен пам'ятати про те, щоб висунути ярмо вперед, щоб запобігти надто сильному нахилу літака.

4.2 Впровадження даних LiDAR та фотограметрії в літакові системи.

Майже кожна процедура заходження на посадку CAT II/III виконується через те, що пілоти не можуть бачити злітно-посадкову смугу та територію навколо. Впровадження геоприв'язаних даних з LiDAR і фотограметрії у формі 3D-карти зони польоту аеропорту та його прилеглої території може зробити заходи на посадку в умовах недостатньої видимості навіть безпечнішими, ніж вони є зараз, одночасно знімаючи значну частину робочого навантаження з пілотів, оскільки вони будуть мати справжня 3D карта перед їхніми очима. Тривимірна навігація включає рельєф,

злітно-посадкову смугу, дорожній рух, вежі, усі будівлі в прилеглий зоні та рослинність і, якщо необхідно, морське дно. Сама система може бути повністю налаштована, що означає, що пілоти самі вибирають, що вони хочуть бачити і як це має виглядати. Існують різні режими відображення карти, з яких пілоти можуть вибрати зручний для них 3D дизайн: одноколірна текстура місцевості з контрастними точками інтересу, такими як злітно-посадкова смуга та оточуючі її будівлі; фотореалістична текстура місцевості з якістю зображення в реальному світі; текстура висоти рельєфу, що підсвічує різні рівні висоти різними кольорами; мінімалістична карта місцевості з прозорою текстурою, але з контурами місцевості та контрастними точками інтересу (на Head-Up Display).

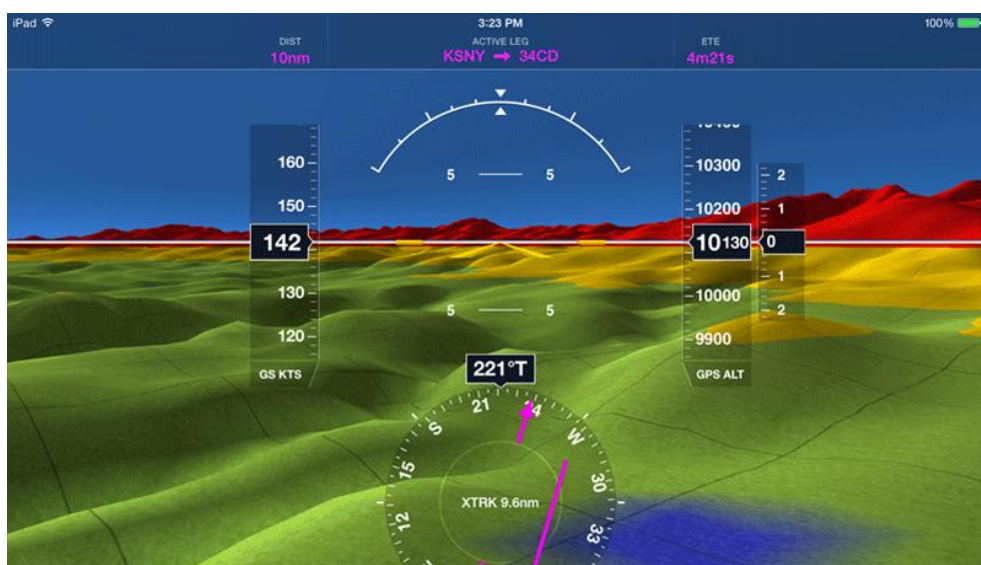


Рисунок 4.3 Приклад карти висот

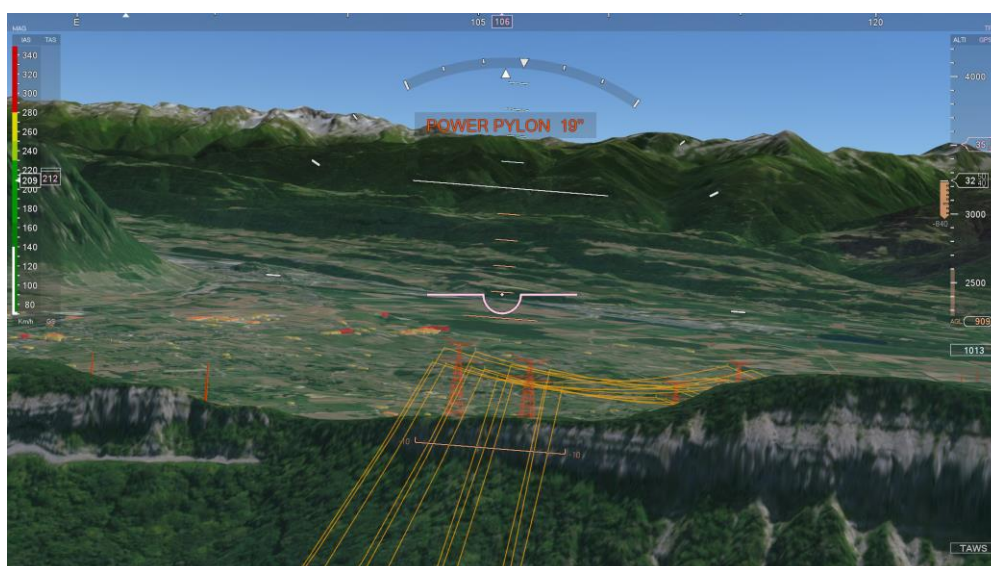


Рисунок 4.4 Приклад 3D-карти реального світу



Рисунок 4.5 Прозора текстура Head-Up Display з контурами та прикладом цікавих місць

Зараз існує система, яка включає як 3D-карту, так і різні системні інтерфейси, такі як Flight Management System (FMS), Highway-In-The-Sky (HITS), Ground Collision Avoidance System (GCAS), Traffic Collision Avoidance System (TCAS), Electronic Flight Instrument System (EFIS), Instrumental Landing System (ILS) тощо. Вона називається «Система синтетичного бачення» (SVS) і використовується для покращення ситуаційної обізнаності пілота, особливо під час заходу на посадку та зльоту в умовах недостатньої видимості. Перш ніж установлювати цю систему на літак, вона має відповідати всім мінімальним вимогам безпеки, задокументованим у RTCA DO-315B/Eurocae ED-179B. Крім того, пілоти повинні пройти навчання, щоб запобігти нестандартному використанню системи або неправильному використанню, як частину рейтингу типу повітряного судна та відповідати всім вимогам для отримання кваліфікації для використання SVS. Однак точність цієї системи далека від досконалості, оскільки вона схильна до пошкодження даних, а це означає, що в разі несправності менш досвідчені пілоти можуть швидко втратити обізнаність про ситуацію, якщо вони не навчені швидко переходити до традиційної інформації з приладів. .

