

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ПОГОДЖЕНО

Директор ІНІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
(назва ІНІ)

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри автоматики
та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

проф., д.т.н. _____ **В.В. Каплун**
(підпис) (ПІБ)

доц., к.т.н. _____ **О.О. Опришко**
(підпис) (ПІБ)

«___» _____ 2026 р.

«___» _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ
СИСТЕМ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА ДЛЯ ПІДЖИВЛЕННЯ
РОСЛИН ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ RTK ТЕХНОЛОГІЙ»**

Спеціальність:

174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва)

Освітня програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(назва)

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова
(назва)

Гарант освітньої програми

_____ **д.т.н., професор**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Івашук В.В.
(П.І.Б)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ **к.т.н., доцент**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Опришко О.О.
(П.І.Б)

Виконав

_____ (підпис)

Глущенко О.В.
(П.І.Б студента)

КИЇВ-2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних
систем ім. акад. І.І. Мартиненка

К.Т.Н., доц. _____ **О.О. Опришко**
« ____ » _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ
Глуценку Олександрову Володимировичу

Спеціальність:

174– «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи **«Комп'ютерно-інтегрована система керування систем точного землеробства для підживлення рослин із використанням РТК технологій»**,

затверджена наказом від 18.11.2024 року №2057«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 22.05.2026 року

Вихідні дані магістерської кваліфікаційної роботи: завдання кафедри на виконання магістерської кваліфікаційної роботи; нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації; матеріали дослідження, аналізу та моделювання; наукова література з тематики магістерської роботи.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Інструменти точного землеробства в управлінні посівами.
2. Підходи і алгоритми керування мобільними сільськогосподарськими агрегатами у системах точного землеробства.
3. Технологія аналізу інформації та прийняття рішень для диференційованого проведення агротехнічних операцій.
4. Розробка GNSS (GPS) модуля для позиціонування і визначення швидкості мобільного агрегату.

Дата видачі завдання «19» листопада 2024 року

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(Підпис)

Опришко О.О.
(Прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(Підпис)

Глуценко О.В.
(Прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень і скорочень	5
Вступ	6
РОЗДІЛ 1. Інструменти точного землеробства в управлінні посівами ...	10
1.1. Система точного землеробства	10
1.2. Географічна інформаційна система	12
1.3. Диференційована глобальна система позиціонування	13
1.4. Система паралельного водіння	15
1.5. Технологія змінних норм внесення	22
1.6. Системи картування полів і врожайності	27
1.7. Висновки по 1 розділу	30
РОЗДІЛ 2. Підходи і алгоритми керування мобільними сільсько- господарськими агрегатами у системах точного землеробства	32
2.1. Вибір навігаційної стратегії керування мобільними агрегатами при організації RTK-технологій	32
2.2. Теоретичні передумови проведення польових експериментів	38
2.3. Інтерпретація результатів експериментальних досліджень	42
2.4. Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень	50
2.5. Висновки по 2 розділу	55
РОЗДІЛ 3. Технологія аналізу інформації та прийняття рішень для диференційованого проведення агротехнічних операцій	58
3.1. Вихідні дані досліджень	61
3.2. Алгоритм роботи мережі виявлення (розпізнавання) рослин	64
3.2.1. Попередня обробка даних	66
3.2.2. Будова мережі FPN	66
3.2.3. Навчання мережі FPN	68
3.2.4. Навчання нейромережі YOLOv5	69
3.2.5. Тестування і оцінка продуктивності роботи нейромережі	70

3.2.6. Автономне виявлення і розпізнавання	72
3.2.7. Часовий моніторинг та інтеграція	73
3.2.8. Аналіз врожайності артишоку на полі вирощування	75
3.3. Аналіз отриманих результатів. Навчання нейромереж виявленню та розпізнаванню рослин	78
3.3.1. Аналіз продуктивності роботи мережі FPN	78
3.3.2. Аналіз продуктивності роботи мережі YOLOv5	81
3.4. Порівняння результатів роботи мереж FPN та YOLOv5	83
3.5. Оцінка роботи мережі, встановленої на мініПК Nvidia Jetson	85
3.6. Оцінка отриманих даних	87
3.7. Висновки по 3 розділу	92
РОЗДІЛ 4. Розробка GNSS (GPS) модуля для позиціонування і визначення швидкості мобільного агрегату	93
Висновки	97
Література	98
Додатки	101

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

БПЛА	- безпілотний літальний апарат
GIS	- геоінформаційна система
COT	- Світова організація торгівлі
СТЗ	- система точного землеробства
ШІ	- штучний інтелект
AGL	- <i>Above ground level</i> – висота над рівнем ґрунту
FOV	- <i>Field of View</i> – поле зору, кут огляду
FPN	- <i>Feature Pyramid Network</i> – пірамідальна мережа функцій
FPS	- <i>frames per second</i> - кількість кадрів в секунду
GCP	- <i>Ground control points</i> – наземні контрольні точки
GI	- <i>Growing Index</i> – індекс зростання рослини
GNSS	– <i>Global Navigation Satellite System</i> – Глобальна система супутникової навігації
GPS	– <i>Global Positioning System</i> – Система глобального позиціонування
GSD	- <i>ground sampling distance</i> – вибірка на рівні ґрунту, см/пікс.
HDOP	– <i>Horizontal Dilution of Precision</i> – зниження точності у горизонтальній площині
IoT	- <i>Internet of Things</i> – інтернет речей
NMEA	– <i>National Marine Electronics Association</i> - Національна асоціація морської електроніки
NMEA0183	– комбінований стандарт, який визначає як електричні так і функціональні характеристики комунікаційного протоколу для обміну інформацією між пристроями морського електронного обладнання (ехолот, гідролокатор, анемометр, гірокомпас, автоматичний рульовий механізм, GPS-приймач та багатьма іншими типами обладнання) та залізничного електронного обладнання. Стандарт створений та контролюється Національною асоціацією морської електроніки.
RTK	– <i>Real Time Kinematic</i> – Позиціонування в режимі реального часу
SSD	- <i>Singles Shot Detector</i> – детектор одиночних знімків
VRT	- <i>Variable Rate Technology</i> – технологія змінних норм внесення

ВСТУП

Актуальність теми. Значення механізації і автоматизації процесів виробництва продукції рослинництва зростає незалежно від зміни організаційних структур чи форм власності. Головне завдання при вирощуванні рослинної продукції - одержати сировину для переробки її продукції для харчування людей, корми для тварин, а також сировину для легкої та інших технічних галузей сучасного виробництва за рахунок максимального використання енергії сонячних променів, родючості земель у потенціальну енергію органічної речовини – врожаю.

Враховуючи, що життя рослин у полі відбувається в умовах, які *постійно змінюються*, завдання технології аграрного виробництва – забезпечити рослини необхідними умовами розвитку, активно впливати на створення сприятливих умов для життя рослин, а саме, своєчасно і якісно проводити польові роботи: обробіток ґрунту, внесення добрив, сівба, догляд за рослинами, збирання, первинна переробка врожаю і збереження сировини або одержаної продукції. При цьому витрати на виконання робіт мають бути оптимізовані.

Вітчизняним сільгоспвиробникам дедалі важче конкурувати із західними аграріями. Особливо дана ситуація погіршилася після вступу України до СОТ. Часто сільськогосподарська продукція (овочі, фрукти і т. д.) привезена за тисячі кілометрів, у вартість якої входять витрати на транспортування, виявляється дешевшою, ніж вирощена на території України. Зрозуміло, що умови конкурентної ринкової стихії змушують іноземних фермерів брати на озброєння найкраще, що пропонує сучасна наука.

Бурхливий розвиток в останні роки обчислювальної техніки та інформаційних технологій, точних геоінформаційних та картографічних систем створив умови для поширення досягнень інформатизації на сферу виробництва продукції рослинництва з метою її оптимізації.

На разі можливості екстенсивного та інтенсивного розвитку рослинництва практично вичерпані. Гостро постала проблема розумного використання наявних природних ресурсів, збереження їх для наступних поколінь.

Все це має місце і в Україні. Основні можливості збільшення продуктивності рослинництва тепер пов'язують із суворим виконанням рекомендацій науково-обґрунтованої інтенсивної технології щодо вимог за часом, місцем та кількістю витратних матеріалів на проведення операції. Сприяти дотриманню цих вимог повинне належне інформаційне забезпечення.

Завдання систем точного землеробства (СТЗ) дуже багатопланові. Найбільш актуальною є підвищення врожайності сільськогосподарських культур, якості одержаної продукції, поліпшення умов праці та підвищення культури землеробства. Точне землеробство намагається вирішити низку наступних завдань:

- масового механізованого відбору ґрунтових проб;
- якнайшвидшого визначення вмісту в ґрунті основних поживних речовин, бажано безпосередньо в польових умовах в умовах реального часу;
- автоматизованого створення агрохімічних та агрофізичних карт угідь за вмістом у ґрунті основних поживних речовин, вологи, об'ємної маси ґрунту та його структурно-агрегатного складу;
- розробки методик корегування стану поля до досягнення оптимальних значень вмісту поживних речовин;
- оптимізації технологій і вибору системи машин для підтримання оптимального агрофізичного стану сільськогосподарських угідь;
- розробки, реалізації, та впровадження автоматизованих розкидачів мінеральних добрив;
- автоматизованого картографування врожайності;
- корегування методик і норм внесення добрив;

- неперервного аналізу для дальшої оптимізації агрохімічного стану угідь.

Суть технології СТЗ полягає в *постійному управлінні, при якому наукова навігація в агроекологічній системі забезпечує визначення для кожної ділянки поля диференційованих норм внесення посівного матеріалу, добрив та інших витратних матеріалів залежно від реального агрохімічного стану ґрунту, природних умов та інших факторів землеробства*. Оперативне за багатьма критеріями управління сприяє скороченню витрат на всіх видах робіт аграрного виробництва та підвищенню ефективності на основі оптимізації і поліпшення організації робіт, їх виконання в оптимальні строки

Об'єктом дослідження є процеси керування мобільними сільськогосподарськими агрегатами для підживлення рослин за системою точного землеробства.

Предметом досліджень є взаємозв'язки і закономірності ефективності підживлення рослин від навігаційних стратегій та алгоритмів виявлення і розпізнавання рослин на сільськогосподарських полях.

Мета і задачі досліджень. Мета роботи полягає в підвищенні ефективності процесу підживлення рослин за системою точного землеробства шляхом удосконалення системи керування мобільними агрегатами.

Для досягнення цієї мети сформульовані такі **задачі**:

- дослідити процес та виявити основні етапи побудови та складові елементи систем точного землеробства, виявити основні перспективні напрямки підвищення ефективності їх роботи;

- дослідити ефективність різних способів і технічних засобів та їх вплив на позиціонування мобільних агрегатів на сільськогосподарських полях (як систем глобального позиціонування, так і локальних пристроїв), а також можливості реалізації на їх основі навігаційних стратегій переміщення мобільних агрегатів (курс та швидкість руху) із розробкою певного найкращого алгоритму;

- дослідити потенціальні можливості різних нейронних мереж для виявлення і розпізнавання цільових рослин на полі;

- розробити схему електричну принципову і обґрунтувати вибір технічних засобів для реалізації GNSS (GPS) модуля для позиціонування і визначення швидкості мобільного агрегату.

РОЗДІЛ 1

ІНСТРУМЕНТИ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА В УПРАВЛІННІ ПОСІВАМИ

1.1. Система точного землеробства

Система точного землеробства (СТЗ) дає змогу не тільки отримувати дешевшу продукцію кращої якості, а й знижувати шкідливе агротехногенне навантаження, за рахунок зменшення витрат пестицидів, добрив тощо. *Точне землеробство (Precision farming (Agriculture))* – це система взаємоузгоджених заходів, що ґрунтуються на оптимізації використання технологічних матеріалів (насіння, добрив, засобів захисту, регуляторів росту рослин) та агрозаходів на конкретній ділянці поля, відповідно до вимог певної сільськогосподарської культури, стану ґрунту і збереження довкілля, враховуючи унікальні особливості кожної елементарної ділянки поля [5].

Комплексні технології виробництва сільськогосподарської продукції (*Precision farming*), стали активно розвиватися за кордоном ще в кінці 90-х років і визнані світовою сільськогосподарською наукою, як досить ефективні передові технології, що переводять агробізнес на більш високий якісний рівень.

За різними причинами технології точного землеробства в нашій країні стали розвиватися тільки на разі, процес іде досить повільно, але, безумовно, майбутнє за ними.

Принципи точного землеробства надають нового змісту застосуванню інтенсивних технологій, без погіршення якості довкілля, за рахунок реалізації адаптивного потенціалу виду, сорту, агробіоценозу, тобто їх біологічної здатності пристосовуватись до умов навколишнього середовища. Щоб реалізувати адаптивний потенціал рослин, треба повністю використати їхні

біологічні можливості не тільки для підвищення потенційної продуктивності за сприятливих умов середовища, а й для збільшення екологічної стійкості (протистояння суховіям, посухам, морозам, низьким температурам). За таких умов зростатиме потенційна продуктивність сорту, агробіоценозу, що розглядається як вирішальний чинник збільшення врожайності.

Точне землеробство – це новітні вдосконаленні технології із виробництва сільськогосподарської продукції.

Науковий та технічний прогрес дає змогу сьогодні широко застосовувати в сільському господарстві сучасні технології планування та використання агротехнологій. На разі широко використовуються бортові комп'ютери, GPS-приймачі, методи дистанційного зондування, геоінформаційні системи (ГІС) [15].

Поступовий перехід до практичного впровадження точного землеробства є виявом загальної тенденції зростання ролі інформаційних технологій в усіх сферах життєдіяльності людини, а у виробництві дає змогу істотно піднести його технічний та організаційно-управлінський рівень, за рахунок високої оперативності та багатопараметричності рішень, які приймаються.

Одним із головних шляхів вирішення завдань землеробства є просторово-часова оптимізація умов для рослин. Точне землеробство у сучасному розумінні переважно орієнтоване на просторову оптимізацію. Для цього потрібно, по-перше, забезпечити рівномірне розміщення рослин у полі, що за рядкової сівби означає – на однаковій відстані. Цим створюють однакові площу й об'єм живлення для рослин.

По-друге, добрива, пестициди треба вносити так, щоб забезпечити рівноцінні умови для рослин. Однак, високі точність і рівномірність застосування технологічних матеріалів, внаслідок використання досконалішої техніки, не гарантують створення однакових умов для рослин, оскільки на різних ділянках поля вони можуть опинитися в нерівнозначних умовах, у зв'язку з варіабельністю ґрунтового покриття і властивостей ґрунту,

забур'яненості поля і заселеності його шкідниками тощо. Це, в свою чергу, може призвести до розриву в темпах росту і розвитку рослин, формування різного за якістю врожаю, неодночасності його досягання. Отже, завдання полягає у здійсненні технологічних заходів, відповідно до потреб рослин та фітосанітарної ситуації стану посівів на кожній елементарній ділянці поля, для чого потрібні його детальні картограми з даними про запас елементів живлення, густина бур'янів, стан рослин, біологічна урожайність тощо [9].

Точне землеробство передбачає:

- 1) детальне картографування поля за основними агротехнічними параметрами;
- 2) координатне прив'язування машинно-тракторних агрегатів до поля;
- 3) точне виконання технологічних заходів відповідно до особливостей елементарних ділянок поля.

Точне землеробство включає в себе багато елементів, які можна поділити на три основних етапи:

- збір інформації про господарство, поле, культуру, регіон;
- аналіз інформації і прийняття рішень;
- виконання рішень – проведення агротехнологічних операцій.

Основними складовими СТЗ є *географічна інформаційна система* (FIC, GIS), *диференційована глобальна система позиціонування* (ДГСП, DGPS), *система паралельного водіння* та *технологія змінних норм внесення* (ЗНВ, VRT) [9].

1.2. Географічна інформаційна система

Географічна інформаційна система (Geographic Information System, GIS) – це система комп'ютерних апаратних засобів та програмного забезпечення, призначена для збирання та обробки даних щодо агротехнологічних параметрів елементарних ділянок поля.

Інформацію можна збирати відбиранням проб у полі (наприклад, для визначення агрохімічних показників) з наступними обробкою результатів аналізів і прив'язуванням їх до координат місць відбирання. Створено оптичні прилади з безконтактними датчиками, за допомогою яких в інфрачервоному випромінюванні з літаків або супутників фотографують поля. Інформація з характеристиками параметрів накопичується в базі даних (Data base), використовується для складання тематичних карт (Thematic map) урожайності, вмісту елементів живлення, норм внесення технологічних матеріалів тощо [12].

1.3. Диференційована глобальна система позиціонування

Диференційована глобальна система позиціонування (Differential Global Positioning System, DGPS) – радіонавігаційна супутникова система, спеціально скоригована для визначення місцезнаходження стаціонарних і мобільних об'єктів у трьох світових координатах (довгота, широта, висота) з точністю до десятків сантиметрів. Є поліпшеним варіантом глобальної системи позиціонування (GPS – Global Positioning System).

Глобальна система позиціонування, в оригіналі NAVSTAR GPS – це система радіонавігації на базі супутників, що належить уряду Сполучених Штатів і керується військово-повітряними силами Сполучених Штатів. GPS – супутникова система навігації, яка використовується для визначення положення наземного об'єкта. GPS-технологія вперше була використана військовими США в 1960-х роках і поширилася в цивільному користуванні протягом наступних десятиліть. Сьогодні GPS-приймачі включені у багато комерційних товарів, таких як автомобілі, смартфони, годинники для тренувань та GIS-пристрої. На їх основі розроблені системи паралельного водіння та автопілоти для управління рухом тракторів та комбайнів [17].

Система GPS включає 24 супутники, розташовані в космосі на висоті 19 300 кілометрів (12 000 миль) над земною поверхнею. Вони обертаються навколо Землі один раз на 12 годин зі швидкістю 11200 кілометрів на годину (7000 миль на годину). Супутники рівномірно розподілені, таким чином, чотири супутники завжди доступні і знаходяться у полі зору з будь-якої точки земної кулі.