LiDAR + фотограметрія дає нам надзвичайно точні дані про рельєф, перешкоди, інфраструктуру аеропорту, які можна об'єднати з бортовим GPS і даними про орієнтацію планера з системи координат і курсу (AHRS), яка використовує твердотільні гіроскопи, акселерометри та магнітометри. Він порівнює реальне

розташування літака, проектує та синхронізує його на карті, показуючи точне положення, висоту, курс та інші різні параметри на екрані в режимі реального часу. Щоб уникнути неточностей у позиціонуванні літака на карті, методи навчання штучного інтелекту (AI) можуть бути реалізовані як повністю незалежна система, яка б порівнювала дані GPS літака, реальне зображення місцевості, над якою літає літак, і 3D картографує геодані, щоб навчитися комбінувати всі введені дані та перетворювати їх у точне місцезнаходження літака. AI матиме лише вхідні дані, а не вихідні, тому він виконуватиме роль спостерігача, лише збираючи та аналізуючи дані, і не втручатися в процес польоту.



Рисунок 4.6 Порівняння реального рельєфу з 3D-картою того самого рельєфу

ILS з комбінацією 3D-карти, зокрема, може полегшити виконання заходів на посадку CAT II/III завдяки можливості створення та візуального відображення необхідних порогів, необхідної швидкості та висоти прямо на карті.

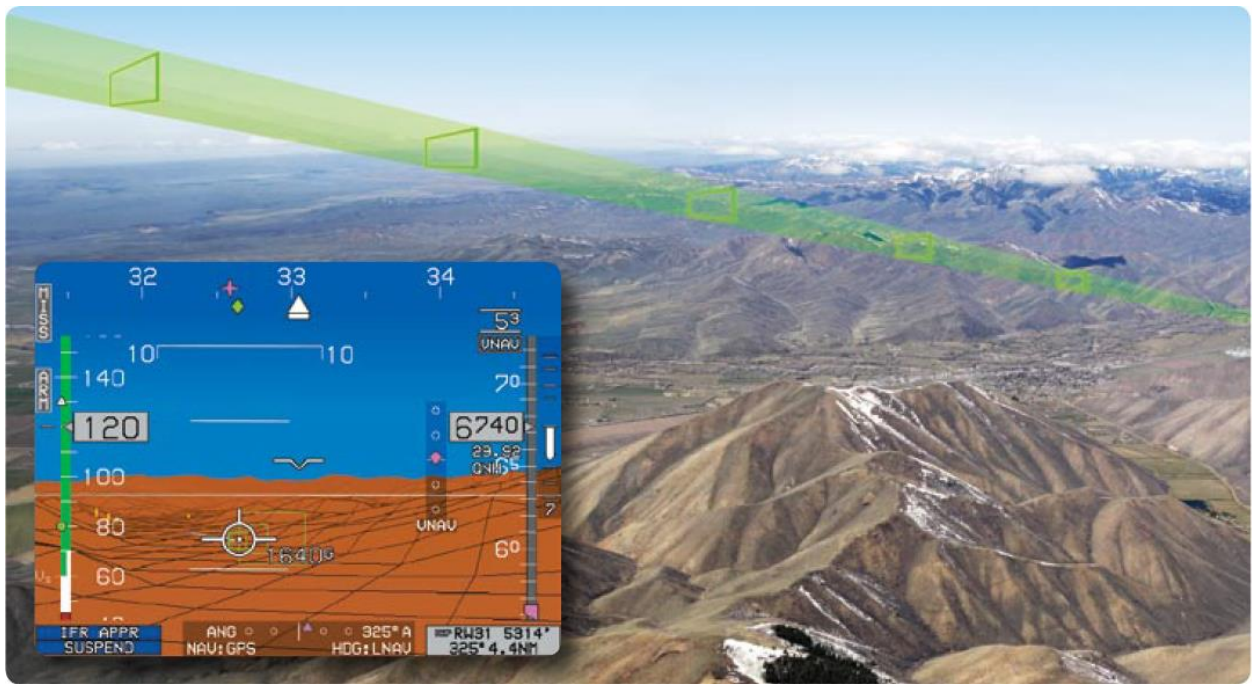


Рисунок 4.7 Візуалізація заходу на посадку ILS

Велика кількість аеропортів у всьому світі розташовані поблизу берегової лінії або в оточенні гір. Польоти поблизу або в гірській місцевості вважаються одними з найнебезпечніших через велику кількість фатальних факторів. Рельєф місцевості дуже різноманітний: від долин і пологих схилів до майже вертикальних скель заввишки тисячі метрів. Через різну висоту гір вітер може дуже швидко змінювати швидкість і напрямок, взаємодіючи з вигнутою та кутною місцевістю, створюючи висхідні, низхідні потоки та турбулентність. Ці погодні умови можуть перевищувати обмеження та продуктивність літака. Погода дуже швидко змінюється, і різні явища вітру, як-от вітер Фьон, орографічна ширинка та мікропорив, можуть вплинути на аеродинаміку літака. Утворення льоду через зміну погоди є однією з найнебезпечніших подій, які можуть статися під час польоту в гірській місцевості, спричиняючи звалювання, вимушену посадку або втрату керування, якщо літак не обладнано системою протиобледеніння або іншими засобами захисту від льоду. Туман, дощ і сніг, навіть на короткий час, можуть тимчасово погіршити загальну видимість, збільшуючи ймовірність навігаційної помилки, що призведе до CFIT. Освітлення також відіграє важливу роль у тому, наскільки небезпечно, ніби сонце заходить або стоїть прямо над головою, нижчі гори та долини можуть бути в тіні,

маскуючи наявність хребта, пагорба чи виступу, створюючи потенційний сценарій CFIT. У разі аварії, що сталася під час польоту, зльоту або заходження на посадку, 3D-карта може допомогти, показуючи рівнинну місцевість, щоб здійснити безпечну екстрену посадку. 3D-карта LiDAR + фотограметрія забезпечує детальне та точне сканування будь-якої висоти, що означає, що екіпаж завжди буде в курсі свого оточення незалежно від погодних умов.

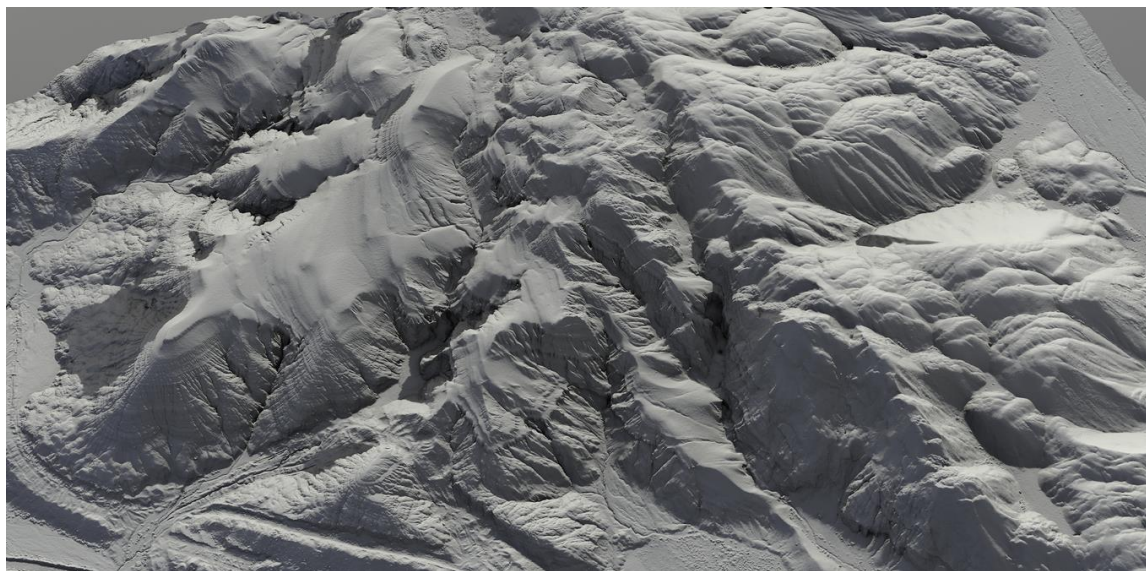


Рисунок 4.8 Скан гірської ділянки з LiDAR

6 липня 2011 року Іл-76 впав у гори на висоті 3800 метрів, коли екіпаж виконував візуальне зниження вночі без будь-якої допомоги диспетчера та інших візуальних орієнтирів. Усі члени екіпажу загинули в аварії CFIT.

18 лютого 2018 року ATR-72-212 під час заходу на посадку врізався в гору Дена, загинули всі 66 пасажирів на борту. Хоча погодні умови погіршувалися, екіпаж вирішив продовжити заходження на посадку і знизився нижче мінімально необхідної висоти. Погана погода призвела до того, що літак заглох, і екіпаж не зміг відновитися.

19 серпня 2012 року Ан-26, на борту якого перебували суданський уряд з кількома високопоставленими членами збройних сил, впав у гору Хаджар Аль-Нар, убивши 32 пасажири. Було дві спроби посадити літак, обидві в умовах недостатньої видимості через сильний дощ. Перший вийшов з ладу, а другий став причиною зіткнення з горою.

Посадка літака в аеропорту поблизу берегової лінії може бути ускладнена, якщо видимість обмежена, оскільки будь-яке відхилення від злітно-посадкової смуги може призвести до аварії. Через високий рівень вологості ймовірність накопичення туману різко зростає. Адвективний туман, який утворюється, коли відносно тепле повітря рухається над холоднішою поверхнею, є одним із найнебезпечніших погодних явищ, які можуть статися під час зближення. Піщані бурі також можуть погіршити загальну видимість, спричинити збій двигуна та пошкодити чутливе обладнання. Величезні пориви вітру, турбулентність, піщані бурі, туман і дощ, усі ці погодні явища слід враховувати пілоту під час заходу на посадку, але що станеться, якщо літак зіткнеться з птахом? Найгірший можливий сценарій безпечної посадки став ще гіршим. У цьому випадку втрата тяги або навіть відключення двигуна можуть призвести до того, що літак не зможе досягти злітно-посадкової смуги. Однією з хороших сторін LiDAR, як згадувалося раніше, є те, що він може сканувати морське дно, а це означає, що пілоти матимуть можливість, якщо трапиться аварія під час заходу на посадку чи зльоту, вибрати наймілкіше місце в океані або морі, потенційно рятуючи життя.



Рисунок 4.9 Комбінація LiDAR і фотограметрії з контрастним морським дном

1 липня 1994 року Fokker F28 розбився під час заходу на посадку під час піщаної бурі, вбивши 80 пасажирів, залишивши лише 13 людей у живих. Було виконано кілька додаткових заходів на посадку перед остаточним важким приземленням, коли шасі зруйнувалося, і літак повернувся зі злітно-посадкової смуги на виступ і засвітився.

11 березня 2005 року Airbus 321-200 здійснив два нестабільні заходи на посадку під час піщаної бурі. Коли відбулося третє заходження на посадку, УПР надав інформацію про погоду, вказавши, що видимість була нижчою від необхідного мінімуму, тому екіпаж вирішив перервати посадку та перенаправився в інший аеропорт, де приземлився безпечно.

7 травня 2011 року Xian MA60 після п'ятнадцятихвилинної схеми очікування виконав остаточний візуальний заход на посадку, який пізніше було припинено, і екіпаж вирішив піднятися. Через низьку видимість, викликану сильним дощем, туманом і темрявою, екіпаж втратив візуальний орієнтир і прийняв неправильне рішення, в результаті чого літак впав на воду приблизно за 500 метрів від злітно-посадкової смуги.

Висновок: одним із ключових аспектів безпечного польоту є обізнаність пілота про ситуацію. Коли видно злітно-посадкову смугу є проблемою, пілоти повинні повністю покладатися на дані з різних систем. За певних невдалих обставин ці дані можуть відображатися з помилками та помилками, оскільки обладнання, за допомогою якого збираються ці дані, може бути пошкоджено, виведено з ладу, знищено або схильне до зміни параметрів. Іноді наземне обладнання може передавати неправильну інформацію літаку, і пілоти, які ним керують, не матимуть про це жодного уявлення. Оскільки 3D-карти мають географічну прив'язку та синхронізовані з обладнанням літака, це може дати пілоту таку необхідну візуалізацію того, що попереду літака, щоб він міг діяти відповідно до того, що він бачить.

РОЗДІЛ 5. Охорона навколишнього середовища

5.1. Проблематика сучасної авіації та її впливу на навколишнє середовище

Пасажиропотік в авіаційному секторі в усьому світі зростатиме на 5,1% щорічно. Це зростання вимагатиме нових літаків і збільшення кількості рейсів.

Крім того, наслідками зростання пасажиропотоку є значне зростання шкідливих викидів реактивних двигунів, безпрецедентні пробки, безперервний шум навколо аеропортів, негативний вплив на здоров'я та якість життя людей. Для того, щоб усунути якомога більше потенційної шкоди навколишньому середовищу та зробити повітряний транспорт більш ефективним, науковці повинні тісно співпрацювати з урядом та промисловістю над екологічними та стійкими авіаційними ініціативами. На авіацію припадає приблизно 2% загальних глобальних викидів парникових газів (ПГ). Цей внесок є результатом 2-3% загального споживання викопного палива в усьому світі.