Кожен супутник GPS (рис.1.1) транслює повідомлення, яке включає поточне положення супутника, орбіту та точний час. GPS-приймач поєднує трансляції з декількох супутників для обчислення його точного положення за допомогою процесу, який називається тріангуляцією. Для визначення місця приймача потрібні три супутники, хоча з'єднання з чотирма супутниками є ідеальним, оскільки забезпечує більшу точність.

Для того, щоб GPS-пристрій працював коректно, він повинен спочатку встановити з'єднання з необхідною кількістю супутників. Цей процес може зайняти від декількох секунд до декількох хвилин, залежно від потужності приймача. Наприклад, GPS-пристрій автомобіля зазвичай встановлює GPS-з'єднання швидше, ніж приймач у годиннику чи смартфоні. Більшість GPS-пристроїв також використовують певний тип кешування місцезнаходження, щоб прискорити виявлення GPS. Запам'ятовуючи попереднє місце, GPS-пристрій може швидко визначити, які супутники будуть доступні наступного разу, коли він зісканує GPS-сигнал.

Найпростіший прилад складається з термінала-супутникового приймача, що встановлюється в кабіні трактора на лобовому склі (або в будь-якому іншому зручному місці) та показує трактористу, як вирулювати кермо щоб трактор/агрегат рухався якомога рівнішими лініями (рис. 1.2) [13].

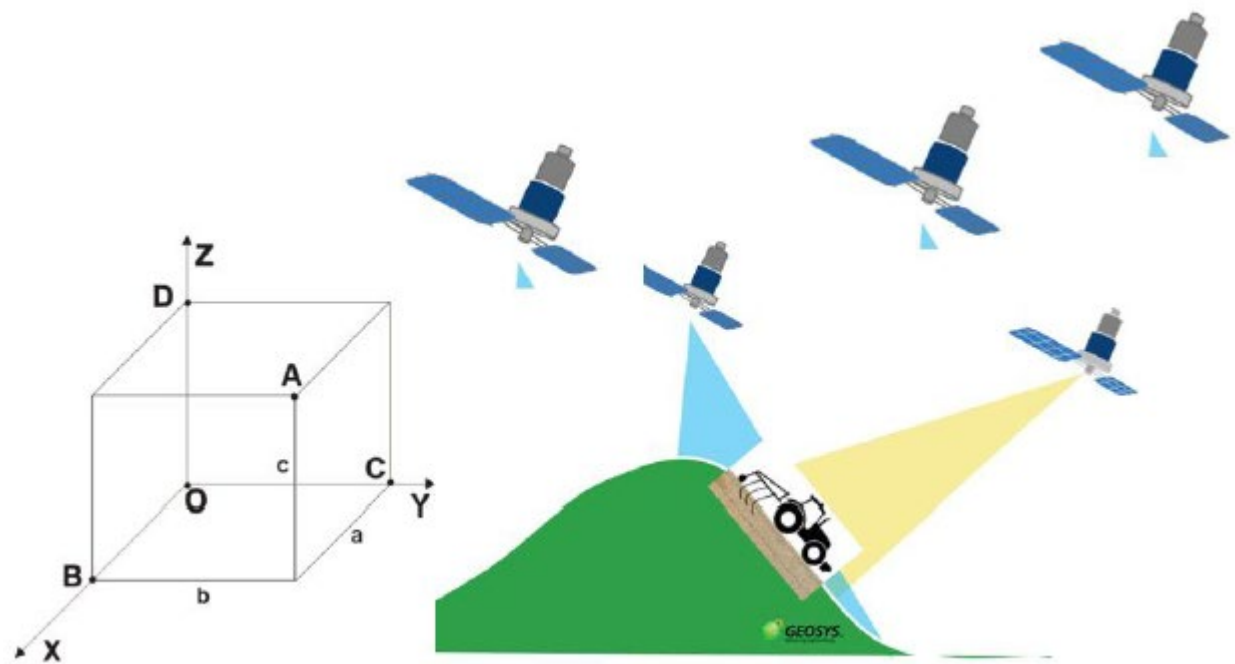


Рис. 1.1. Уявна схема про роботу системи GPS



а)



б)

Рис. 1.2. Антена GPS-приймача, встановлена на кабіні трактора (а) та панель управління сучасного трактора, оснащена елементами автоматичного керування (б)

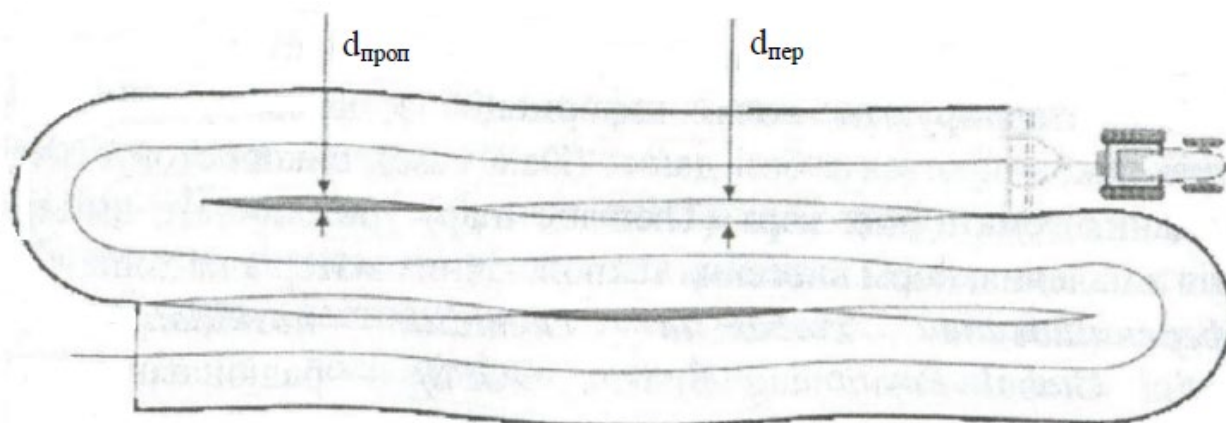
1.4. Система паралельного водіння

Для того, щоб зрозуміти необхідність застосування пристроїв паралельного водіння і створення системи координат, наведемо такий приклад, при проведенні технологічної операції із догляду за рослинами – внесення інсектицидів, 18-метровий обприскувач повинен рівномірним шаром

покрити поле. Щоб тракторист їхав не "на глазок" на полі розставляють маяки (працівники, які відміряють лінії рівні ширині агрегату) на які, в свою чергу, орієнтується механізатор. На практиці звичайно все складніше і після обробки агроном стикається з такими проблемами, як пропуски та перекриття.

Як би сумлінно працівник не відміряв лінію він все одно помиляється. І відстань між лініями може бути і 17, і 19 метрів. Звичайно на полі використовується щонайменше 2 маяки, кожен з них помиляється по-своєму. Крім того помиляється і сам механізатор, адже маяк може знаходитись на відстані до півкілометра, а то і більше. Знову ж виникають пропуски та перекриття.

У реальній роботі механізатора за кермом трактора практично неможливо побачити ідеального малюнка обробки поля, зазвичай це виглядає так, як показано на рис. 1.3, 1.4.



де $d_{\text{проп}}$ – пропущені ділянки;

$d_{\text{пер}}$ – перекриті ділянки

Рис. 1.3. Помилки механізатора

Результатом подвійного внесення пестицидів є пригнічення рослин. А пропуски – це неефективне використання площі, труднощі, що виникають при збиранні урожаю, полігон для розмноження бур'янів.

Важко працювати на пізніх стадіях вегетації рослин, коли піна провалюється. Крім того на якість використання пінного маркера впливає

вітер – піна лягає не рівно. Для пінного маркера необхідні витратні матеріали – піноутворююча хімія, яку складно зберігати у господарстві.

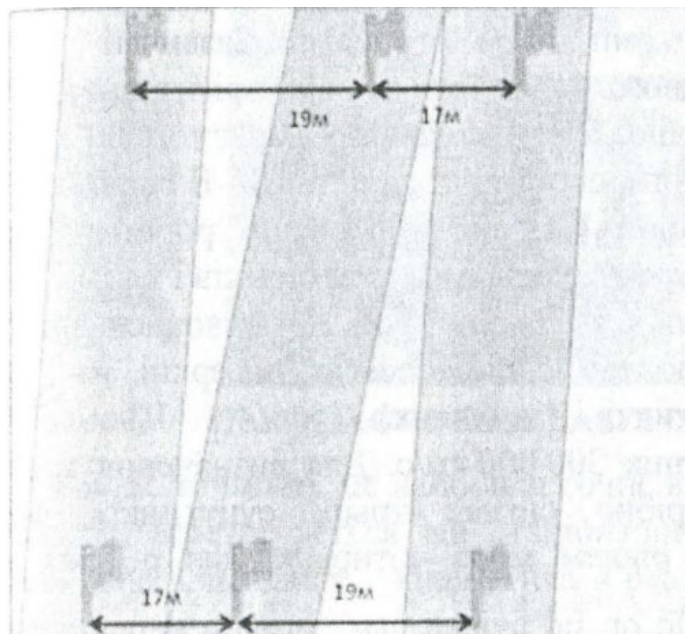


Рис. 1.4. Помилки механізатора при використанні орієнтирів

Не найкращий вихід забезпечує і використання пінного маркера, при довжині штанги в дев'ять метрів оператор просто не бачить, кінець штанги йде саме над маркером, або ні.

Останній момент необхідності застосування навігаторів, це час внесення хімії. В 70 відсотках випадків, хімію бажано вносити при температурі 17-20С° у безвітряну погоду, щоб досягти максимального ефекту. Працювати вночі використовуючи маяки неможливо.

Використання найпростіших систем паралельного водіння дає змогу працювати вночі або при поганій видимості, зменшити перекриття з 1,5 м (звичайна величина) до 30 см, на полі площею 100 гектарів, загальне перекриття зменшується з 7,5 до 1,5 гектара [4].

Це простий приклад використання систем GPS-навігації. Окремо варто розповісти про більш складніші системи – автопілоти.

Наприклад, власник має потужний трактор (300 к. с.) та 12 метрову сівалку, навіть важко уявити маркер завдовжки 6 метрів. А якщо це технологія "мінімального обробітку" і слід маркера практично не видно? Тому в цьому

випадку найкраще використовувати GPS – систему, але більш складнішу – автопілот з підключенням до гідравліки та системою компенсації кута нахилу. Неточності посіву, пов'язані з помилками механізатора та складним рельєфом поля, будуть мінімальними. Зменшення участі водія безпосередньо у процесі керування дає можливість підвищити швидкість до максимально можливої без зниження якості. Водію достатньо тільки розвернути трактор в кінці загінки решту система зробить сама. Окрім підвищення точності роботи, це дасть змогу механізатору приділяти більше уваги агрегату. І, нарешті, можливість працювати вночі (друга зміна) Дозволить ефективніше використовувати дорогу техніку, прискорити процес амортизації та вчасно провести посів.

Необхідно також сказати про найбільш дорогі системи, які можна використовувати у дуже великих господарствах, де складно проконтролювати якість виконаної роботи. Основною відмінністю їх є використання більш складного терміналу. Такий прилад отримує завдання з персонального комп'ютера агронома.

Зазвичай зміст завдання – це назва конкретного поля, його площа, орієнтовний час роботи, ім'я механізатора, тощо. Після виконання наряду, тракторист віддає картку оператору, який переносить ці дані на ПК. В свою чергу спеціальна програма проводить аналіз виконаної роботи: час, швидкість, наявність/відсутність перекриття або пропусків і т. п.

Радіонавігаційні системи в своїй роботі використовують супутниковий зв'язок. Відомо, що навколо земної поверхні, на 6-ти орбітах рухається 24 супутники (активних) [9]. Швидкість сигналу, що надсилає супутник 300 000 км/с. Для визначення місця розташування об'єкта потрібно сигнал трьох супутників, для визначення положення над рівнем моря чотирьох, для роботи за точним землеробством шести.

Існують такі види сигналів: 1) безкоштовні; 2) платні; 3) базові станції та РТК.

Взаємне розташування супутників, відслідковується приймачем, постійно змінюється в міру їх руху на орбітах. Конфігурація супутників

оцінюється параметром DOP (Dilution of Precision – втрата, послаблення точності) (додаток Г). В загальному вигляді, при $DOP < 4$ приймач GPS забезпечує достатню точність визначення місцезнаходження. Чим більше супутників знаходиться в зоні видимості приймача, тим більша точність визначення координат буде забезпечуватися.

Для сигналів із супутників існують класи точності:

I клас точності, це найбільш точне визначення місцезнаходження об'єктів, забезпечується він стаціонарними радіостанціями (**RTK – Real-Time Kinematics** – кінематика в реальному часі). RTK – місцева стаціонарна станція, має радіус дії до 50 км, точність ± 3 см та Base Line агрокомівська місцева станція, працює вона в радіусі 5 км, точність ± 5 см.

Базова станція дає змогу проводити всі види сільськогосподарських робіт, у тому числі точний посів, локальне внесення добрив і точну культивування просапних культур. За допомогою даної системи можна із року в рік дотримуватись однієї і тієї ж технологічної колії або попадати в одні і ті ж рядки, щоб сіяти «слід в слід» декілька років.

Стаціонарні радіостанції являють собою валізки вагою до 4 кг, в яких знаходяться GPS-приймач, радіомодем і антена. Проблемою їх використання є висока вартість станцій (близько 5...10 тис. євро, станом на 2024 р.).

II клас точності, забезпечується ліцензійним, платним сигналом від супутника Omnistar. В залежності від типу підписки Omnistar забезпечує декілька рівнів точності: VBS та HP/XP. VBS (віртуальна базова станція) дає майже таку ж точність, як EGNOS – $\pm 15-20$ см. Цього достатньо, щоб якісно проводити обприскування або внесення добрив. Підписка на VBS коштує до 1,5 тис. євро в рік, або 3 євро за годину (при замовленні не менше 150 годин).

HP/XP забезпечує точність $\pm 5-10$ см. Використовує супутникову навігацію для посіву просапних культур, подальшого обробітку рядків і складання карти полів та урожайності. Річна вартість HP/XP коштує на порядок дорожче. Щоб користуватися сервісом VBS та HP/XP, потрібно мати GPS -приймач, який підтримує такі послуги, або удосконалювати GPS-

приймач початкового рівня, добавивши до нього спеціальну антену і програмне забезпечення.

III клас точності, дають американські супутники EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Services – система широкозонної диференціальної навігації)/WAAS та E-Dif. Цей сигнал безкоштовний, забезпечує точність до ± 15 см, дає змогу проводити внесення агрохімікатів, боронування та посів. Крім того можна визначати площу полів та слідкувати за технікою, яка працює в полі.



а)



б)

Рис. 1.5. Базова RTK-станція портативного типу, що використовується для корекції руху у системах паралельного водіння (а) та монітор Trimble з відображенням процесу паралельного водіння по рядках (лініях) (б)

IV клас точності, це GPS – Global Positioning System сигнал (рис. 1.5, а). Він забезпечує точність ± 100 см. На точність сигналу під час роботи в полі впливає багато факторів: лісосмуги, елементи рельєфу, лінії електропередач та ін. Тому на практиці точність сигналу протягом робочого часу корегується.

Перед тим як обрати з яким сигналом необхідно працювати треба зважити всі за і проти.

Для невеликого господарства можна використовувати прилад з ручним керуванням та точністю 30 см, що встановлюється на МТЗ який агрегатується з широкозахватним агрегатом, як то обприскувач або розкидач добрив.

Власнику, що має потужний імпортований трактор та бажає вести посів не просяпаних культур, щоб використовувати його на всі сто відсотків, потрібен автопілот з безкоштовним або платним сигналом.

Підприємству, що використовує 2-5 автопілотів варто використовувати базову станцію або RTK.

Точне управління сільським господарством починається з управління сільськогосподарськими машинами, яке здійснюється за візуальної підтримки автоматичного управління сільськогосподарськими машинами паралельно до визначеної граничної лінії та проходження машини паралельно контурам поля. За допомогою такого водіння можна зробити паралельні прямі та криві, а також кругові та спіральні ряди. Якщо на полі є перешкоди (наприклад, осередок з деревами), то пристрій призупинить паралельне водіння та об'їде його, а потім продовжить виконувати ряд. Можна ускладнити задачу, задаючи зону розвороту на краях поля. Тоді пристрій розраховує поворот і буде орієнтуватися, коли та як повертати. При встановленні такої системи на трактор механізатор спостерігає за показниками пристрою в середині кабіни та слідкує тільки за тим, щоб на полі не зустрілося каміння та інші крупні перешкоди.

Використання пристроїв паралельного водіння надає наступні переваги:

- максимально використовується ширина агрегату, перекриття рядків зводиться до мінімуму;
- дає змогу працювати вночі та при низькій видимості – збільшуючи при цьому коефіцієнт завантаженості техніки (продуктивність техніки може збільшитись на 15-20%);
- виключає необхідність додаткових матеріалів для маркування рядків;
- підвищує швидкість руху агрегатів та комфортність роботи водія.

Не можна не згадати, також, про системи візуального водіння, що не використовують супутники, а обладнанні цифровими камерами і мають точність $\pm 3-5$ см. Laser Pilot за допомогою лазерного променя визначає

границі рядків і на основі отриманих сигналів направляє зернозбиральний комбайн, оптимально використовує при цьому жатку. Ця система забезпечує високу експлуатаційну надійність навіть при роботі із полеглими зерновими та вночі, оптимально використовує ширину захвата жатки, збільшує точність визначення площі і розташування врожаю, підвищує продуктивність скошування.

1.5. Технологія змінних норм внесення

Технологія змінних норм внесення (Variable Rate Technology, VRT) – це внесення за допомогою спеціального обладнання змінних норм (доз) технологічних матеріалів, відповідно до особливостей кожної елементарної ділянки поля. Основою VRT є високоточна сільськогосподарська техніка, функціональні властивості якої визначаються широким використанням електронних пристроїв (комп'ютерів, мікропроцесорів, датчиків).