Якщо нинішні темпи зростання авіаперевезень збережуться, прогнозується, що до 2050 року ця тенденція зросте приблизно до 3%. Протягом останнього десятиліття багато досліджень також зосереджені на впливі авіаційних викидів на місцеву та регіональну якість повітря поблизу аеропорту. Літак (під час заходу на посадку, посадки, руління, зльоту та початкового набору висоти літака, прогону двигуна тощо) є основним джерелом забруднення повітря в аеропорту. За результатами інвентаризації частка шкідливих викидів повітряних суден становить 50% від загальної маси викидів на території аеропорту. На даний момент основними об'єктами уваги є викиди NO_x і дрібнодисперсних частинок (PM) від авіаційних двигунів як ініціаторів фотохімічного смогу і регіонального туману, які додатково безпосередньо впливають на здоров'я людини.

КАФЕДРА АВІОНІКИ

Розробив	Поліщук В.В.			Тривимірна візуалізація маршрутного польоту системи попередження зіткнень	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник	Чужа О.О.					84	103
Н – контр.	Левківський В.В.				АВ-154-М		
Зав. каф.	Грищенко Ю.В.						

Значні занепокоєння щодо регіонального забруднення повітря навколо аеропортів залишаються особливо для міських аеропортів, які розташовані досить близько до населених пунктів, тому вплив авіаційних викидів на якість міського повітря є високим.

Викиди парникових газів, NO_x і твердих частинок повітряним транспортом можна знизити шляхом зменшення активності та підвищення енергоефективності видів транспорту. Авіаційна промисловість успішно докладає послідовних постійних зусиль для зменшення спалювання палива, викидів і шуму, створюваного літаками. Щоб зменшити вплив літаків на навколишнє середовище, викиди парникових газів, NO_x і твердих частинок повинні бути мінімізовані, і цього можна досягти шляхом максимізації енергоефективності силових установок літаків.

Енергія є важливим інструментом сталого довкілля. Важливість енергоефективності для екологічної авіації також пов'язана з екологічними проблемами, такими як глобальне потепління, шум і забруднення атмосфери. Таким чином, споживання енергії відіграє вирішальну роль у досягненні екологічного розвитку авіації. Енергоефективність є корисним показником для оцінки екологічних характеристик літака. Крім того, технології відіграють важливу роль у пом'якшенні впливу повітряного транспорту на навколишнє середовище.

Якщо так, то це найпряміший спосіб покращити свою паливну ефективність за допомогою нових літаків та їх компонентів, що містять найновіші доступні технології. Технічні заходи, такі як удосконалення технологій літаків і двигунів, мають великий потенціал для зменшення викидів. Новітні літаки та конструкції двигунів є значно ефективнішими, ніж літаки попередніх поколінь (у середньому підвищення ефективності палива на 1-2% на рік). Однак через середній (економічний) термін служби літака 20-30 років для повної вигоди від сучасних нових двигунів і авіаційних технологій знадобляться десятиліття. Можливо, за винятком палива FishereTropsch, розробка та широке використання альтернативних видів палива також може зайняти десятиліття. Таким чином, потенційна корисність аналізу енергії для авіаційних двигунів у вирішенні екологічних проблем є значною.

Концепції енергії та ексергії були використані для забезпечення екологічної стійкості. Щоб зменшити негативний вплив, спричинений викидами забруднюючих речовин, необхідно ефективно використовувати джерела енергії. З навколишнім середовищем і термодинамікою пов'язані два аспекти навколишнього середовища: аналіз енергії та ексергії.

Ексергія як термодинамічний відхід між речовиною та її оточенням була поступово прийнята як уніфікована міра впливу викидів відходів на навколишнє середовище. Дж. Уолл запропонував ексергію як відповідну міру впливу викидів відходів на навколишнє середовище. Існують різні оцінки відпрацьованих газів, що викидаються з транспортних секторів. Таким чином, ексергія викидів у навколишнє середовище є мірою потенціалу викидів змінювати або впливати на навколишнє середовище. Ці пункти свідчать про те, що ексергія може бути ефективним індикатором потенціалу впливу викидів на навколишнє середовище. Зростаюча увага до викидів і шуму, а також високі ціни на паливо сприяють зростанню попиту на турбогвинтові двигуни.

У 2010 році в експлуатації було 2080 турбогвинтових двигунів із середнім віком 15 років. До 2030 року буде поставлено 2440 нових турбогвинтових літаків, а загальний парк турбогвинтових літаків збільшиться до 3295 літаків. З 2011 по 2030 рік буде поставлено в цілому 660 нових турбогвинтових двигунів: 41% для заміни старих літаків і 59% для підтримки зростання ринку. У період з 2010 по 2029 рік Embraer прогнозує, що 32% поставок літаків у діапазоні 30-120 місць будуть турбогвинтовими, а Bombardier прогнозує, що 39% поставок літаків у діапазоні 20-99 місць будуть турбогвинтовими. Новітні турбогвинтові двигуни залишаться важливою частиною світового парку регіональних літаків.

Високі ціни на пальне підкреслили одну з головних переваг подвійного турбогвинтового літака перед регіональним реактивним літаком: низьке споживання палива та неперевершену економічність на коротких маршрутах. Оскільки турбогвинтові двигуни є більш економічними, зростання цін на пальне може зменшити важливість переваг пасажирів. Використання турбогвинтових двигунів на

короткомагістральних рейсах може зрости через перехід до більш ефективних технологій. Використання турбогвинтових двигунів на літаку дає наступні переваги:

1. двигун може працювати в більш ефективних і економічних умовах на малих і середніх висотах;

2. потужність, доступна для руху, значною мірою не залежить від швидкості руху повітряного судна.

У зв'язку з цим вчені, дослідники та інженери, які працюють над корисними рішеннями для авіаційних газотурбінних двигунів, прагнуть максимізувати енергозбереження, мінімізувати споживання енергії та, таким чином, розробити екологічно чисті рухові системи, що зменшує навколишнє середовище вплив на стійку авіацію. Якщо це так, з точки зору другого закону термодинаміки, мінімізація необоротності в турбогвинтових двигунах також стає серйозною проблемою для підвищення ефективності, навколишнього середовища та сталості.

5.2. Розрахунок площі сканування, а також висновки щодо впливу на навколишнє середовище

Оскільки, виходячи з РОЗДІЛУ 2, найбільш оптимальним ЛА для найшвидшого та найякіснішого збору даних для створення 3D мап є літак, то в нашому випадку можна зупинитися на світовій класиці фотограметрійної авіації - Piper Aztec.

Даний літак може нести 530 кг пального. При витраті 102 кг на годину польоту на 75% тяги, це 4 години польоту. 75% тяги = 327 км/год.