Для якісного адресного розрахунку доз мінеральних добрив необхідно враховувати агрохімічні властивості ґрунту, такі як: кислотність, рухомі форми фосфору й калію, органічна речовина, сума ввібраних основ, тобто основні хімічні індекси родючості ґрунтів. Для визначення значень цих показників проводиться агрохімічне обстеження ґрунтів [14].

Агрохімічне обстеження полів дає змогу розробити особливий метод внесення добрив для кожного поля та кожної культури окремо.

При базовому агрохімічному аналізі визначається вміст наступних елементів: N, P, K, Ca, Mg, S, pH, гумус.

При розширеному агрохімічному аналізі до зазначеного вище переліку додаються наступні елементи: B, Zn, Cu, Fe, Mo.

Агрохімічний аналіз ґрунту – це швидкий, економічний та надійний спосіб визначення необхідної норми кожного елемента на кожному конкретному полі під час передпосівного та вегетативного періоду.

Агрохімічний аналіз в сукупності з якісним насінням, ефективним захистом від бур'янів та хвороб, диференційним внесенням добрив та сприятливими погодними умовами сприяють значному збільшенню врожайності, а відповідно і прибутку.



Рис. 1.6. Структура і склад бази ґрунтів СТЗ

На сьогоднішній день в Україні агрохімічне обстеження проводиться, як правило, традиційним для минулого сторіччя методом, відповідно до "Методичних вказівок по проведенню комплексного агрохімічного обстеження ґрунтів сільськогосподарських угідь" (1994 р.). Розмір елементарної ділянки, тобто площа сільськогосподарського поля, що характеризується однією пробою, в загальному випадку визначається кількістю фосфорних добрив, внесених у ґрунт. Причому розміри й місце розташування елементарної ділянки визначаються «на око», що відповідно дає приблизний результат. Це особливо позначається на порівнянні результатів аналізу в різні роки, тому що наступного разу проба береться не в

тому самому місці, що рік тому, а з погрешністю в десятки метрів або й більше.

Сьогодні схожі методи обстеження сільськогосподарських полів вважаються застарілими й не відповідають вимогам часу. У багатьох сільськогосподарських підприємствах світу і в Україні зокрема, вже використовуються високотехнологічні методи, що використовують автоматику, комп'ютерну техніку, систему глобального позиціонування (GPS). Сучасний підхід є одним з основних елементів «точного землеробства».

Сучасні мобільні автоматизовані комплекси дають змогу проводити агрохімічне обстеження ґрунтів і створення електронних карт полів (із сантиметровою точністю) на високому рівні з використанням новітніх досягнень в області інформаційних технологій.

Такі комплекси складаються з наступних функціональних компонентів:

- 1) транспортний засіб (трактор, пікап, квадроцикл);
- 2) автоматичний ґрунтовий пробовідбірник (глибина відбору від 10 до 120 см);
- 3) супутникова система позиціонування (GPS);
- 4) кишеньковий персональний комп'ютер або ноутбук;
- 5) програмне забезпечення.

Після отримання результатів агрохімічного аналізу ґрунтів необхідно застосовувати систему диференційованого внесення добрив, яка призначена для диференційованого внесення рідких та твердих добрив та отрутохімікатів на полі у відповідності до аплікаційної (технологічної) карти з метою зменшення витрат добрив і збільшення врожайності.

Вона складається з бортового комп'ютера з інтегрованим приймачем DGPS, антени, чіп-карти, програмного забезпечення для персонального комп'ютера AGRONET NG або AGRO-MAP.

Впровадження системи диференційованого внесення добрив надає наступні переваги:

- 1) збільшує врожайність сільськогосподарських культур;
- 2) зменшує кількість внесених добрив;
- 3) "вирівнює" усі ділянки поля за вмістом поживних речовин.

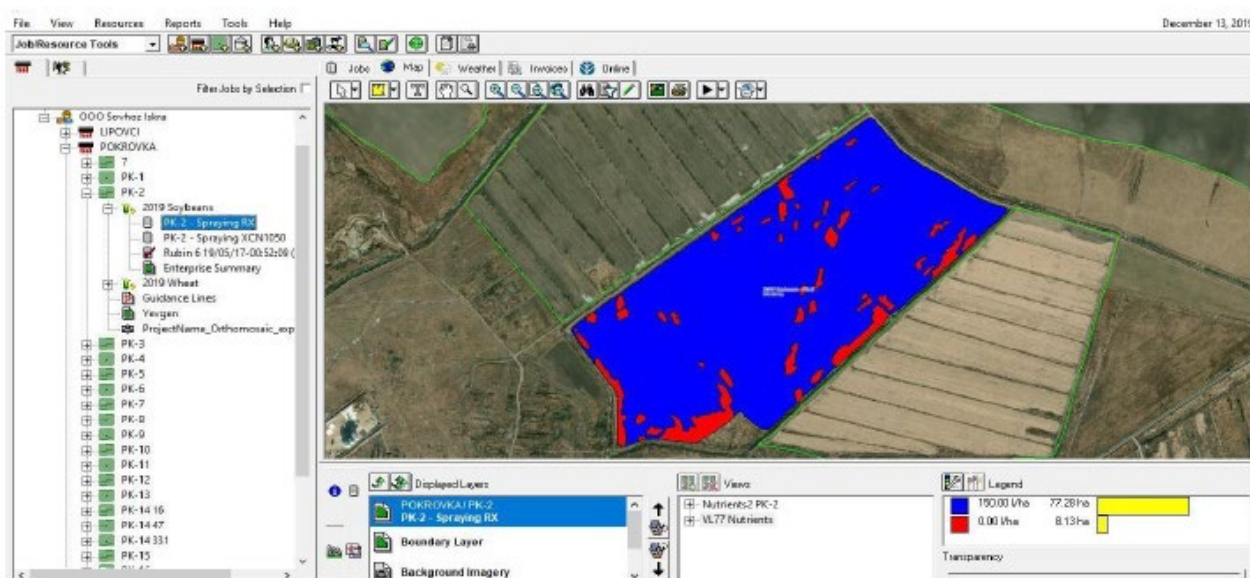


Рис. 1.7. Оперативна карта для диференційного внесення ЗЗР VRA maps.

Zone application. PLM Software

Для визначення норми внесення добрив, запису на бортовий комп'ютер карти біомаси, формування технологічних карт диференційованого внесення добрив та використання їх на основі технологічної карти на разі широко використовують інноваційний датчик біомаси – GROF-METER AGROCOM.

Даний датчик має двох точкову калібровку, яка базується на визначенні максимальної і мінімальної норми внесення пестицидів (азотних добрив, фунгіцидів, регуляторів росту).

Порівняння карт стану посівів (отриманих у результаті застосування системи GROF-METER) з картами врожайності дає можливість визначати структуру врожаю задовго до проведення збиральних робіт, що дає можливість оцінити ефективність проведених робіт із догляду за посівами.

Наступним елементом точного землеробства є використання сучасних обприскувачів, що використовують GPS-навігатори, які можуть працювати на безкоштовних та платних сигналах.

У чому полягає необхідність використання GPS-навігаторів при виконанні догляду за посівами? Відповідь на це питання дає характеристика виконання основних агротехнічних операцій.

Трактор з причіпним або навісним агрегатом курсує з одного кінця поля на інший, і слідом за ним залишається оброблена ділянка. Кожного разу механізатор мусить пильнувати, аби край агрегату рухався чітко по межі щойно обробленої ділянки. А ледь відступить убік – і між двома проходами утворюється смуга, позбавлена добрив. Якщо ж підстрахуватися і за кожним разом «прихоплювати» край уже обробленої смуги, утворюються ділянки, які отримали подвійну порцію препаратів. Мало того, що у ґрунті можуть опинитися підвищені дози препаратів, не завжди корисних для здоров'я – така ретельність обертається додатковими витратами дорогих добрив або препаратів.

А якщо поле має не прямокутну форму, та ще й межує з ярами або лісосмугами. Виконувати на ньому паралельні рухи широкозахватного агрегату практично неможливо. У результаті господарство зазнає значних витрат хімікатів та пального, тому тут на допомогу приходять системи точної навігації.

Маючи необхідну апаратуру, трактористу байдуже, яку форму має оброблюване поле. Достатньо проїхати агрегатом по його краю, і електроніка сама визначить маршрут руху трактора.

При розвороті вона візьме управління ним «у свої руки» і чітко поведе машину оптимальним маршрутом – похибка при суміщенні меж оброблюваних смуг не перевищує $\pm 10-15$ см. Більше того, маршрут заносять у базу даних і, наприклад, якщо проводився посів кукурудзи, наступного разу, коли потрібно буде обробити міжряддя, система використає координати проходження сівалки і, як ідеальний поводитир, направить культиватор точно між рядками.

Встановлюється вона на щитку приладів, обладнана світловими діодами, які оповіщають про відхилення передніх коліс від заданого

маршруту. Водієві лишається стежити за датчиками і поворотом керма, коригувати рух трактора.

В Україні на обприскувачах використовуються системи паралельного керування із класом точності до ± 20 см. Вони мають найбільший попит завдяки простоті й універсальності, можливості швидкої адаптації на місцевості. На обприскуванні максимальну точність виконання агротехнічної операції забезпечують базові станції ($\pm 1-3$ см.). Вони можуть забезпечити поправки від локальної базової станції, яка встановлюється на краю поля.

Для роботи за цією технологією на обприскувач встановлюється радіомодем.

Поправки від базової станції передаються по радіо. Якщо вести мову про доцільність придбання базових станцій для обприскування посівів, то варто врахувати кілька принципових моментів. По-перше, їхню потужність: ці станції навіть без підсилювача можуть покривати площі у радіусі близько 25 км. По-друге, їх використання пов'язане з необхідністю оформлення ліцензій на високочастотний або ультрависокочастотний радіоканал.

Термін окупності GPS-систем через їх вартість може становити 1-3 роки. Оскільки інформація про рух кожного трактора на полі зберігається в комп'ютері, то навіть через п'ять років достатньо взяти її за основу, і агрегат рухатиметься тим же маршрутом [8].

1.6. Системи картування полів і врожайності

Наступним елементом точного землеробства є збирання врожаю. Для того, щоб істотно впливати на швидкість та якість проведення збиральних робіт спеціалістам, або керівникам необхідно мати повну характеристику збирання кожного комбайна, для цього існують спеціальні програми та пристрої.

На разі існує два методи визначення врожайності. Перший – механічно зважити зібраний врожай після розвантаження зернозбирального комбайна, другий (система картування врожайності) – вимірювання врожаю у реальному часі протягом всієї роботи комбайна за допомогою систем GPS.

Система картування врожайності – це сукупність обладнання та програмного забезпечення, за допомогою якого здійснюється облік кількості урожаю зібраної культури на кожній визначеній ділянці поля. Під час роботи збиральної техніки у бортовому комп'ютері фіксується час роботи, назва поля із зазначенням культури, загальна зібрана площа, кількість витраченого пального, дані про техніку, оператора, який на ній працює, та господарство, в якому відбуваються жнива.

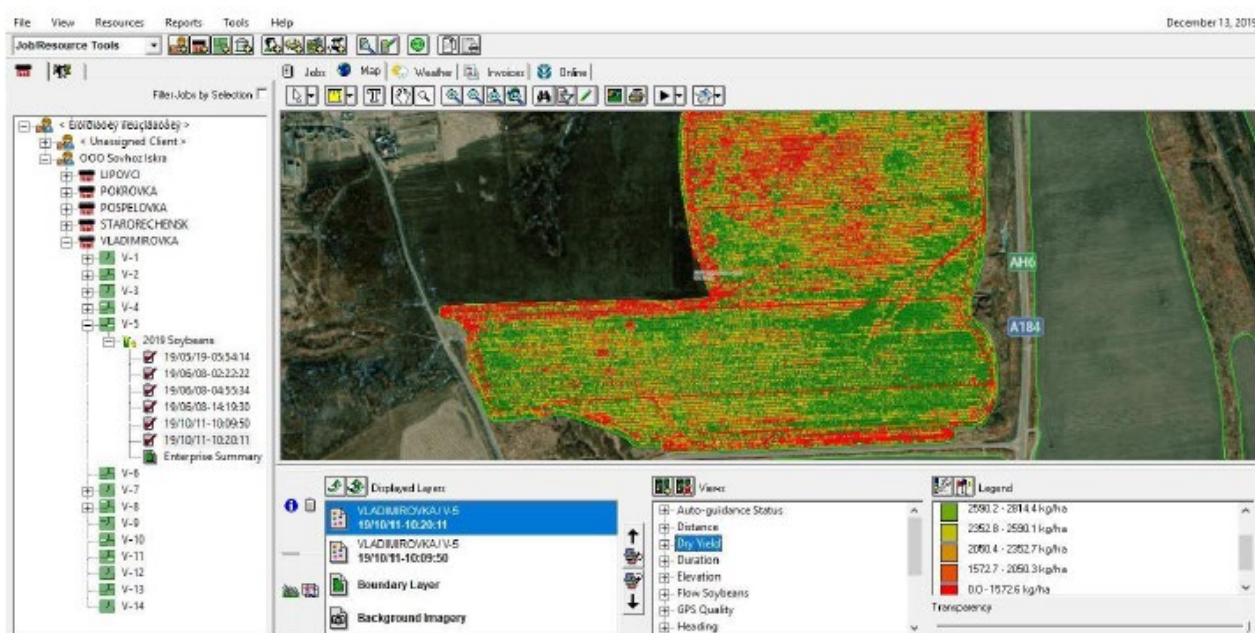


Рис. 1.8. Приклад отриманої карти урожайності

Перші системи картування врожайності не були точними. До 2000 року точність визначення координат у системі GPS мала похибку $\pm 10\text{-}20$ м.; також великі похибки мали датчики намолоту. З появою коригуючих сигналів DGPS точність визначення координат сягнула $\pm 5\text{-}10$ см. Така інформація вже має велику цінність. Всі останні серії зернозбиральних комбайнів здійснюють повний облік всіх робіт у бортовому обладнанні з можливістю подальшого опрацювання за допомогою програмного забезпечення комп'ютера [12].

Карта врожайності (рис. 1.8) – це різнокольорова карта, на якій кожен колір відповідає певному діапазону врожайності. Зелений – від 0,04-0,06 т/га, жовтий – 0,01-0,04, червоний – 0- 0,01 т/га. Перші системи для створення карт урожайності призначалися лише для зернозбиральної техніки, але їх принцип дії можна застосовувати й для визначення врожайності інших сільськогосподарських культур. Принцип картування врожайності у переважній більшості сучасних комбайнів такий: під час жнив за допомогою спеціальних пристроїв (сенсорів, датчиків, бортового комп'ютера) фіксують кількість зібраного врожаю на визначеній ділянці. Просторові координати комбайна в кожен момент часу надходять від DGPS-приймача.

Точність визначення врожайності залежить від калібрування датчиків і майже не залежить від культури, збирання якої ведеться. Стандартне відхилення вимірювань не перевищує 3-10%, для всіх типів датчиків.

У процесі використання елементів точного землеробства створюються електронні карти полів. *Електронна карта поля* – це: зручність, наочність, ефективність, можливість оперативного внесення змін та швидкий доступ до будь-якої занесеної інформації. Вони дають можливість вести облік та контроль всіх сільськогосподарських операцій, оскільки ґрунтується на точних даних: площі полів, відстані доріг тощо, допомагають провести повний аналіз умов, які впливають на ріст та розвиток рослин на даному полі, або на ділянці 100х100 м, дають змогу оптимізувати виробництво з метою отримання максимального прибутку, а також раціонально використовувати у виробництві ресурси.

Тобто, електронні карти полів використовуються для: обліку сівозмін, картування врожайності, обстеження ґрунтів (рис. 1.9), статистичного та тематичного аналізу даних та планування виробничих процесів.

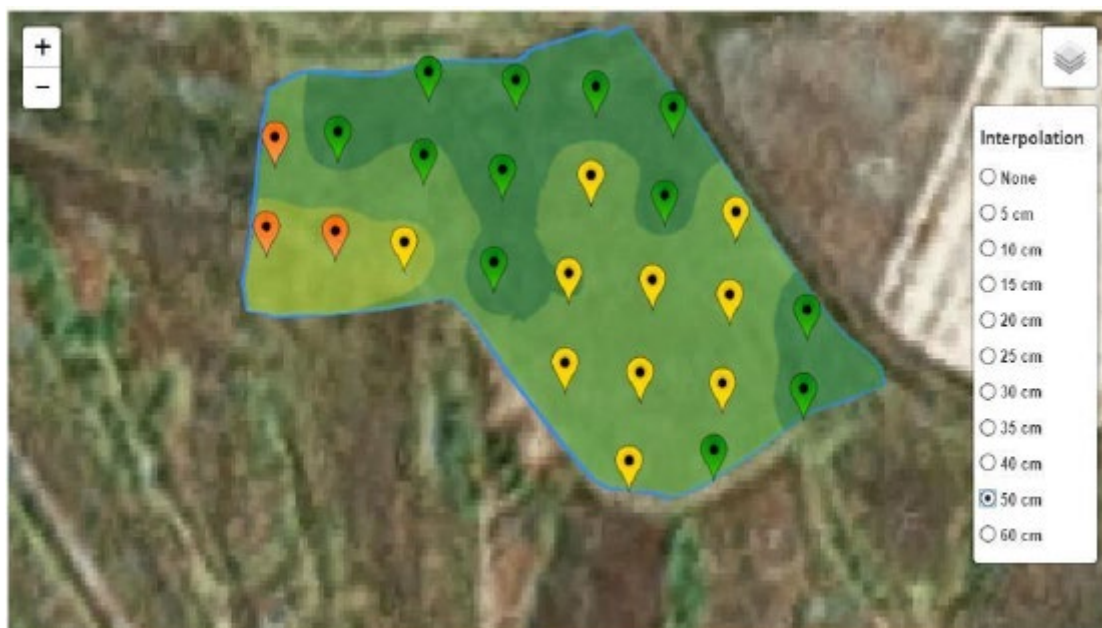


Рис. 1.9. Приклад карти ущільнення ґрунтів. Натискуючи шкалу глибини (справа) – отримуємо величину ущільнення ґрунтів на вказаному горизонті

1.7. Висновки по 1 розділу

Переваги точного землеробства полягають у наступному: точна документація по витратах ресурсів, облік внутрішніх і зовнішніх витрат; збір, аналіз та зберігання критичних даних із внесення добрив, посіву та збиранню урожаю; оптимізація виробничого циклу; інші переваги для агробізнесу можуть полягати в електронному записі і зберіганні історії польових робіт і урожаїв, що може допомогти як при подальшому ухваленні рішень, так і при складанні спеціальної звітності про виробничий цикл, яка все частіше потрібна законодавством розвинених країн.

Як було зазначено, для побудови систем керування системами точного землеробства для підживлення рослин необхідно вирішити такі основні задачі:

1. Здійснити картографування поля за основними агротехнічними параметрами.

2. Виконати координатне прив'язування мобільних агрегатів (мобільних роботів, БПЛА, машинно-тракторних агрегатів) до поля. Крім того, необхідно визначитися із організацією та реалізацією *навігаційної стратегії* (методи і алгоритми, а також технічні засоби для позиціонування і пересування мобільних агрегатів заданим курсом).

3. При здійсненні підживлення рослин, при захисті рослин від шкідників за технологією точного землеробства необхідно забезпечити адресне внесення добрив або пестицидів, що неможливо без *алгоритмів виявлення* рослин на полі (наявність цільової рослини на ґрунті) та їх *розпізнавання* (цільова рослина чи бур'ян або сторонній об'єкт).

Подальші розділи магістерської роботи присвячені другій і третій вказаним задачам – визначенню навігаційних стратегій мобільних сільськогосподарських агрегатів (позиціонування і прокладання курсу пересування) та розробці алгоритмів виявлення та розпізнавання цільових рослин на полі.

РОЗДІЛ 2

ПІДХОДИ І АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИМИ АГРЕГАТАМИ У СИСТЕМАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

2.1. Вибір навігаційної стратегії керування мобільними агрегатами при організації RTK-технологій

Коли постає питання вибору навігаційної стратегії при використанні систем точного землеробства, особливо при поєднанні локальних і глобальних навігаційних даних, вибір найкращої системи позиціонування (системи координат у часі) має першочергове значення. Локальна прямокутна система координат, відома як «північно-східна» (тобто прямокутні координати відраховуються у напрямку з півдня на північ і з заходу на схід; вісь абсцис у проекції UTM (у проекції Гаусса X) позначається літерою N (північ), а вісь ординат (у проекції Гаусса Y) – E (схід)), або як універсальна поперечно-циліндрична проекція Меркатора UTM (див. додаток А), забезпечує ідеальні умови для поєднання різноманітних станів транспортного засобу, які можна виміряти за допомогою численних датчиків різної природи [27].

У таблиці 2.1 наведене співставлення найбільш поширених типів навігаційних систем та характерних для них параметрів, які використовуються зокрема польовими роботами із звичайними датчиками, що застосовуються у позашляхових транспортних засобах.

Розшифровка деяких понять, які відображені у таблиці 2.1, наведені у додатку Б.

Слід зазначити, що для різних умов роботи польових роботів або роботизованих транспортних сільськогосподарських засобів різні дані мають різне вагове значення, і для кожного випадку необхідно встановити певну ієрархію даних, які попадають у навігаційні алгоритми.

Таблиця 2.1.

Джерела навігаційних даних для сільськогосподарських робіт

Тип системи	Позиція	Час	Швидкість	Курс	Нахил (тангаж / крін)
GNSS	Прямий рядок GGA	Прямий рядок GGA	Прямий рядок VTG; прямий розрахунок	Прямий рядок VTG; пряме отримання даних від двох приймачів	Пряме отримання даних від двох приймачів
Гіроскоп / Інерційний вимірювальний пристрій IMU	Точний розрахунок	-	Кутова (курсова) швидкість	Через одну ітерацію	-
Доплерівський радар	Точний розрахунок	-	Пряме вимірювання	-	-
Компас	-	-	-	Пряме вимірювання	-
Машинний зір	Локально, залежить від особливостей середовища	-	Похідний відеопотік	Локально, залежить від особливостей середовища	-

Дані таблиці 2.1 показують, що доплерівський радар в основному використовується для незалежної оцінки швидкості руху, гіроскопи і компаси придатні для визначення курсу, а машинний зір на практиці обмежений локальним сприйняттям (враховуючи, що точний розрахунок ускладнений для позашляхових транспортних засобів, коли проковзування коліс є звичайною справою). Однак можливості GNSS є набагато ширшими, і практично усі параметри, які перераховані у таблиці 2.1, з більшою або меншою точністю, можуть бути оцінені за допомогою цього унікального джерела. Питання полягає у тому, щоб визначити, коли і якому показнику необхідно надати більшу або меншу вагу на основі його надійності в системах реального часу.

Використання двох окремих приймачів на одному транспортному засобі для визначення курсу, кріну (нахилу) і тангажу (*тангаж* (фр. *tangage* — «кільова хитавиця») — кутовий рух літального апарата або судна відносно головної поперечної осі інерції. Кут тангажу — кут між поздовжньою віссю

Рядок із ідентифікатором VTG містить швидкість і курс відносно землі.

Таблиця 2.3.

Призначення параметрів рядку VTG

Приклад рядка VTG									
\$GNVTG,49.75,T,,M,0.12,N,0.22,K*FF/r/n - версія 2.2									
\$GNVTG,49.75,T,,M,0.12,N,0.22,K,A*FF/r/n - версія 4.0 и 4.1									
^ ^^ ^ ^ ^ ^ ^ ^									
1 23 4 5 6 7 8 9									
1 – Курс на істинний полюс у градусах. У прикладі "49.75" = 49.75°.									
2 – Прапорець достовірності курсу: 'T'- True / 'F'- False. У прикладі 'T'-True.									
3 – Магнітний нахил в градусах. Відсутній у прикладі.									
4 – 'M' - Магнітний.									
5,6 – Швидкість, одиниці вимірювання швидкості. У прикладі "0.12, N" = 0.12 вузлів.									
7,8 – Швидкість, одиниці вимірювання швидкості. У прикладі "0.12, K" = 0.22 км/год.									
9 – Спосіб обчислення швидкості і курсу (відсутній у версії 2.2). У прикладі 'A' - автономний.									
'A' - автономний. 'D' - диференційний. 'E' - апроксимація. 'M' - фіксовані дані. 'N' - недостовірні дані.									
Примітка: У повідомленнях NMEA 0183 версії 2.2 рядок містить тільки 8 параметрів.									

У зв'язку з тим, що рядки GGA (таблиця 2.2) одночасно надають і положення, і час, то миттєва швидкість може бути розрахована за послідовністю точок положення. Однак слід мати на увазі, що цей спосіб розрахунку швидкості відрізняється від способу розрахунку швидкості в рядках VTG (таблиця 2.3), оскільки прямі розрахунки швидкості базуються на методі Доплера і зазвичай перевищують розрахунки на основі положення.

Процедура отримання напрямку і швидкості на площині з послідовності точок, визначених рядками GGA, попередньо перетвореними в локальну дотичну площину, може бути узагальнена наступним чином. Усі точки, зареєстровані у полі приймачем GNSS, складають набір T математичних об'єктів, що визначають траєкторію мобільного роботу у часі і двовимірному (плоскому) просторі. Конкретні точки траєкторії, які використовуються в даний момент для розрахунку курсу та швидкості, утворюють підмножину S із множини T .

Формально визначимо, що нехай

$$T = \{1, 2, 3, \dots, m\}$$

буде набором індексів точок, які визначають траєкторію мобільного робота у полі, а

$$S = \{1, 2, \dots, h+1\} \subset T$$

буде підмножиною індексів точок, що використовуються для розрахунку курсу або швидкості, і утворюють розрахункову матрицю M_S .

Розрахункова матриця M_S , що складається із елементів S , буде динамічною – тобто такою, що змінюється у часі, і її розмірність дорівнюватиме $(h+1) \times 3$. Загальне формулювання розрахункової матриці для будь-якої заданої точки k показане в рівнянні (2.1), де k – точка у послідовності T , що розраховується; E – східна координата (м); N – північна координата (м); t – час приймача (с).

$$M_S(k) = \begin{bmatrix} E_k & N_k & t_k \\ E_{k-1} & N_{k-1} & t_{k-1} \\ E_{k-2} & N_{k-2} & t_{k-2} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ E_{k-h} & N_{k-h} & t_{k-h} \end{bmatrix}_{h+1 \times 3} \quad ; k > h; \quad t_k > t_{k-1} > \dots > t_{k-h} \quad (2.1)$$

Величина (м) послідовності T залежить від швидкості руху та довжини траєкторії, яка прокладена мобільним роботом у полі, причому швидкість і траєкторія пересування визначаються кожною конкретною задачею. Тому величина множини T зазвичай визначається зовнішніми факторами. Величина підмножини S , яка є важливим параметром, що попередньо задається і встановлюється як майбутня траєкторія, на практиці визначально впливає на оцінку напрямку і швидкості з точки зору (позиції) GNSS.

Аналіз послідовності точок T необхідно проводити з точки зору дискретної математики, яка фокусується на математичних структурах, які є дискретними по своїй природі і компоненти яких можуть бути перераховані

цілими числами, складаючи розрахункову множину із кінцевою або нескінченною розмірністю. Множина T , яка визначає траєкторію мобільного робота, може бути збереженою бортовим комп'ютером, і, відповідно, є кінцевою і обмеженою кількістю m елементів. Відповідно, і підмножина S також буде кінцевою і обмеженою кількістю $(h+1)$ елементів. Оцінка *напрямку* і *швидкості* з послідовності точок вимагає роботи із кінцевими різницями, методів дискретних обчислень. *Швидкість* – це двохвимірний вектор, абсолютна величина якого є величиною швидкості руху мобільного робота, а співвідношення між компонентами (координатами) вектора визначає *напрямок руху*. Розрахунок швидкості передбачає використання диференціальних рівнянь, але із дискретними даними необхідно застосовувати різниці рівняння, які заміняють диференціальні, приймаючи різницю між сусідніми членами при апроксимації диференціальних рівнянь. У Декартовій системі координат, яка являє собою плоску двохвимірну площину, де вісь абсцис (одичинний вектор $\vec{i}$) являє собою схід, а вісь ординат (одичинний вектор $\vec{j}$) являє собою північ, вектор положення $\vec{P}_k$ точки k задається рівнянням

$$\vec{P}_k = E_k \vec{i} + N_k \vec{j} \text{ (m)} \quad (2.2)$$

Вектор-функція відстані $\vec{L}(k, \delta)$ у рівнянні (2.3) дає евклідову відстань між двома точками послідовності (підмножини) S , індекси яких розділені кроком обчислення δ . Опорною точкою є k , а інтервал обчислення переміщується в зворотному напрямку на δ позицій у матриці $M_s(k)$. Необхідно звернути увагу на те, що повинні виконуватись умови $\delta < h$, а $\vec{L}(k, \delta)$ є оберненим різницеvim рівнянням вектору положення $\vec{P}_k$. Вектор швидкості для кроку δ задається рівнянням (2.4).

$$\vec{L}(k, \delta) = \vec{P}_k - \vec{P}_{k-\delta} = (E_k - E_{k-\delta}) \vec{i} + (N_k - N_{k-\delta}) \vec{j} \text{ (m)} \quad (2.3)$$

$$\vec{V}(k, \delta) = \frac{\vec{L}(k, \delta)}{t_k - t_{k-\delta}} \text{ (m s}^{-1}\text{)} \quad (2.4)$$

Швидкість руху вперед $V(k, \delta)$ і напрямок руху для точки k можна розрахувати з $\vec{V}(k, \delta)$ за допомогою рівнянь (2.5), (2.6), які містять скалярний добуток векторів та тригонометричну функцію арктангенсу.

$$\begin{aligned} V(k, \delta) &= \|\vec{V}(k, \delta)\| = \sqrt{\vec{V}(k, \delta) \cdot \vec{V}(k, \delta)} \\ &= \frac{\sqrt{(E_k - E_{k-\delta})^2 + (N_k - N_{k-\delta})^2}}{t_k - t_{k-\delta}}; \quad t_k \neq t_{k-\delta} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$H(k, \delta) = \arctg \frac{E_k - E_{k-\delta}}{N_k - N_{k-\delta}}; \quad N_k \neq N_{k-\delta}; \quad m \geq k > \delta \quad (2.6)$$

2.2. Теоретичні передумови проведення польових експериментів

Для відтворення траєкторії руху мобільного робота для експериментальних досліджень в рамках цієї кваліфікаційної магістерської роботи, був використаний звичайний трактор.

Трактор був оснащений двома приймачами GNSS, налаштованими на надання еквівалентних рядків NMEA (таблиця 2.2, 2.3, додаток В). Основним приймачем був диференційний GPS-приймач StarFire iTC™ (Deere&Co, Moline, IL, USA) із можливістю приймання як ліцензованих SF2, так і безкоштовних SF1 сигналів (слід зазначити, що дослід *проводились із безкоштовними SF1 сигналами*). Для даного випадку (безкоштовні SF1 сигнали) статична точність складає 75 см, а точність від проходу до проходу складає ± 33 см. Крім того, вторинний недорогий приймач (Garmin 18x – 5Hz, Olathe, Ks, USA) із заявленою похибкою менше 3 м був також встановлений у кабіні трактора.

Метою проведення експерименту є отримання об'єктивних даних для допомоги у процесі проектування навігації мобільного робота із інформацією GNSS. Зокрема, результати експериментів призначені для ранжування параметрів першого рядку в таблиці 2.1. Оскільки подальшого використання двох приймачів для мобільного робота не передбачається, порівнювалися дані *рядка GGA* (напрямок і швидкість) та *рядка VTG* (напрямок (курс) і швидкість на поверхні землі). Спеціальне програмне забезпечення [28] одночасно фіксувало рядки *GGA* та *VTG* із обох приймачів. Це програмне забезпечення реалізовує декілька процедур фільтрації для підвищення надійності даних GNSS.

Визначення курсу в рівнянні (2.6) є математичним, а не розрахунковим, що на практиці призводить до проблем із стійкістю, коли відбувається ділення на нуль, а оцінка курсу не змінюється плавно у всьому діапазоні $\{0, 360^\circ\}$.

Для порівняння розрахунків курсу із прямими даними, отриманими з повідомлень *VTG*, рівняння (2.6) було посилено додаванням умов, що наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4.

Розширені умови визначення курсу для практичної реалізації рівняння (2.6)

Умова	$H(k, \delta) (^{\circ})$
$E_k \geq E_{k-\delta} \quad N_k > N_{k-\delta}$	$\frac{180}{\pi} \cdot \arctg \frac{E_k - E_{k-\delta}}{N_k - N_{k-\delta}}$
$E_k > E_{k-\delta} \quad N_k = N_{k-\delta}$	90
$E_k \leq E_{k-\delta} \quad N_k > N_{k-\delta}$	$360 - \frac{180}{\pi} \cdot \arctg \frac{E_{k-\delta} - E_k}{N_k - N_{k-\delta}}$
$E_k < E_{k-\delta} \quad N_k = N_{k-\delta}$	270
$E_k \leq E_{k-\delta} \quad N_k < N_{k-\delta}$	$180 + \frac{180}{\pi} \cdot \arctg \frac{E_{k-\delta} - E_k}{N_{k-\delta} - N_k}$
$E_k \geq E_{k-\delta} \quad N_k < N_{k-\delta}$	$90 + \frac{180}{\pi} \cdot \arctg \frac{N_{k-\delta} - N_k}{E_k - E_{k-\delta}}$
$E_k = E_{k-\delta} \quad N_k < N_{k-\delta}$	180

Визначення альтернативних порівнюваних експериментальних даних

Оцінюваний параметр	Досліджувані альтернативні варіанти
1) Тип приймача	Дешевий приймач; Високопродуктивний приймач;
2) Тип рядку NMEA	Напрямок та швидкість на основі GGA-рядку; Курс та шляхова швидкість на основі VTG-рядку;
3) Величина матриці $M_s(k)$ для розрахунку швидкості	$h = 9 \rightarrow \text{Dim}(M_s(k)) = [10 \times 3]$ $h = 5 \rightarrow \text{Dim}(M_s(k)) = [6 \times 3]$
4) Гранична швидкість для визначення курсу	$V = 3$ км/год. $V = 5$ км/год.
5) Величина матриці $M_s(k)$ для розрахунку напрямку руху	Уповільнений рух ($V < 5$) $\rightarrow h=15$ Швидкий рух ($V \geq 5$) $\rightarrow h=31$ Уповільнений рух ($V < 5$) $\rightarrow h=9$ Швидкий рух ($V \geq 5$) $\rightarrow h=21$

Експерименти проводилися у польових умовах декількох фермерських ділянок у трьох різних місцях, одна з яких була незайнятою сільськогосподарськими культурами.

1). Згідно з даними таблиці 2.5, першим досліджуваним параметром є вплив специфікації приймача на кінцеві результати. Зазвичай, високопродуктивні приймачі поведуть себе більш надійно і стабільно, ніж недорогі пристрої, але і у них можуть виникати «зовнішні» похибки, наприклад, блокування або відбиття сигналу. Ця частина експерименту присвячено визначенню такого показника, як HDOP (англ. *Horizontal Dilution of Precision* – зниження точності у горизонтальній площині – див. додаток Г), характерного для даного пристрою, а також кількості супутників, від яких даний пристрій отримує дані [36].