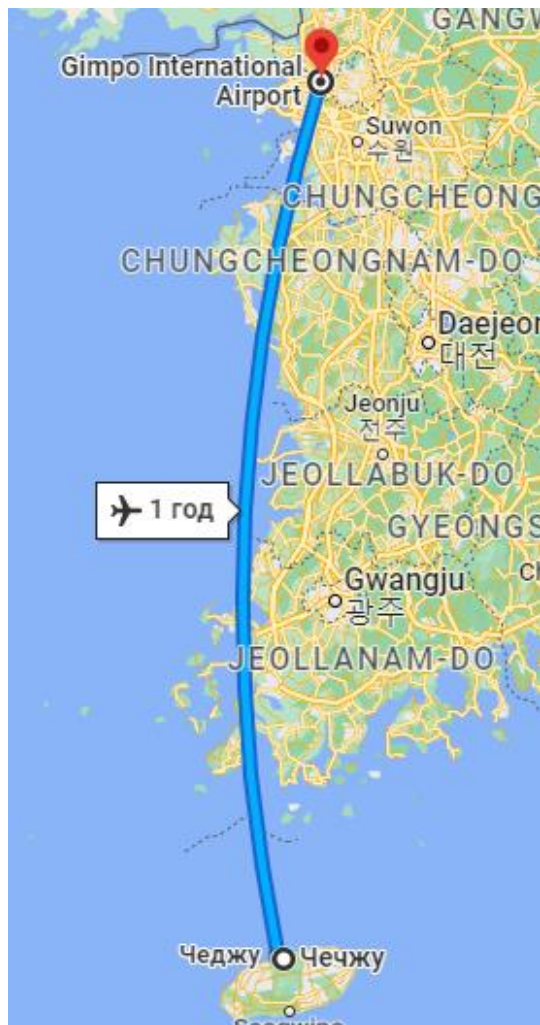


Рис. 5.1 Найпопулярніший рейс з Чечжу до Сеулу

Відстань між містами – 452 км.

Ширина ділянки, що матиме 3D мапу – 12,5 км. Дана ширина забезпечує достатній простір для маневрування літака в разі виникнення непередбаченої ситуації, пов'язаної з обмеженням видимості.

Використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення, вдалося розрахувати площу шириною 12,5 км та довжиною 452 км, загальну дистанцію маршруту польоту літака, а також час польоту.

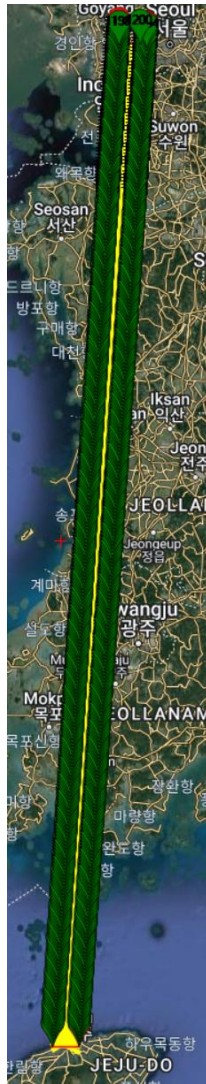


Рис. 5.1 Розрахунок точок маршруту для виконання сканування

Час польоту – 131 година.

Загальна дистанція – 4525 км.

Площа – 5431 км².

За 4 години польоту Piper Aztec може пролетіти 1308 км. Враховуючи той факт, що літак не весь час знаходитиметься над потрібною (новою) ділянкою землі, що потребує сканування, можна взяти середнє значення 40% ефективного польоту від загального значення 1308 км польоту з повністю заправленим літаком.

Враховуючи дані 40%, літак є ефективним лише на ділянці 523 км. Для подолання загальної довжини маршруту, необхідно 8,65 вильотів з повністю заправленим літаком.

Якщо взяти 20 найпопулярніших рейсів світу за 2020 рік – загальна площа, яку необхідно відсканувати – 256176 км²

Загальна дистанція – 215187 км. Для подолання загальної довжини маршруту, необхідно 411,44 вильотів з повністю заправленим літаком.

Ексергологічний аналіз визначає місця, величини та джерела впливу компонентів двигуна на навколишнє середовище. Він базується на аналізі ексергії та оцінці життєвого циклу. Це дослідження представляє екологічний аналіз турбогвинтового двигуна з використанням ексергії при умові максимальної потужності, наведеній у літературі.

З екологічної точки зору, ексергетичний аналіз можна розглядати як перспективний інструмент для авіаційних двигунів. Для оцінки екологічних аспектів турбогвинтового двигуна як функції ексергії беруться до уваги такі параметри компонентів турбогвинтового двигуна: (1) ексергетичні значення, (2) економічні витрати, (3) ексергоекономічні параметри, (4) економічні норми витрат і одиничні ексергетичні витрати, (5) змінні ексергогенезу та середовища. Перш ніж аналізувати та оцінювати результати в цьому розділі, спочатку слід підкреслити, що основною метою цього дослідження є не визначення ексергетичних характеристик турбогвинтового двигуна.

Швидше, вивчення турбогвинтового двигуна на максимальній потужності (~1948 л.с.) спрямоване на те, наскільки можливе вдосконалення турбогвинтового двигуна для кращого екологічного середовища. Екологічні характеристики турбогвинтового двигуна з вільною силовою турбіною досліджуються з урахуванням вимірюваних умов, таких як масові витрати повітря та палива, температура та тиск для компонентів двигуна.

Умови повітря на вході в компресор спостерігаються при 93 кПа та 273 К. У нашій моделі вологість зафіксована на рівні 22,77%. Використовуючи рівняння циклу, температура на вході турбіни газогенератора та силової турбіни розраховується як 1547 К та 1109 К відповідно. Максимальна потужність

турбогвинтового двигуна при крутному моменті 630 Н·м встановлена на рівні 1948 к.с. Спочатку ми робимо деякі інші припущення, щоб дослідити ексергогенні аспекти двигуна.

Щоб розробити підходи, які ефективно зменшують вплив двигуна літака на навколишнє середовище, необхідно зрозуміти механізми, які дозволили покращити термодинамічну ефективність силових установок літака. У даній роботі ексергогенний метод вперше застосовано до авіаційного турбогвинтового двигуна. Це дослідження представило екологічні аспекти для турбогвинтового двигуна, який також зазвичай використовується в регіональному транспорті.

Приблизно 17% загального впливу турбогвинтового двигуна на навколишнє середовище є результатом впливу компонентів на навколишнє середовище, а інша частина є результатом ексергетичних руйнувань компонентів турбогвинтового двигуна. Компресор, камера згорання, турбіна газогенератора, силова турбіна та вихлопна форсунка створюють відповідно 9%, 69%, 13%, 7%, 2% загального впливу двигуна на навколишнє середовище. Результати показали, що камера згорання має найвищий пріоритет для вдосконалення.

Окрім звичайного аналізу, для отримання більш точних результатів можна застосувати вдосконалений ексергогенний аналіз навколишнього середовища, який вважається цінним доповненням до традиційного аналізу, шляхом визначення частин впливу на навколишнє середовище, яких можна уникнути та яких уникнути. Дослідники та вчені наполегливо працюють, щоб мінімізувати антропогенну деградацію навколишнього середовища. Одним з рішень є джерела енергії, альтернативні викопному паливу, наприклад біопаливо або гібридні електричні силові установки.

Однак у короткостроковій та середньостроковій перспективі можливе застосування цих альтернативних джерел енергії для авіаційних силових установок виглядає нереальним, а це означає, що залежність від викопного палива виглядає неминучою. Розробка аналізу ексергетичних умов для силових установок літаків може зіграти значну роль у дослідженні можливостей і переваг екологічних

регіональних літаків. Отже, такі підходи, як аналіз на основі ексергетики, які сприяють покращенню екологічного впливу авіаційних двигунів, можуть запропонувати найкращі рішення.

Висновок: хоча авіація має не такий великий вплив на навколишнє середовище, як, наприклад, фабрики, заводи та інші підприємства, що використовують вугілля та газу (або інші токсичні продукти горіння) для виготовлення своєї продукції, все ще є важливим намагатися зменшити і цей вплив. Будь-яке зменшення негативного впливу на навколишнє середовище покращує життя для нас та майбутніх поколінь.

РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ

Враховуючи кількість польотів, необхідних для сканування вказаної площі, а також той факт, що екіпаж виконуватиме польоти як мінімум двічі за день в середовищі, наповненому електронним обладнанням, що зхильне до перегріву, є важливим моментом пожежної безпеки та поведінка з електронним обладнанням.

6.1. Пожежа у повітрі

Екіпажі повинні дотримуватися затверджених компанією процедур на випадок надзвичайних ситуацій і вказівок виробників щодо виконання польоту, керування системами літака, ідентифікації джерела ймовірної пожежі та гасіння пожежі. Процедури компанії можуть значно відрізнятися, тому важливо вивчити та бути знайомими з процедурами вашої компанії.

Значна пожежа в пасажирській кабіні, туалеті, камбузі або багажному відділенні в салоні під час польоту є однією з найгірших ситуацій, з якими може зіткнутися екіпаж. Наслідки можуть включати:

- Виведення екіпажу з ладу. Тепло, токсичний дим і пари, що накопичуються в цьому замкнутому просторі, можуть швидко вивести з ладу екіпаж і пасажирів і призвести до смерті через задиху або вдихання токсичних газів.
- Втрата контролю.
 - Паніка серед пасажирів, кидання в будь-який кінець літака може призвести до дисбалансу, що ускладнить керування літаком.
 - Системи літака можуть бути пошкоджені, що призведе до втрати контролю.

КАФЕДРА АВІОНІКИ

Розробив	Поліщук В.В.			Тривимірна візуалізація маршрутного польоту системи попередження зіткнень	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник	Чужа О.О.					93	103
Н – контр.	Левківський В.В.				АВ-154-М		
Зав. каф.	Грищенко Ю.В.						

Види побутової пожежі

- Електрична пожежа. Електричні пожежі можна швидко приборкати, вимкнувши живлення відповідного обладнання.
- Однак джерело диму та/або вогню, а також відповідну електричну систему не завжди можна легко ідентифікувати або отримати доступ.
- Пожежа туалету. Пожежі в туалеті часто спричинені тим, що палаючі сигарети кладуть у контейнер для макулатури, але всередині туалету також є електричне обладнання, яке може спричинити пожежу (наприклад, злив туалету, освітлення тощо).
- Пожежа контейнера для сміття. Пожежі в сміттєвих контейнерах можуть виникати з багатьох причин: горіння сигарет, надмірне тепло через розлиті гарячі напої чи плити або хімічні реакції. Пожежу контейнера для відходів зазвичай легко локалізувати.
- Пожежа верхнього відсіку. Джерело цих пожеж часто можна знайти в ручній поклажі пасажирів, напр. Літієві батареї в персональних електронних пристроях (PED).
- Пожежа сидінь. Через вогнестійкість матеріалів, які використовуються в конструкції, пожежі на сидіннях у польоті трапляються рідко, і їх легко визначити. Дедалі складніші розважальні системи та послуги, що надаються для окремих сидінь, дійсно створюють можливість електричного пожежі в сидінні.

Авіаційне обладнання

- Детектори диму. Оптичні детектори диму встановлюються в туалетах літаків і, як правило, у вантажних відсіках. Зазвичай вони активуються лише при значному зниженні видимості через густий дим, скажімо, від пожежі сміттового баку. Сигаретний дим зазвичай не активує їх.
- Переносні вогнегасники. Переносні вогнегасники знаходяться в кабіні пілотів і в кабіні. Вони призначені для боротьби з невеликими пожежами, тому їх

потужність обмежена. Портативні вогнегасники можуть містити галоніві вогнегасники (BCF), водний гліколь або CO₂ як вогнегасні речовини.

- Системи автоматичного пожежогасіння. Деякі літаки мають автоматичні системи пожежогасіння в туалетних баках. Системи вантажних відсіків зазвичай вимагають навмисних дій з боку екіпажу для вивантаження. На літаках великої дальності вантажні засоби пожежогасіння зазвичай вивільняються повільно, щоб забезпечити захист достатньо довго, щоб екіпаж зміг долетіти до аеропорту з найгіршого положення (наприклад, коли літак має 180-хвилинну роботу подвійного двигуна з подовженим діапазоном).
- Пожежна/аварійна сокира/лом. Були надані пожежні сокири, щоб отримати екстрений доступ до зон і частин літака, які важкодоступні (наприклад, за бічними стінками, електричними або стельовими панелями). Ручка ізольована для захисту від ураження електричним струмом. Раніше пожежні сокири можна було знайти в кабіні польотів і в пасажирському салоні, але на більшості перевізників, відповідно до антитерористичних правил і процедур, сокири більше не перевозяться, а були замінені ізольованими ломами в пасажирському/вантажному салоні. відсік.
- Вогнезахисні рукавички. Ці рукавички типу рукавичок зберігаються в кабіні польоту та/або в салоні, щоб захистити користувача від тепла/вогню. Їх також можна використовувати для обробки гарячих або гострих предметів. Крім того, вони забезпечать захист від охолодження через випаровування на соплі переносного вогнегасника під час розряду.
- Пристрої протидимного захисту. Існує кілька різних пристроїв захисту від диму для кабіни та екіпажу екіпажу. Захисне респіраторне обладнання (PBE), яке найчастіше називають димовим ковпаком, містить невеликий кисневий генератор або балон, який забезпечує користувача киснем протягом обмеженого періоду часу, як правило, 15-20 хвилин. Портативні кисневі балони з повнолицьовими масками також перевозяться в салонах літаків і деяких палубах. Повнолицеві маски в основному використовуються для

гасіння пожежі, оскільки вони забезпечують герметичність, запобігаючи витоку диму та витоку кисню.

- Димові окуляри. Димові окуляри можна знайти в кабіні для використання з РВЕ. Деякі літаки оснащені кисневими масками з вбудованими димовими окулярами.
- Пожежні ковдри. Деякі оператори мають на борту вогнезахисні ковдри, які можна використовувати для гасіння вогню, перекриваючи подачу кисню.