2). Як показано у таблиці 2.1, ключові навігаційні показники, такі як курс (напрямок руху) та швидкість, можуть бути напряму зчитані з рядків VTG, а також розрахованими з положення та часу, які отримуються із рядків GGA. Отже, другим досліджуваним параметром у таблиці 2.5 є питання, чи є обидві оцінки (рядки VTG та GGA) еквівалентними з точки зору точності та

надійності, чи доповнюють вони один одного, чи є надлишковими із інформаційної точки зору.

Розрахунок напрямку руху із рядків GGA залежить від поступальної швидкості мобільного роботу або транспортного засобу, і, відповідно, важливо встановити, який розмір матриці $M_S(k)$ є оптимальним для оцінки швидкості. Так, великий розмір матриці потребує більшої тривалості розрахунків, але дає більшу точність, і навпаки.

3). Третій набір елементів таблиці 2.5 призначений для визначення оптимального розміру матриці визначення швидкості. Стійкість розрахунку курсу (напрямку руху) в залежності від швидкості пересування вимагає адаптувати вихідне рівняння (2.6) до швидкості [18,33].

4). Для того, щоб класифікувати рух мобільного робота відповідно до швидкості необхідно визначити порогову (граничну) швидкість. Оскільки сільськогосподарські мобільні роботи не можуть пересуватися по бездоріжжю дуже швидко, були встановлені два режими швидкості – низька і висока. Четвертий пункт експериментів таблиці 2.5 призначений для визначення, яку швидкість вважати високою, а яку – низькою.

5). Після визначення порогової (граничної) швидкості, останній тип експериментальних даних визначає величину послідовності (множини) точок, яка найкращим чином оцінює курс мобільного робота у реальному часі. Оскільки пряме використання рівняння (2.6) із набором коригуючих умов (таблиця 2.4) може вносити «шуми» у набір результатів розрахунків, в експериментальному транспортному засобі запропонована реалізація комбінації чотирьох *часткових курсів із різною вагою*.

Рис. 2.1 ілюструє концепцію часткових курсів для загальної розрахункової матриці, що складається із h елементів, а рівняння (2.7) надає практичний приклад реалізації алгоритму із часткових курсів при $h = 32$.

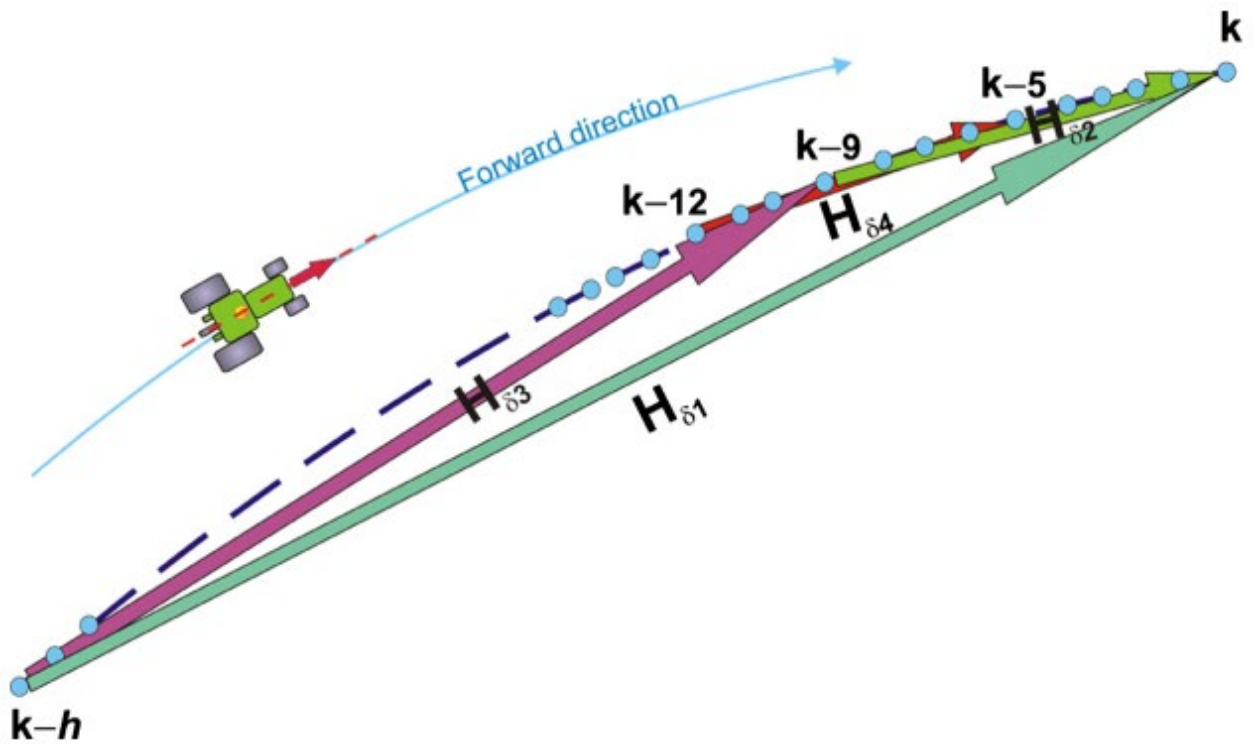


Рис. 2.1. Складові елементи у загальній h – послідовності елементів

$$\left. \begin{aligned} H_{\delta 1}^{def} &\equiv \delta = 31 : [k - 31, k] \\ H_{\delta 2}^{def} &\equiv \delta = 9 : [k - 9, k] \\ H_{\delta 3}^{def} &\equiv \delta = 22 : [k - 31, k - 9] \\ H_{\delta 4}^{def} &\equiv \delta = 7 : [k - 12, k - 5] \end{aligned} \right\} H(x) = \frac{2 \cdot H_{\delta 1} + H_{\delta 4}}{3} \quad (2.7)$$

2.3. Інтерпретація результатів експериментальних досліджень

Порівняння показників, наведених у таблиці 2.5, проводилися у польових умовах при різних умовах різними дослідниками, зокрема [30]. Коротке викладення емпіричних результатів, отриманих в ході проведення польових експериментів, наведені у таблиці 2.6. Також зробити висновки про отримані дані можна за репрезентативними графіками (рис. 2.2 – 2.6).

Експериментальний транспортний засіб був налагоджений на одночасну фіксацію і отримання даних для однієї траєкторії обома приймачами GNSS (Garmin та Star Fire). Однією з цілей проведення описаних

експериментів було визначення впливу низько-точного позиціонування на стан транспортного засобу, особливо на напрямок руху. На рис. 2.2 наведений типовий приклад даних позиціонування, отриманих недорогим приймачем, у порівнянні з оцінками точного приймача GNSS, де похибки коливаються в межах 0...10 м. Вплив цієї неточності позиціонування на розрахунок напрямку руху якісно відображений на рис. 2.2, б.

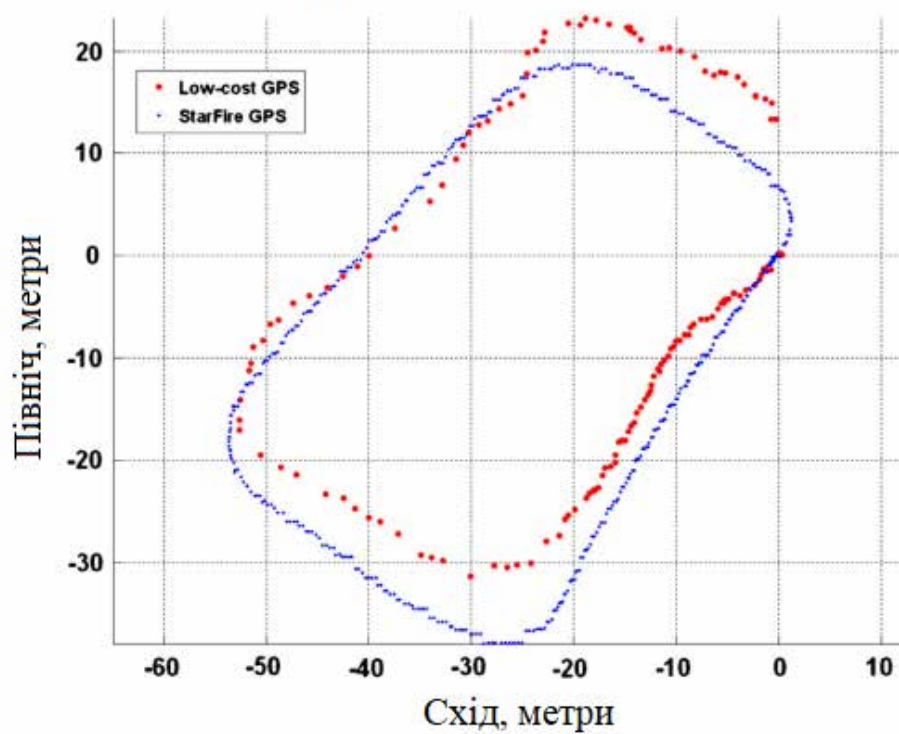
Таблиця 2.6.

Результати польових експериментів

Досліджуваний параметр	Результат експериментальних досліджень	Номер рис., який характеризує висновок
Якість приймача	- Важливий показник, але не спричиняє вирішального впливу на навігаційну стратегію. - Величина показника HDOP (зниження точності у горизонтальній площині) та кількість супутників недостатні для забезпечення стабільності.	Рис. 2.2.
Тип рядку NMEA	- На початку руху (при старті) рядки VTG мають першочергове вирішальне значення, рядки GGA уповільнюють обробку даних. - При виконанні розвороту (повороту) рядки GGA мають першочергове вирішальне значення, рядки VTG дають невірні оцінки і похибки у визначенні курсу.	Рис. 2.3.
Розрахунок матриці ($M_S(k)$) для швидкості	- Позитивні результати при $h = 9$. - При $h < 9$ результати нестабільні. - При $h > 9$ результати дуже повільні.	Рис. 2.4.
Швидкість V переміщення	Результати, які отримані при швидкості 5 км/год. є більш стабільними та точними, ніж при швидкості 2 км/год.	Рис. 2.5.
Розрахунок матриці ($M_S(k)$) для переміщення	Зменшений розмір матриці швидше реагує з незначною затримкою на початку, але не може використовуватись із міркувань стабільності результатів	Рис. 2.6.

Розглянемо отримані експериментальні результати та їх графічні інтерпретації більш детально.

Траєкторія руху транспортного засобу в координатах "Схід-Північ"



Напрямок руху транспортного засобу

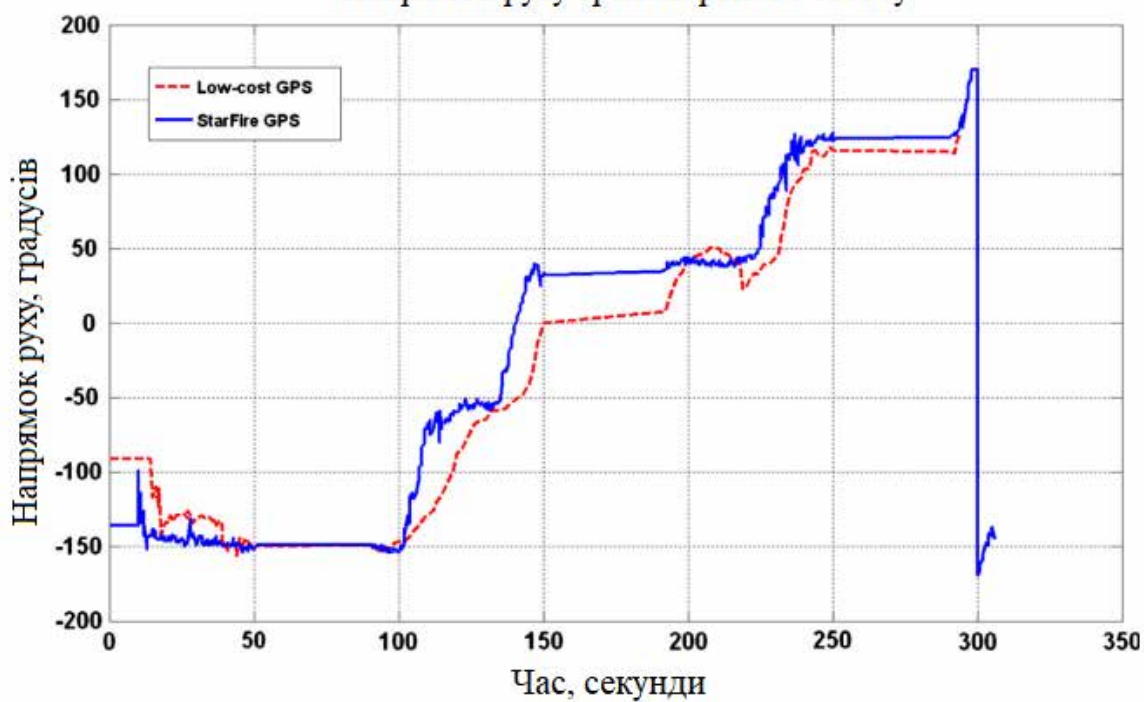


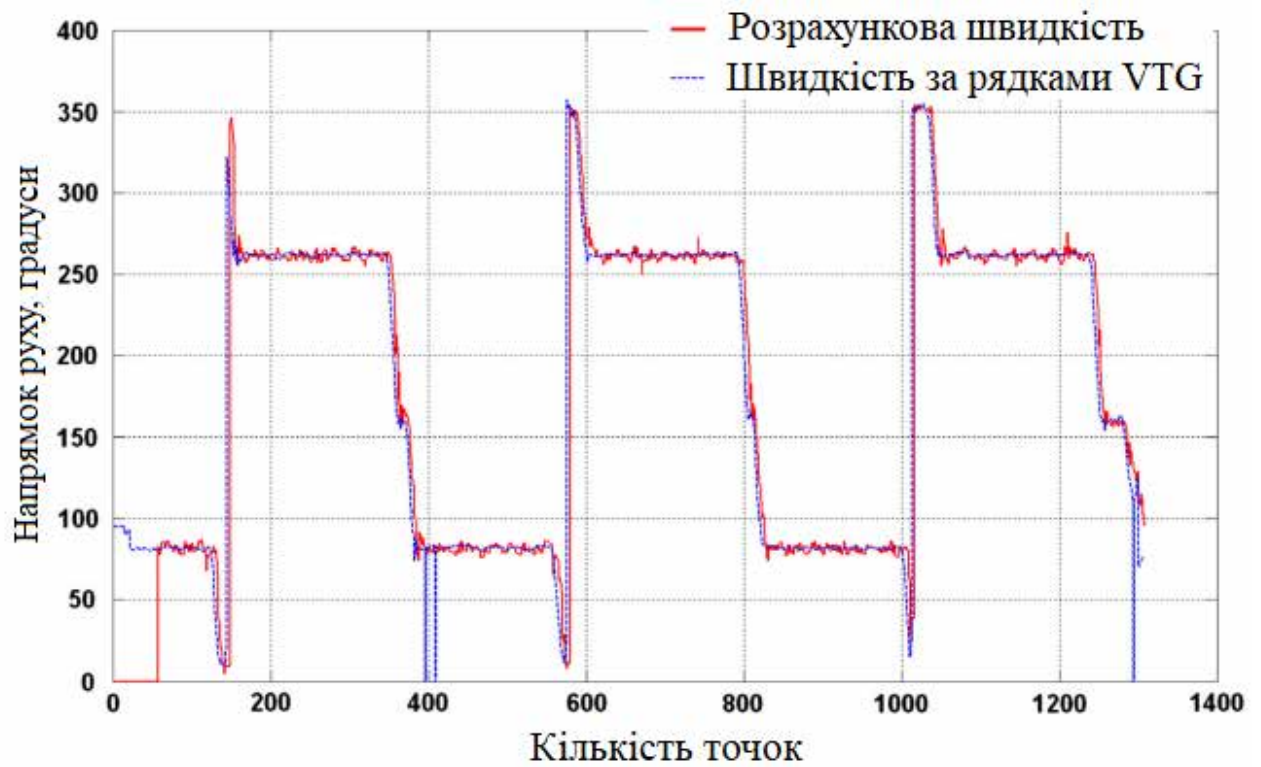
Рис. 2.2. Порівняння характеристик приймачів (Low-cost GPS – недорогий приймач; StarFire GPS – високоточний приймач): частина траєкторії в координатах «схід-північ» (а) і напрямок руху транспортного засобу (б)

Вимірювання курсу та швидкості транспортного засобу – основні навігаційні параметри мобільного робота – одночасно реєструвалися одним приймачем (StarFire) за допомогою різних методів:

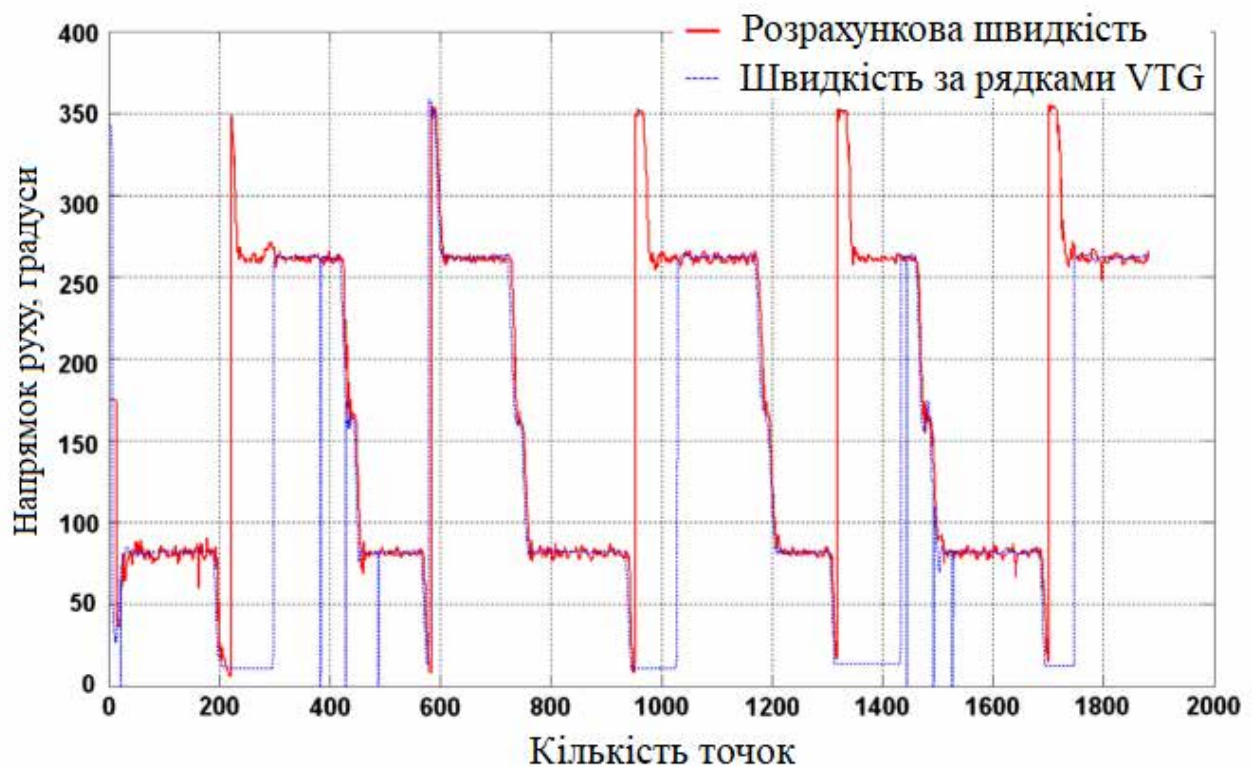
- перший метод – отримання інформації із рядків VTG коду NMEA (курс і доплерівська швидкість);
- другий, альтернативний, метод – курс і поступальний рух, які розраховувались за допомогою послідовності точок, положення яких визначається за рядками GGA коду NMEA.

На рис. 2.3 наведені результати репрезентативних тестів, які проведені у різні дні. На рис. 2.3, а, показана траєкторія, яка описується величиною матриці для розрахунку швидкості $M_5(k)$ $[6 \times 3]$, тобто із 6 рядками, записана у вечірній час; на рис. 2.3, б, - траєкторія із матрицею $M_5(k)$ $[10 \times 3]$, тобто із 10 рядками, зареєстрована наступного дня. Вплив потенціальних локальних ефектів на якість сигналів визначалася шляхом проведення повторних експериментів у різні дні або час доби від ранку до заходу сонця.

Визначення оптимального розміру матриці $M_5(k)$, що використовується для розрахунку швидкості, була ключовою для оцінювання курсу та швидкості за рядками GGA коду NMEA, і як додаткового, оцінювання курсу та швидкості за рядками VTG коду NMEA. На рис. 2.4 показані результати зниження розмірності матриці $M_5(k)$ з десяти до шести точок для оцінки цільової швидкості близько 4 км/год., яка вважається звичайною для мобільного робота [30]. Інформація рядків VTG коду NMEA також використовується в якості наземної довідникової інформації після перевірки їх співпадіння з показами спідометру при борної панелі транспортного засобу. Необхідно звернути увагу, що кількість оцінених точок дещо відрізняється внаслідок різних швидкостей транспортного засобу. Рис. 2.4, а, відображає пробіг із вищою швидкістю, і, як наслідок, містить меншу кількість точок, оскільки частота GPS була незмінною і складала 5 Гц.

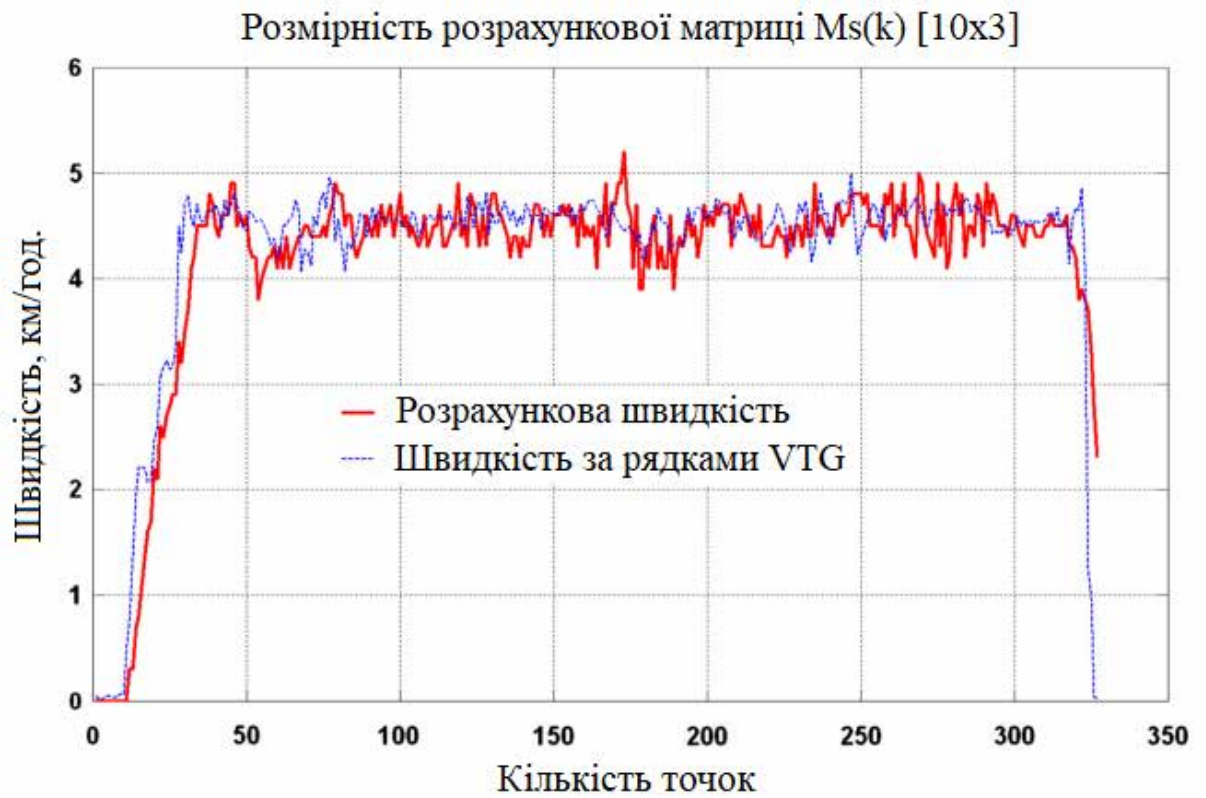


(а)



(б)

Рис. 2.3. Порівняння напрямків руху, отриманих на основі рядків VTG та розрахованих за позиціонуванням на основі рядків GGA: матриця $M_S(k)$ [6x3] (вечірній тест) (а) та матриця $M_S(k)$ [10x3] (ранковий тест) (б)



(a)



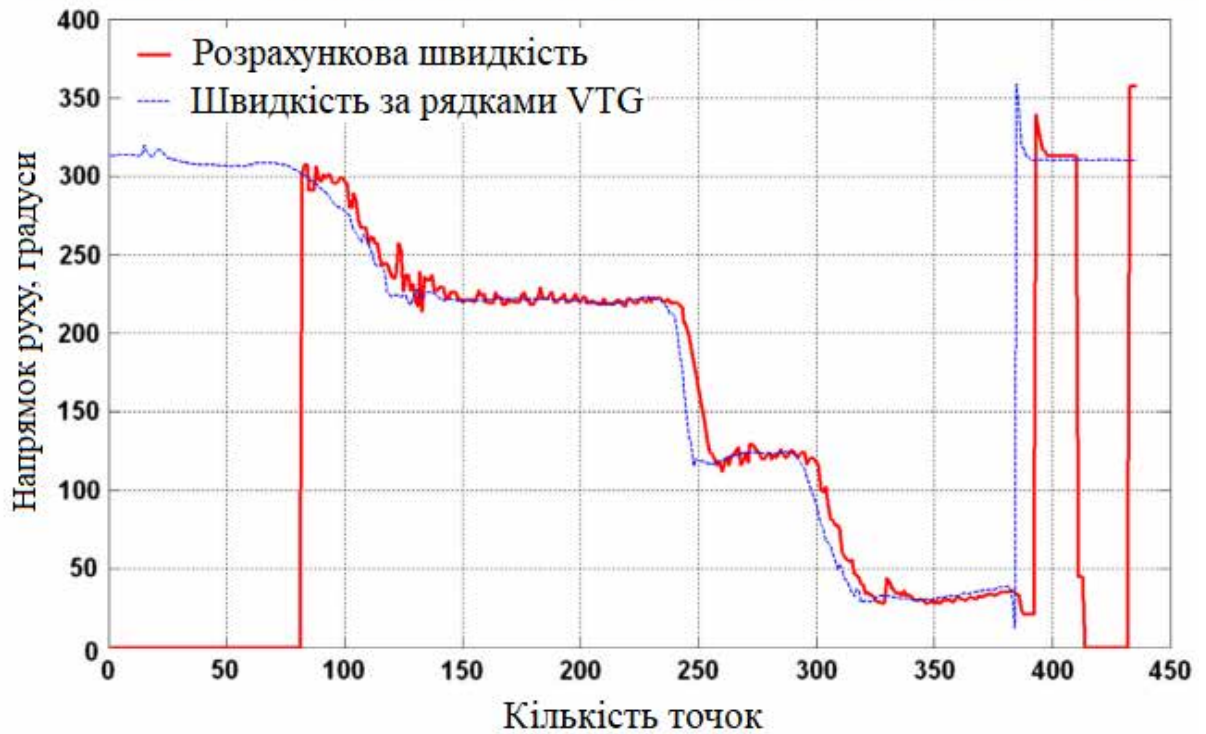
(б)

Рис. 2.4. Вплив розмірів розрахункової матриці $M_S(k)$ на визначення швидкості мобільного робота

Розрахунок напрямку із послідовності точок залежить від швидкості мобільного робота. Діапазон швидкостей, на яких повинні пересуватись сільськогосподарські роботи, зазвичай обмежена діапазоном 0...10 км/год. Для цієї ситуації достатньо розглянути два діапазону швидкостей, а саме «повільний» і «швидкий» рух, при чому критичною точкою є та *межова швидкість*, яка розділяє ці два діапазони. На рис. 2.5 наведені результати тестів, предметом дослідження яких є розмір підмножини S для матриці розрахунку швидкості. Зокрема, показаний вплив зниження межевої швидкості з 5 км/год. (рис. 2.5, а) до 3 км/год. (рис. 2.5, б) на оцінювання напрямку руху для цільової швидкості руху 3 км/год. як такої, що найбільш вірогідна для сільськогосподарського робота. Як і у попередніх випадках, напрям руху за рядками VTG коду NMEA надавався як довідниковий матеріал.

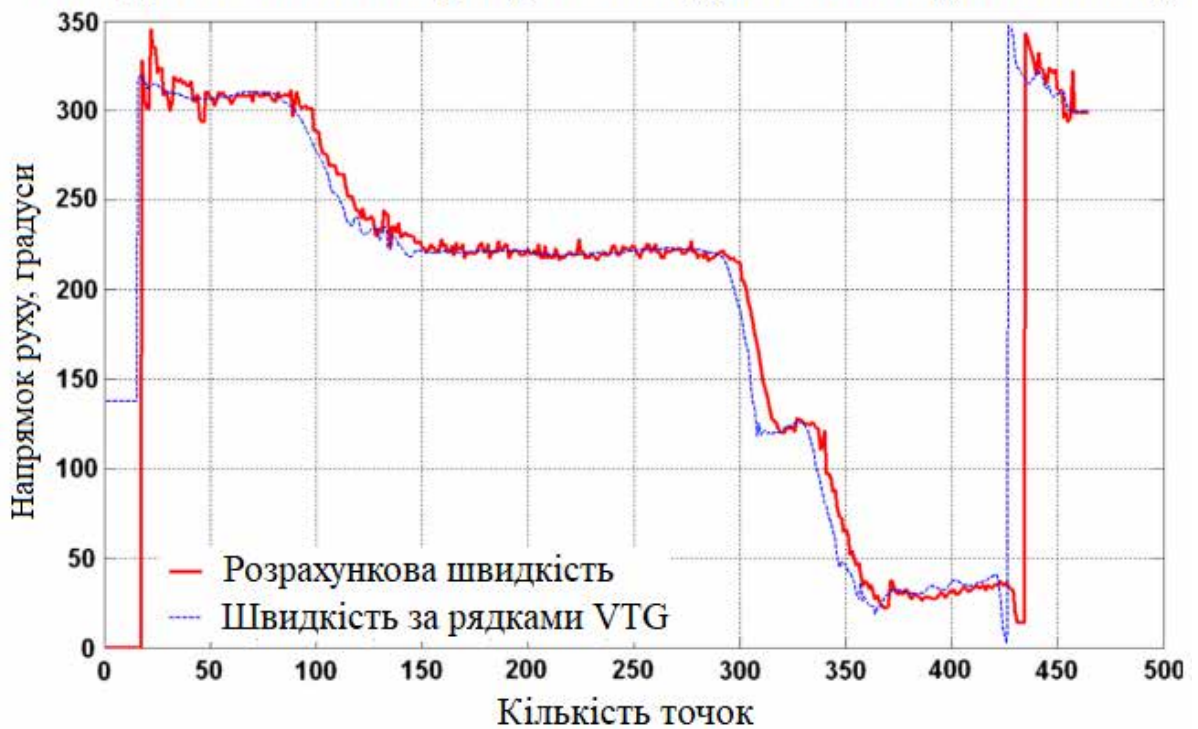
Остання частина експериментів була зосереджена на розмірах розрахункових матриць для оцінювання напрямків руху, які були різними для повільного і швидкого руху із обраною межевою швидкістю 5 км/год. Фактичний розмір розрахункових матриць визначає конкретне визначення частинних курсів $H_{\delta i}$, як показано на рис. 2.1. Польовий досвід показує, що розміри матриці, зазначені у таблиці 2.5, надають достатній опис для розглянутого діапазону швидкостей транспортного засобу і частоти GNSS 5 Гц. На рис. 2.6 показаний напрямок руху, розрахований при швидкості руху 4 км/год., а розрахункова матриця складається із 22-ти точок для швидкого руху і 10-ти точок – для повільного. Цей графік можна порівняти із графіками (рис. 2.2, 2.3 і 2.5), де реалізовані матриці з 32 та 16 точок для визначення напрямку руху.

Швидкість за панеллю приладів 3 км/год., межева швидкість 3 км/год.



(a)

Швидкість за панеллю приладів 3 км/год., межева швидкість 5 км/год.



(б)

Рис. 2.5. Вплив межевої швидкості V_t на розрахунок курсу мобільного робота:

$V_t = 3$ км/год. (a); $V_t = 5$ км/год. (б)

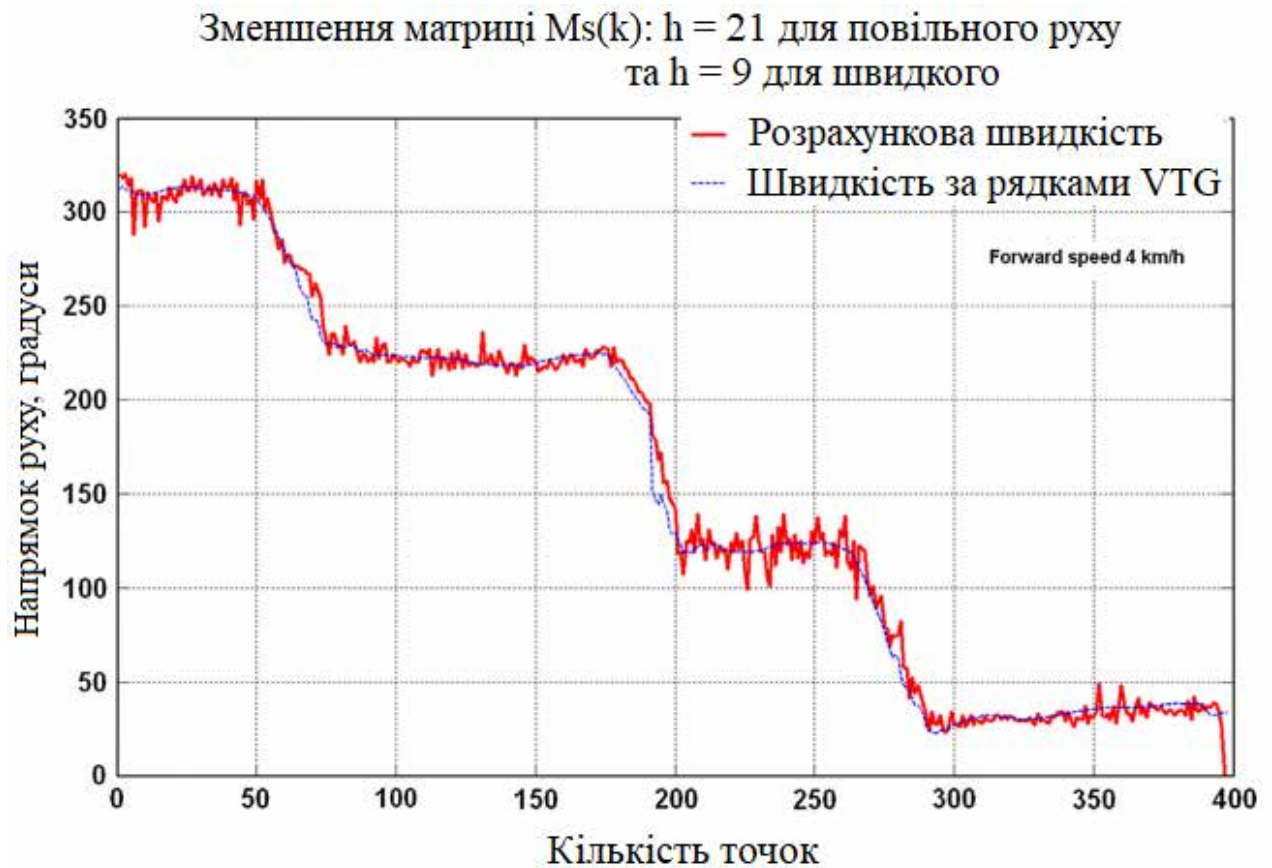


Рис. 2.6. Напрямок руху, розрахований при $h = \{21, 9\}$ та швидкості 4 км/год.