Боротьба з вогнем

- Виявлення пожежі в кабіні літака або в кабіні польоту зазвичай залежить від здатності члена кабіни або члена екіпажу бачити чи відчувати запах диму. Виявлення місця осередку пожежі може бути особливо складним через розподіл повітряного потоку всередині літака.
- Досвід показує, що пожежі можуть виникати у важкодоступних місцях, що ускладнює або унеможлиблює гасіння пожежі. Пожежа на «горищі» рейсу 111 Swissair швидко поширилася, але екіпаж не зміг її загасити через місце розташування. Направити вогнегасну речовину на осередок пожежі в зоні над внутрішнім перекриттям не було.
- Неможливість доступу до джерела пожежі є серйозним обмеженням, яке істотно знижує ймовірність успішного його гасіння. Усі вогнегасники працюють найкраще, коли вони розряджаються в основі пожежі.

Види вогню

- ТВЕРДЕ паливо, таке як папір/дерево, тканина, пластик, найкраще гасити за допомогою H₂O/гліколевих вогнегасників, які задушять/наситять/охолодять паливо.
- РІДКЕ паливо, таке як рідини на основі нафти, найкраще гасити задушливими речовинами, такими як сухий порошок, CO₂, піна, BCF. Але не водяні вогнегасники.
- ГАЗОВІ пожежі гасять задушливими речовинами, такими як CO₂, BCF або пожежним полотном.

- МЕТАЛЕВІ пожежі, напр. батареї, які колись загорілися, надзвичайно важко контролювати, і їх можна загасити лише спеціальними гелевими агентами, які гасять і охолоджують після першої атаки на вогонь за допомогою ВСФ.

Основні принципи пожежогасіння

- ЗНАЙДІТЬ ТА ІДЕНТИФІКУЙТЕ тип і джерело вогню або диму
- ГАСІТЬ вогонь негайно і агресивно
- СПЛКУЙТЕСЯ з льотним екіпажем
- ЗБЕРІТЬ все необхідне протипожежне обладнання
- СЛІДКУЙТЕ за повторним запалюванням

6.2. Електричні пожежі

Електричні пожежі на літаках виникають через електричні компоненти. Неминучу електричну пожежу часто можна виявити за допомогою непрямих індикацій або датчиків системи сигналізації до того, як пожежа спалахне. Також можливо, що електричні пожежі залишаться прихованими для льотного екіпажу або кабінного екіпажу протягом тривалого часу. у таких ситуаціях електричне загорання може стати очевидним занадто пізно, щоб члени екіпажу вжили заходів для усунення загрози.

Оскільки сучасні комерційні транспортні літаки зазвичай містять милі дроту всередині електричних кабелів, ткацьких верстатів і джгутів проводів (більшість із них у важкодоступних місцях), найчастішою причиною електричних пожеж є певний тип проблеми ізоляції, наприклад:

- Зношена ізоляція — головним чином через старіння та вплив тепла зношена ізоляція може бути більш сприйнятливою до займання через перегрів; зношена ізоляція також може відпасти від проводів, піддаючи металевий провідник ризику короткого замикання;
- Порвана ізоляція — розрив зазвичай виникає через неправильне встановлення кабелю, що може призвести до постійного механічного навантаження на кабель, що зрештою призведе до оголення провідного металу;

- Забруднена ізоляція — Якщо ізоляція просочується маслом з будь-якого джерела, ізоляція може загорітися (наприклад, від перегріву електрики);
- Порушення ізоляції — оголені металеві провідники (дроти, що торкаються) всередині кабелів можуть призвести до короткого замикання, електричної дуги чи іскри.

На неминучу або тліючу/палаючу електричну пожежу можуть прямо чи опосередковано вказувати такі ознаки:

- Попередження про перенапругу
- Вище звичайного електричного навантаження
- Лопнув автоматичний вимикач
- Білий дим і їдкий запах розпеченої або горілої ізоляції; однак зауважте, що ці підказки також можуть бути викликані згорянням ізоляції кабелю/проводки іншим типом вогню.

Захист і передовий досвід

Профілактика є найкращим засобом протидії електричним пожежам, включаючи такі дії:

- Належне технічне обслуговування літака. Кабелі слід регулярно перевіряти на ознаки старіння або пошкодження та замінювати за необхідності.
- Контейнер для свинцево-кислотних акумуляторних батарей — ці батареї повинні міститися в схваленому акумуляторному ящику з вентиляційною кришкою назовні літака, щоб запобігти потраплянню вибухонебезпечного водню в літак.
- Заміна електричних компонентів — під час заміни електричного обладнання (наприклад, лампочок) слід використовувати лише компоненти, схвалені регулятором. Крім того, спеціалісти з технічного обслуговування повинні переконатися, що кріплення нового компонента повне та неушкоджене.
- Передпольотна перевірка. Ретельна перевірка може виявити ознаки (наприклад, на вигляд або запах) витоку палива, масла або гідравлічних рідин.

Якщо є підозра або вказівка на електричну пожежу під час польоту, загальні дії екіпажу:

- Аварійна посадка — Негайна посадка на найближчому відповідному аеродромі — згідно з найкращими міжнародними практиками — зазвичай є найкращим способом дій, якщо є підозра на пожежу, навіть якщо немає видимого полум'я.
- Характеристики пожежі — після спалаху електричні пожежі горять так само, як і більшість інших авіаційних пожеж. Однією з відмінностей є те, що тепло від електричної проводки або компонента під напругою, який запалив вогонь, може підтримувати його шляхом тривалого займання. Таким чином, звичайний перший крок при підозрі на електричну пожежу - це відключити живлення, вимкнувши головний вимикач. Це усуває джерело займання, і якщо неминуча пожежа не почалася, може призвести до усунення загрози займання.
- Усунення несправностей. Якщо для польоту необхідне електроживлення, деякі контрольні списки для надзвичайних ситуацій дозволяють екіпажу спробувати виявити та ізолювати несправне коло за допомогою:
 - Вимкнення всіх окремих електричних вимикачів.
 - Знову увімкнути головний вимикач.
 - Вибір електричних вимикачів, які були увімкнені до індикації пожежі, по одному, дозволяючи короткий проміжок часу після того, як кожен вимикач увімкнено, щоб перевірити наявність ознак запаху випарів, диму чи іскор.

Висновок: пожежа в повітрі – одна з найнебезпечніших ситуацій, з якою може зіткнутися екіпаж. Без агресивного втручання льотного екіпажу пожежа на борту літака може призвести до катастрофічної втрати цього літака протягом дуже короткого проміжку часу. Після встановлення пожежі екіпаж навряд чи зможе її загасити. Тому екіпажу необхідно бути ознайомленим з методами боротьби з пожежою, а також завжди бути на поготові діяти.