2.4. Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень

Порівняння приймачів призвело до очікуваних результатів, таких як погіршення траєкторії, які викликані значними похибками позиціонування. Водночас, були виявлені цікаві явища. Зокрема, траєкторія приймача StarFire на рис. 2.2, а, показує дрейф із сходу на захід, відзначений також в дослідженнях [29], а показники якості, кількість супутників та показник HDOP були на здивування було краще у недорогого приймача, що на практиці означає, що вбудовані індекси не завжди є абсолютно надійними і мають бути зваженими для кожного окремого приймача (недорогі приймачі «не знають» про свої неточні дані на виході).

Крім того, на протязі тривалих періодів роботи обох приймачів були виявлені окремі рядки пошкоджених даних, тому завжди необхідно

враховувати ризик спотворення сигналів, а також блокування сигналів під впливом зовнішніх умов, таких як високих дерев або оточуючих будівель. Тим не менше, середня продуктивність високоякісного приймача є значно вищою, про що свідчить оцінка напрямку руху системи StarFire (рис. 2.2, б). За цими результатами вибір приймача необхідно здійснювати не тільки за високою якістю приймання сигналу, але і за показниками економічної ефективності. Складний приймач не завжди може забезпечити стабільність в роботі через променеві відбиття сигналів, сигнальні перешкоди, блокування сигналу і т.п., що призведе до проблем із навігацією мобільного робота. Тому, окрім стабільності отримання супутникових сигналів, необхідно передбачити процедури фільтрації сигналів і перевірки їх якості в конструкції самого мобільного робота.

Той факт, що напрямок та швидкість можуть бути отримані з одного і того ж самого приймача від двох альтернативних джерел і з використанням різних методів (рядків VTG та рядків GGA протоколу NMEA 0183), збільшує зручність використання GNSS для навігації робота, оскільки курс і швидкість є основними параметрами для налагодження навігаційних стратегій. Питання лише у тому, чи є сенс розраховувати напрямок руху та швидкість із послідовності точок, якщо вони вже є доступними у рядках VTG (рис. 2.1). Для того, щоб знайти відповідь на це питання, були пройдені кілька траєкторій із одночасною реєстрацією напрямку руху і швидкості за обома названими методами. Експериментальне поле складалося з паралельних рядів виногородників (відстань між рядами – 3 м, довжина ряду – 130 м) із постійним курсом 83° , коли мобільний робот рухався на схід (прямий шлях), та курсом 263° , коли він рухався на захід (зворотний шлях). На рис. 2.3, а, наведені результати вечірнього тесту, де вимірювання за рядками VTG заблокували правильний курс на початку руху, коли розрахунки напрямку руху мали затримку в часі і не дали правильний курс до того моменту, доки не було оброблено 50 точок. Однак курс за рядками VTG дав помилкові оцінки в районі точки 400, що співпало із розворотом мобільного робота на зворотній

шлях. Ретельний огляд точки 400 показує зменшення кількості супутників з 9 до 6 при одночасному збільшенні показника HDOP з 1,2 до 2,7. Ці значення індексів вважаються прийнятними і не повністю виправдовують падіння курсу на розворотній смузі. Рис. 2.3, б, відображає результати більш тривалого тесту, проведеного за тих самих умов на наступний день, із іншими атмосферними умовами і ефемеридами. Ці тести показали, що оцінки за рядками GGA є більш стабільними, ніж оцінки за рядками VTG. Ці результати не є неочікуваними, оскільки залежність точності GNSS від напрямку руху супутників була досліджена і описана в експериментах [35] та згідно стандарту X587 (ASABE, 2010) [19], втрата сигналу найчастіше зустрічається у сільському господарстві на межі полів. Відповідно цьому, вказаний Стандарт рекомендує проводити тести динамічного повторного захвату сигналу на розворотах стандартизованих курсів руху, повідомляючи точність напрямку руху та швидкості окремо для прямолінійних та криволінійних сегментів. Збої, виявлені на поворотах на межі поля із напрямком VTG (курсом) і швидкістю, викликають необхідність додаткового оцінювання поточного навігаційного положення за рядками GGA, і обґрунтовують аналіз розміру матриці $M_S(k)$ для розрахунку напрямку руху і швидкості, а також вибору межевої швидкості між повільним і швидким рухом, що розглядається у подальших абзацах.

Після обґрунтування доцільності та переваг розрахунку навігаційних параметрів із послідовності точок траєкторії, необхідно визначити величину використовуваної в розрахунках підмножини S , оскільки вона впливатиме на кінцеві результати. Величина розрахункової матриці буде різною для повільного і швидкого пересування, причому швидкість є особливо важливою, оскільки вона визначає величину матриць оцінки переміщення. Чисельні тестування показали, що розрахункова матриця із десятьма рядками ($h = 9$) є такою, що дозволяє отримувати прийнятні результати. Початкову затримку можна усунути за допомогою зменшення розмірності матриці, що дає змогу частіше здійснювати розрахункові цикли. Для перевірки такої

можливості були оцінені швидкості зі зменшенням матриці ($h = 5$) (рис. 2.4). Для звичайних швидкостей (наближених до 4 км/год.) показує, що розмірність розрахункової матриці $M_S(k)$ $[10 \times 3]$ ($h = 9$) дає більш стабільні результати (рис. 2.4, а), ніж матриця $M_S(k)$ $[6 \times 3]$ ($h = 5$) (рис. 2.4, б).

Розрахунок курсу вимагає використання різних рівнянь залежно від швидкості руху, що на практиці передбачає вибір трьох основних параметрів: межової швидкості, яка відокремлює повільне пересування від швидкого, та розмірів розрахункових матриць для кожного типу руху, що, в свою чергу, призводить до диференційованого визначення частинних курсів, як це зображено на рис. 2.1. Оскільки швидкість 4 км/год. для сільськогосподарського мобільного робота вважається оптимальною, дві граничні швидкості 3 км/год. та 5 км/год. були проаналізовані як такі, що представляють відповідно повільний і швидкий рух. Рис. 2.5 показує, що швидкість 5 км/год. показує більшу стабільність (рис. 2.5, б), особливо при ініціалізації, коли можуть виникати значні затримки (рис. 2.5, а). Для обох оцінок існує невелика затримка отримання значень рядків VTG, які використовуються як додаткова перевірка для вимірювання стабільності розрахованого курсу. Послаблення шумів при розрахунку курсу вимагає збільшення величини матриць, що у підсумку призводить до значних затримок в розрахунках, в основному при згаданому порівнянні з оцінками значень рядків VTG.

Прийнятні результати були досягнені із послідовностями з 32 елементів при швидкому русі та з 16 елементів при повільному. Проводилися дослідження, коли кількість елементів матриці опису швидкого руху була знижена до 22, а кількість елементів матриці повільного руху знижена до 10. Рис. 2.6 демонструє, що для звичайної швидкості 4 км/год. зменшення кількості елементів для оцінки напрямку руху призводить до менш стабільних результатів порівняно з рис. 2.2, 2.3 і 2.5, де напрямки руху розраховувалися за допомогою більших матриць.

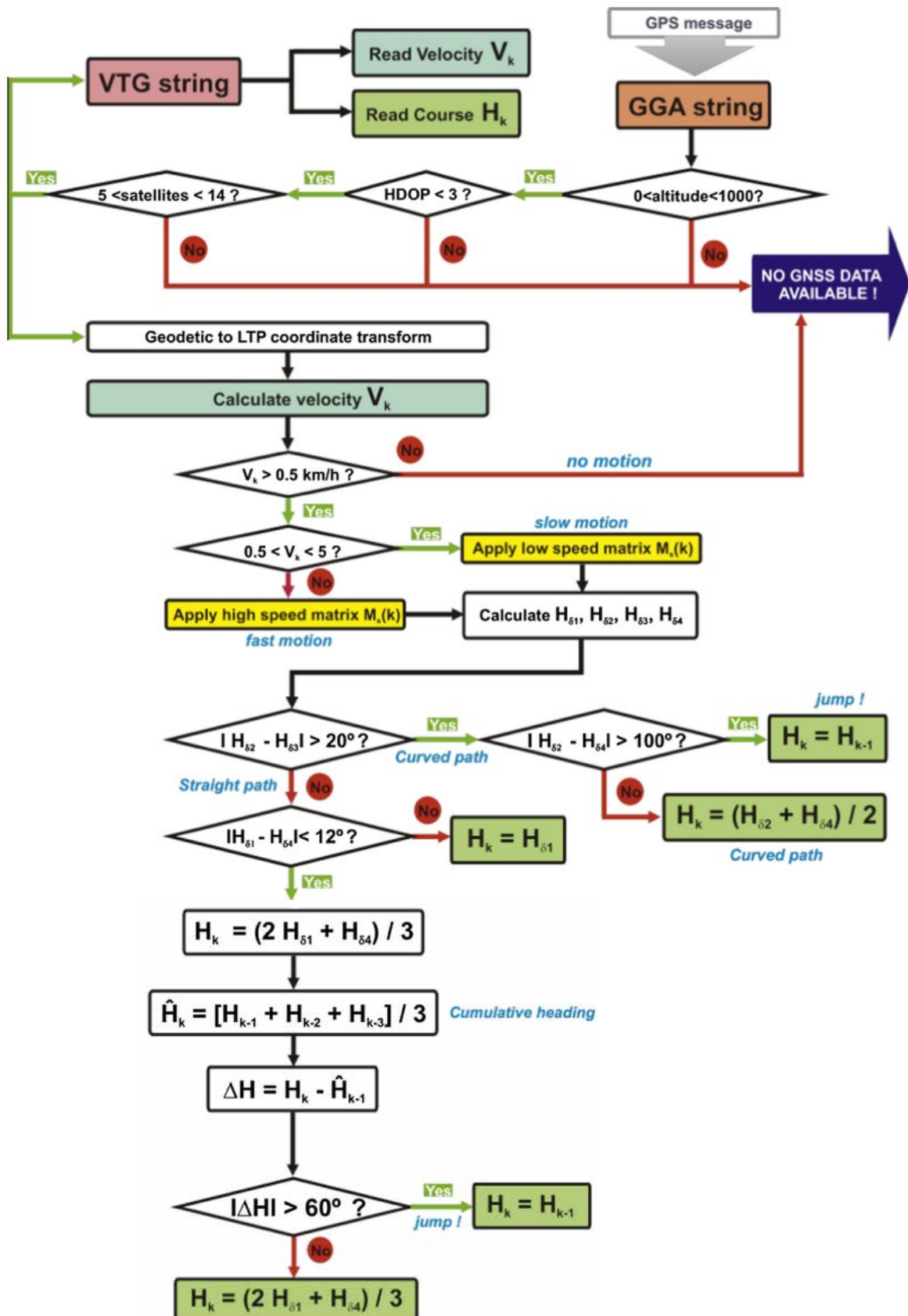


Рис. 2.7. Блок-схема алгоритму реалізації GNSS для мобільного роботу або транспортного засобу

Результати, отримані при проведенні експериментів і узагальнені в таблиці 2.6, можна реалізувати при програмуванні сільськогосподарського мобільного робота за допомогою алгоритму, наведеного на блок-схемі (рис. 2.7). Зауважимо, що у даному алгоритмі швидкості менші за 0,5 км/год. ігноруються як шум, а верхня межа швидкості обмежується значенням 5 км/год. Ця блок-схема показує практичне значення ролі GNSS у розробці навігаційних стратегій. Хоча приведена методика може бути використана для широкого спектру сільськогосподарських мобільних роботів середнього розміру, використання різних типів приймачів і роботів різних розмірів і призначень можуть вимагати інші комбінації рядків GNSS або коригування методики визначення розміру розрахункової матриці.

2.5. Висновки по 2 розділу

Дослідження цього розділу були спрямовані на окреслення ролі GNSS в алгоритмах керування сільськогосподарськими мобільними роботами із точки зору навігації. Результати показали, що інтеграція GNSS у системи керування такими роботами завжди доцільна, але не є самодостатньою; вона вимагає ретельної фільтрації даних таким чином, щоб некоректна інформація не потрапляла у цикл обробки навігаційного обчислюваного центру робота.

Точність приймача GNSS позитивно впливає на мобільність роботу, але вона не може гарантувати довготривалу стабільність на сільськогосподарських полях, де чисельні відбиття сигналу і можливі його блокування не можна передбачити. В результаті по-перше, дані, отримані за допомогою GNSS, вимагають постійної додаткової перевірки, і, по-друге, виникає необхідність використання додаткових зовнішніх датчиків і пристроїв. Перше передбачає одночасний аналіз рядків VTG и GGA, друге – додаткове оснащення мобільного робота або транспортного засобу

компасами, радарами, пристроями оптичного зору і різноманітними датчиками.

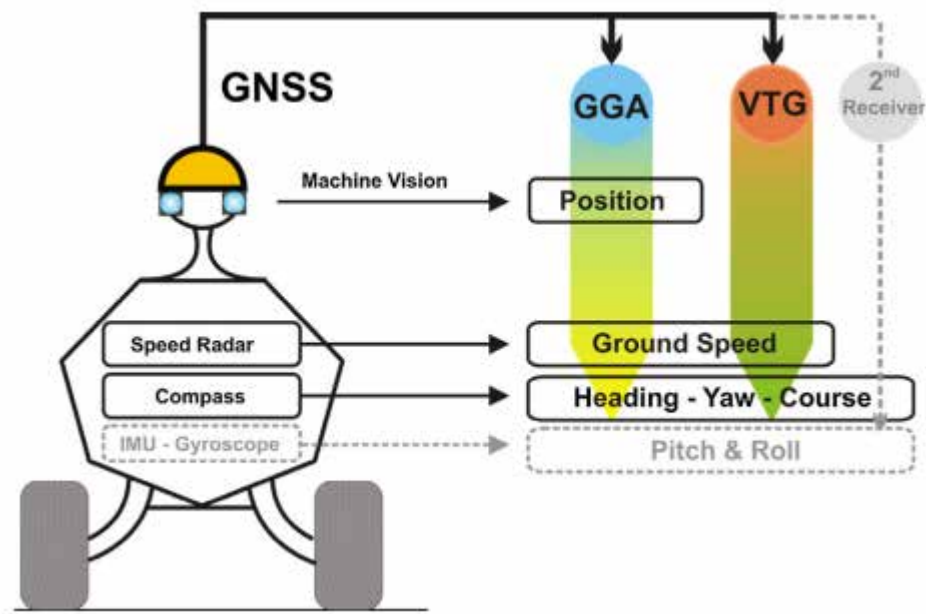


Рис. 2.8. Роль GNSS в навігаційних системах сільськогосподарських мобільних роботах

Проведені експерименти показали, що інформація VTG и GGA є такою, що доповнює одна одну, а не заміщує одна одну. Інформація про курс і швидкість, яка отримується з рядків VTG є точною при початку руху, але стає ненадійною на поворотах на краю поля, де інформація з рядків GGA є прийнятно достовірною. Тим не менше, для отримання точного напрямку руху (курсу) і швидкості із послідовності точок, яка визначена рядками GGA, необхідно визначитися із основними параметрами алгоритму розрахунку. Зокрема, величину розрахункової матриці і стратегію виводу стабільних оцінок із послідовності точок, які визначають шлях мобільного робота, які мають важливе значення для найбільш ефективного використання GNSS.

В цілому, GNSS є ключовим компонентом сільськогосподарських мобільних роботів для підвищення їх економічної ефективності за рахунок отриманої від приймачів інформації. Концептуальна схема (рис. 2.8) підсумовує роль GNSS для розробки сільськогосподарських роботів із додатковою оцінкою критичних навігаційних параметрів. Пунктирні лінії

показують потенційне розширення навігаційної системи за умови підтвердження показниками економічної ефективності.

Чи можуть недорогі приймачі GNSS допомогти у розробці економічно ефективних сільськогосподарських роботів – питання, в якому ключовим моментом є їх надійність, а не вартість.

Отже, за умов надійної роботи, ретельного визначення кінцевої мети розробки мобільного робота, впровадження необхідних стандартів безпеки, із подальшим визначенням показників економічної ефективності, впровадження RTK - пристроїв навіть з абонентською платою призведе до отримання позитивних результатів. Інтелектуальне впровадження GNSS призведе до інтелектуальної поведінки сільськогосподарських мобільних роботів.

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ІНФОРМАЦІЇ ТА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ПРОВЕДЕННЯ АГРОТЕХНІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ

Якість харчових продуктів і захист прав споживачів час є актуальними питаннями сьогодення, про що свідчить зростаюча зацікавленість споживачів до виробництва і реалізації овочевої продукції на споживчому ринку.

Внаслідок зростаючого попиту на продовольство і значного впливу хвороб рослин на глобальні щорічні втрати врожаю, використання хімічних речовин у сільському господарстві залишається обов'язковим заходом для захисту сільськогосподарських культур від комах, шкідників та грибків різного походження. Застосування агрохімікатів є небезпечною операцією із високим впливом на здоров'я споживачів і навколишнє середовище. Часто, використані не за правилами із значними ризиками для споживачів, залишки агрохімікатів можуть бути знайдені у продуктах харчування, кормах, водоймах і сторонніх організмах, для яких ці хімікати не призначені [20].

Традиційна механізація розпилювання, яка використовується наземною технікою, має важливе значення для зниження шкоди для людини і навколишнього середовища, а також для продуктивності праці. Однак для зменшення впливу агрохімікатів на оточуюче середовище необхідними є більш дієві та ефективні методи застосування [34]. Сільськогосподарське повітряне розпилювання з літаків або гелікоптерів, яке часто вважається економічним та швидким методом використання агрохімікатів, насправді відомо тим, що охоплює великі поля без суттєвого фізичного впливу на врожайність або структуру ґрунту і призводить до великого передозування продукту розпилювання і втрат внаслідок низької точності розпилювання [26].