ВИСНОВОК

Реалізація багаторівневих 3D-карт високої роздільної здатності зони польоту аеропорту забезпечує пілотам візуальний орієнтир і візуалізацію порогів наближення ILS при посадці літака в умовах поганої видимості. Вони також допомагають літати в гірській місцевості, оскільки різні погодні умови, наприклад захід або схід сонця, можуть обмежити пілоту огляд гір, нижчих за найвищу, і спричинити аварію. Під час зльоту або посадки в прибережному аеропорту зіткнення з птахами є відносно поширеним явищем, і в поєднанні з втратою обізнаності про ситуацію через погану видимість такий політ може бути дуже небезпечним для контролю. Оскільки тривимірні карти також забезпечують сканування морського дна, пілоти можуть вибрати наймілкішу точку та здійснити аварійну посадку. Однак 46% аварій CFIT були спричинені поганими погодними умовами та поганою видимістю. Велика частина цієї кількості була спричинена нездатністю пілота швидко й адекватно реагувати на ситуацію, що швидко змінюється.

З усіх перерахованих у роботі методів найбільш точним, інформативним і доступним для редагування є поєднання методів LiDAR і фотограметрії. Хмари точок даних, зібраних LiDAR, і хмара точок фотограметричних даних об'єднуються за допомогою методу ітеративної найближчої точки. Один набір даних доповнює інший, і результатом є найдетальніша 3D-карта, яку будь-коли можна отримати. З одного боку, це добре, оскільки є більше простору для процесу редагування, але з іншого боку, вартість отримання цих наборів даних може бути дуже великою, обчислюючись сотнями тисяч доларів. Але дешевші датчики LiDAR також можуть створювати дуже хороші карти, як показано в РОЗДІЛІ 2.

Отже, зрештою, все зводиться до того, щоб визначити, який вид сканування потрібен, яке обладнання найкраще підходить для місії та сам план місії. Навіть найкраще, найдорожче обладнання може дати погану якість зображення та сканування, якщо план місії виконувався безвідповідально.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lillesand, T.; Kiefer, R.W.; Chipman, J. Remote Sensing and Image Interpretation; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 2014; ISBN 1-118-34328-X
2. Morgan, D.; Falkner, E. Aerial Mapping: Methods and Applications; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2001; ISBN 1-4200-3244-5
3. Asner, G.P.; Knapp, D.E.; Boardman, J.; Green, R.O.; Kennedy-Bowdoin, T.; Eastwood, M.; Martin, R.E.; Anderson, C.; Field, C.B. Carnegie Airborne Observatory-2: Increasing science data dimensionality via high-fidelity multi-sensor fusion. *Remote Sens. Environ.* 2012, 124, 454–465.
4. Desmond, G. Measuring and mapping the topography of the Florida Everglades for ecosystem restoration. *US Geol. Surv. Fact Sheet* 021-03. 2003
5. Boon, M.A.; Drijfhout, A.P.; Tesfamichael, S. Comparison of a fixed-wing and multi-rotor uav for environmental mapping applications: a case study. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2017, XLII-2/W6, 47–54.
6. Nex, F.; Remondino, F. UAV for 3D mapping applications: A review. *Appl. Geomat.* 2014, 6, 1–15.
7. Mozgeris, G.; Gadal, S.; Jonikavičius, D.; Straigyte, L.; Ouerghemmi, W.; Juodkienė, V. Hyperspectral and color-infrared imaging from ultralight aircraft: Potential to recognize tree species in urban environments. In *Proceedings of the 2016 8th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*, Los Angeles, CA, USA, 21–24 August 2016; pp. 1–5
8. Gandor, F., Rehak, M., & Skaloud, J. (2015, August 30–September 2). Photogrammetric mission planner for Rpas. *International Archives Photogramm Remote Sensing Spatial Information Sciences*, 40(1), 61–65. Toronto.
9. Hong, Y., Fang, J., & Tao, Y. (2008). Ground Control Station development for autonomous UAV. *Intelligent Robotics and Applications*, 5315/2008, 36–44.
10. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/8/1265/htm#>
11. Doumit, J.A., & Abou Chakra, C. A. (2020). The effect of Neutral Density Filters on drones orthomosaics classifications for land-use mapping. *OSF Preprints*

12. Brock, J.C., Wright, C.W., Sallenger, A.H., Krabill, W.B., and R.N. Swift, 2002, Basis and methods of NASA Airborne Topographic Mapper Lidar surveys for coastal studies, *Journal of Coastal Research*, Vol. 18, No. 1, p. 1-13.
13. JALBTCX, 2005, Standard Operating Procedures, U. S. Army Corps of Engineerers, Joint Airborne Lidar Bathymetry Technical Center of Expertise (JALBTCX), 16pp.
14. <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics>
15. Gonçalves, G.; Pereira, L.G. A Thorough Accuracy Estimation of DTM Produced From Airborne Full-Waveform Laser Scanning Data of Unmanaged Eucalypt Plantations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2012, 50, 3256–3266.
16. Nakano, K.S.H.; Omori, K.; Hayakawa, K.; Kurodai, M. On a fundamental evaluation of a UAV equipped with a multichannel laser scanner. In *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS TC II Mid-term Symposium “Towards Photogrammetry 2020”*, Riva del Garda, Italy, 4–7 June 2020; pp. 753–758.
17. https://www.researchgate.net/publication/273594287_Intercomparison_of_UAV_Aircraft_and_Satellite_Remote_Sensing_Platforms_for_Precision_Viticulture
18. Nayegandhi, A., Brock, J.C., Wright, C.W., In Press. Small-footprint, waveform-resolving lidar estimation of submerged and sub-canopy topography in coastal environments. *International Journal of Remote Sensing*.
19. Doumit, J. A. (2020). Lidar and SfM point cloud fusion effects in the generation of urban digital surface models. *BRICS Journal of Educational Research*, Vol.10, pp. 40-44.
20. <https://www.gim-international.com/content/article/lidar-or-photogrammetry-why-not-use-both>
21. IATA Controlled Flight Into Terrain Accident Analysis Report 2008-2017 Data
22. https://www.wikiwand.com/en/List_of_accidents_and_incidents_involving_commercial_aircraft

23. Theunissen; et al. (August 2005). "Guidance, Situation Awareness and Integrity Monitoring with an SVS+EVS". AIAA GNC Conference Proceedings.
doi:10.2514/6.2005-6441. ISBN 978-1-62410-056-7.

24. Garmin Pilot App Adds 3-D Synthetic Vision Capability" (Press release).
Garmin. February 20, 2014.

25. Timilsina GR, Shrestha A. Development factors affecting transport sector CO2 emissions growth in Latin American and Caribbean countries: an LMDI decomposition analysis. *Int J Energy Res* 2009;33:396e414.

26. Ayres RU, Ayres LW, Martina K. Eco-thermodynamics: exergy and life cycle analysis. INSEAD, Center for the Management of Environmental Resources; 1996.
Working paper 961041.