Агрохімікати вважаються токсичними продуктами, що впливають на безпеку продуктів харчування і на екосистеми. Побоювання, що внаслідок цього виникають, знаходять відображення у політичних ініціативах,

законодавчих нормах і зростаючому попиту на *екологічно сумісні методи управління*. Розробка інноваційних інтелектуальних розпилювань із змінним дозуванням агрохімікатів призведе до значного внеску до економічних та екологічних переваг, що визначають їх впровадження. Такі операції, у поєднанні із системами підтримки прийняття рішень, повинні допомогти фермерам застосовувати контрольні обробки, зменшити втрати продукції, знизити витрати енергії та людино-годин праці, діяти у необхідний час у необхідному місці. Зокрема, використання гербіцидів, специфічних для конкретної ділянки, дозволяють скоротити витрати на 50% [22]. Однак висока вартість технології точного розпилювання і пов'язана із цим складність цих систем призводить до того, що фермери обирають повну хімічну обробку.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), за допомогою яких зокрема можна отримувати візуальну інформацію дистанційно, нещодавно привернули увагу для операцій по розпилюванню пестицидів [14]. Вони можуть пересуватись у просторі за складними схемами, літати на малих висотах, адаптуватися до різноманітних ландшафтів, виконувати вертикальні зліти і посадки, а також виконувати малооб'ємну та специфічну для ділянки обробку із низьким ризиком для здоров'я операторів [31]. Незважаючи на правила і обмеження на повітряне розпилювання агрохімікатів у Євросоюзі [21], багатороторні БПЛА досліджуються для розпилювання в усьому світі, і вони є найкращими кандидатами на заміну звичайних літальних апаратів.

Дослідження, які викладені у подальшому матеріалі, присвячені такій культурі, як **артишок**, популярність якої останнім часом дуже зростає в Україні завдяки своїм корисним властивостям, особливо при лікуванні захворювань печінки, нирок, шлунково-кишкового тракту та ін.

Садовий артишок (*Cynara cardunculus* subsp. *scolymus* (L.), *англ.* Globe artichoke), також відомий як посівний, або колючий артишок – «зимовий король», як називають його італійці, «арді шаукі» - називають його носії арабської мови. Рослини артишоку зазнають нападу численних шкідників і комах, таких як тля, трипси, листові мінери і т.п., які вимагають використання

агрохімікатів, які легко застосовуються за допомогою БПЛА [32]. Планування операцій з розпилювання за допомогою БПЛА, яке виконується шляхом визначення меж цільової ділянки, висоти польоту на рівнем землі, швидкості, ширини розпилювання, витрати пестицидів легко використати для таких культур, як рис, кукурудза і пшениця, але не для таких культур, як артишок. Розподіл розпилювання по ділянці, необхідний для зменшення кількості хімічного продукту, яка розпилюється на поверхню ґрунту, вимагає **прив'язки до кожної рослини**, яку можна отримати за допомогою станції RTK GNSS або за допомогою візуального зображення. Швидкий і оперативний підхід має вирішальне значення для оптимізації операцій розпилювання, скорочення загального часу операцій і виконання точного розподілу по цільовим рослинам.

Пірамідальна мережа функцій (FPN) є особливим видом нейронної мережі (НМ), і алгоритм, який пропонується, являє собою версією із можливістю налагодження, яка працює як *детектор одиночних знімків* (SSD). Мережева основа НМ використовується для отримання інформативних ознак, які будуть використані класичною FPN для виявлення. Ці алгоритми працюють в одному прямому проходженні мережі, одночасно визначаючи місцезнаходження і класифікуючи об'єкти. Основна концепція цих мереж має на увазі використання сітки, яка ділить зображення на комірки, що відповідають за виявлення об'єктів у цій області зображення, і використання апріорних даних і наперед визначених блоків, відповідальних за виявлення об'єктів певного розміру і форми у комірці сітки. В FPN основна структура складається із шляху знизу нагору для знаходження положення на зображенні. Поєднання цих двох фаз дозволяє мережі виявляти об'єкти різних масштабів із гарним рівнем точності визначення місцезнаходження за короткий час навчання.

У цій роботі продуктивність FPN порівнюється із добре відомою мережею YOLOv5. **YOLO (You Only Look Once)** – це алгоритм виявлення об'єктів, розроблений у 2016 році на основі регресії: замість вибору тієї

частини зображення, що цікавить, він передбачає класи і обмежуючі рамки за один запуск алгоритму. YOLOv5 приблизно на 88% менше, ніж YOLOv4 (27MB проти 244 MB), на 188% швидше YOLOv4 (140 FPS проти 50 FPS) при майже однаковій точності.

Мережі на основі глибокого навчання зазвичай використовуються у сільськогосподарських сценаріях для підрахунку і виявлення рослин і рядів посадок, що має вирішальне значення для моніторингу здоров'я рослин або виявлення прогалин у посадках після процесу висадження [24]. Включення багаточасових зображень БПЛА може значно підвищити точність і компенсувати низьку спектральну роздільну здатність зображень RGB. Такий підхід може бути застосованим до різних культур для підрахунку рослин, моніторингу здоров'я культур, оцінювання врожайності, планування оптимізованого розподілу добрив, пестицидів та інших ресурсів у межах керування фермерським господарством.

3.1. Вихідні дані досліджень

На рис. 3.1 наведений загальний вигляд об'єкта дослідження – поля з вирощуваною культурою – артишоком. Дослідження проводилися після фенологічного розвитку культури із двохтижневою частотою у першій частині росту і одним місяцем в останній фазі, загалом тривали 7 днів (таблиця 3.1, 3.2). Дистанційне отримання зображень проводилося за допомогою БПЛА DJI Phantom 4 Pro (DJI, Shenzhen, China) (рис. 3.2), оснащеного датчиком CMOS 1" sensor із розподільчою здатністю 21 мегапіксель, кутом огляду (Field of View (FOV)) 84 градуси, 8,8 мм/24 мм (еквівалент 35 мм), автофокусом f/2.8-f/11 (1 m to ∞).

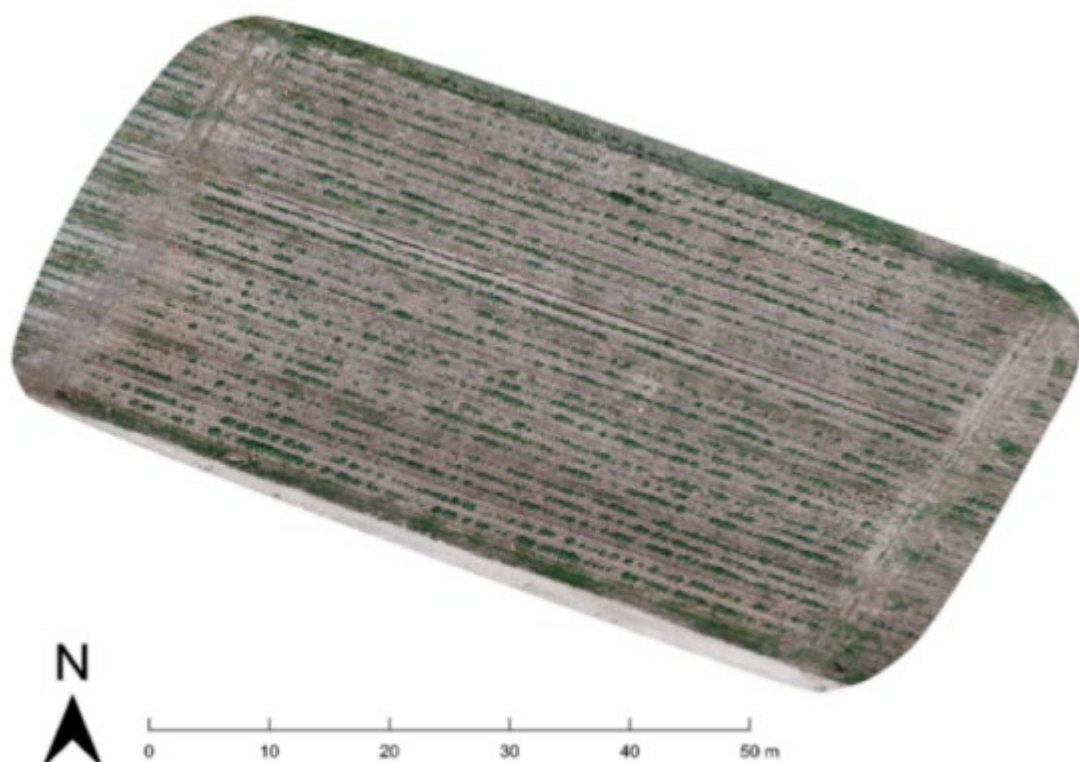


Рис. 3.1. Досліджуване поле із артишоком



Рис. 3.2. БПЛА DJI Phantom 4 Pro

Для запису географічних координат 12 наземних контрольних точок, для отримання високоточних ортофотопланів і виконання процесу моніторингу часу використаний модуль RTK GNSS Reach RS+ (Emlid, Budapest, Hungary) (рис. 3.3), підключений до системи корекції NTRIP.



Рис. 3.3. Модуль RTK GNSS Reach RS+

Декілька знімків артишоку на різних стадіях росту були отримані RGB - датчиком DJI Phantom 4 Pro у перпендикулярному до землі положенні. Автоматичні польоти виконувалися із використанням пілотного додатку DJI на базі Android, яке здатне гарантувати виконання стандартизованих фотографій і відео захвату шляхом дотримання постійного шляху на визначеній висоті над рівнем землі (Above ground level (AGL)). Усі польоти для створення ортофотопланів виконувалися на висоті 15 м AGL для отримання високоякісних зображень (232 фотографії для кожного польоту). Тривалість польоту – 10 хв. 21 с, коефіцієнт бокового перекриття 70%, коефіцієнт фронтального перекриття – 80%. Відстань вибірки на землі (ground sampling distance (GSD) складала 0,41 см/піксель. Політ на 80 м був здійснений для перевірки продуктивності нейромережі. Погодні умови були, переважно, із сонячним ясним небом; різні умови освітленості у наборі фотографій були переважно внаслідок змінного нахилу сонячних променів протягом вегетаційного періоду.

У таблиці 3.1 узагальнені деталі набору даних і польотних даних.

Узагальнені деталі набору даних і польотних даних експерименту

Польотні дані		Дані експерименту	
Довжина польотного маршруту, м	667	Загальна тривалість дослідження, діб	7
Висота польоту над рівнем ґрунту (AGL), м	15	Кількість фото, знятих за добу, шт.	232
Тривалість польоту, хв. с.	10.21	Загальна кількість відзнятих фото, шт.	1624
Курсовий кут, град.	51	Модель сенсора – DJI Phantom 4 Pro RGB CMOS 1"	
Швидкість зльоту, м/с	55	Кут огляду (FOV), град.	84
Швидкість польоту, м/с	59	Довжина фокусу лінзи 8,8 мм /24 мм	
Досліджена площа, м ²	4586	Ширина зображення, пікс.	5472
Коефіцієнт бокового перекриття, %	70	Висота зображення, пікс.	3648
Коефіцієнт фронтального перекриття, %	80	Відстань вибірки на рівні ґрунту (GSD), см./пікс.	0,41

3.2. Алгоритм роботи мережі виявлення (розпізнавання) рослин

Розглянемо структуру мережі, яка використовується на етапі виявлення рослин, тобто *пірамідальну мережу функцій* (FPN).

На сучасному етапі існує широкий спектр можливих мереж для виявлення, кожна з яких має свої переваги залежно від тієї задачі, яка вирішується. В нашому випадку використання, який передбачає використання БПЛА із можливістю польоту на різних висотах, при виборі мережі необхідно враховувати її здатність виявляти об'єкти у різних масштабах. Ця особливість є головною характерною ознакою, що має бути реалізована для цього дослідження. Алгоритм реалізації детектора об'єктів (рис. 3.4) виконаний за наступною схемою:

1. Попередня обробка даних.
2. Побудова мережі.
3. Навчання мереж.

3.1. Навчання FPN.

3.2. Навчання нейромережі YOLOv5.

4. Тестування мережі із оцінкою продуктивності роботи.

5. Автономне розпізнавання об'єктів.

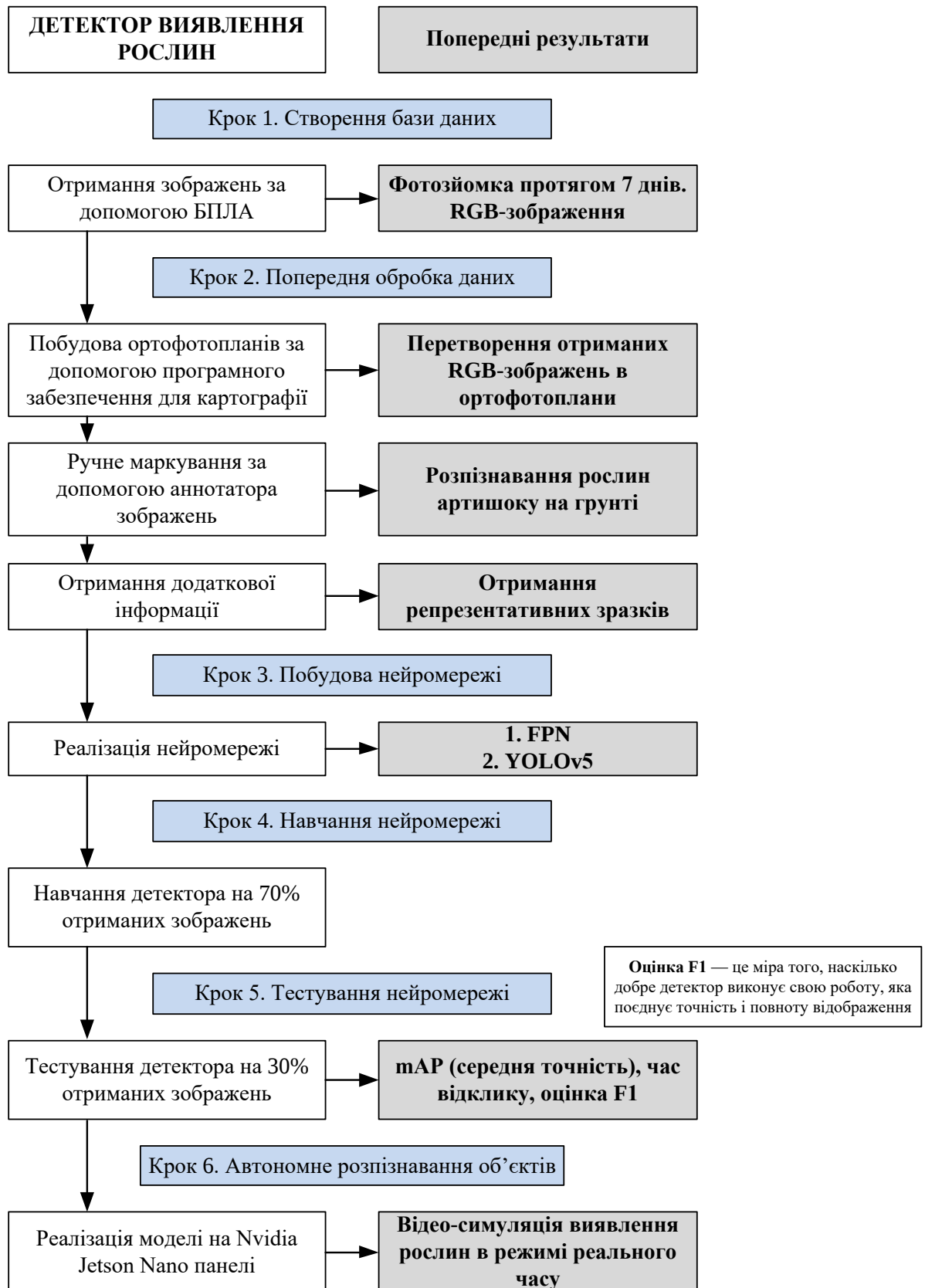


Рис. 3.4. Блок-схема роботи мережі виявлення рослин із можливістю навчання із частковим виводом проміжного результату

3.2.1. Попередня обробка даних

Фаза попередньої обробки даних є загальною для обох нейромереж. Після завершення фази отримання візуальних RGB-зображень від БПЛА, що була отримані під час польоту, вони були об'єднані в єдине ортотранформоване зображення із високою роздільною здатністю, яке називається ортофотопланом (рис. 3.5). Побудова ортофотоплану було виконано за допомогою **OpenDroneMap** – програмного середовища для обробки зображень із БПЛА, що дозволяє створювати ортофотоплан із групи окремих зображень, що мають геоприв'язку. Було створено 7 ортофотопланів, що відповідає польотам БПЛА протягом 3-х місяців, і з кожного з них був вилучений набір даних для навчання мережі. Після початкової фази ручного маркування, здійсненого із використанням програмного середовища VGG Image Annotator (VIA) для отримання істинності даних, генерування набору даних було виконане шляхом випадкового обрізання ортофотопланів і використання алгоритмів доповнення даних (обертання, розмиття, насичення та ін.) до отриманих зображень для отримання репрезентативних вибірок. Після цього отриманий набір даних був розділений на навчальні і тестові набори і наданий в якості початкових даних для мережі виявлення і розпізнавання рослин.

3.2.2. Будова мережі FPN

Що стосується реалізації мережі, то початковими параметрами є такі:

- розмір сітки: $(4 \times 4, 8 \times 8, 16 \times 16)$ px²;
- розмір апріорних даних: $(1 \times 1, 16 \times 9, 9 \times 16)$ px²;
- розмір вхідних даних: (512×512) px²;
- всього параметрів: 2,8 млн.

(px – розмір одного пікселя складає 5 мм).

Програмне забезпечення: Python, 3.10.5 opencv-python 3.4.11.43, NumPy 1.21.2, SciPy 1.21.2., matplotlib 3.4.3.

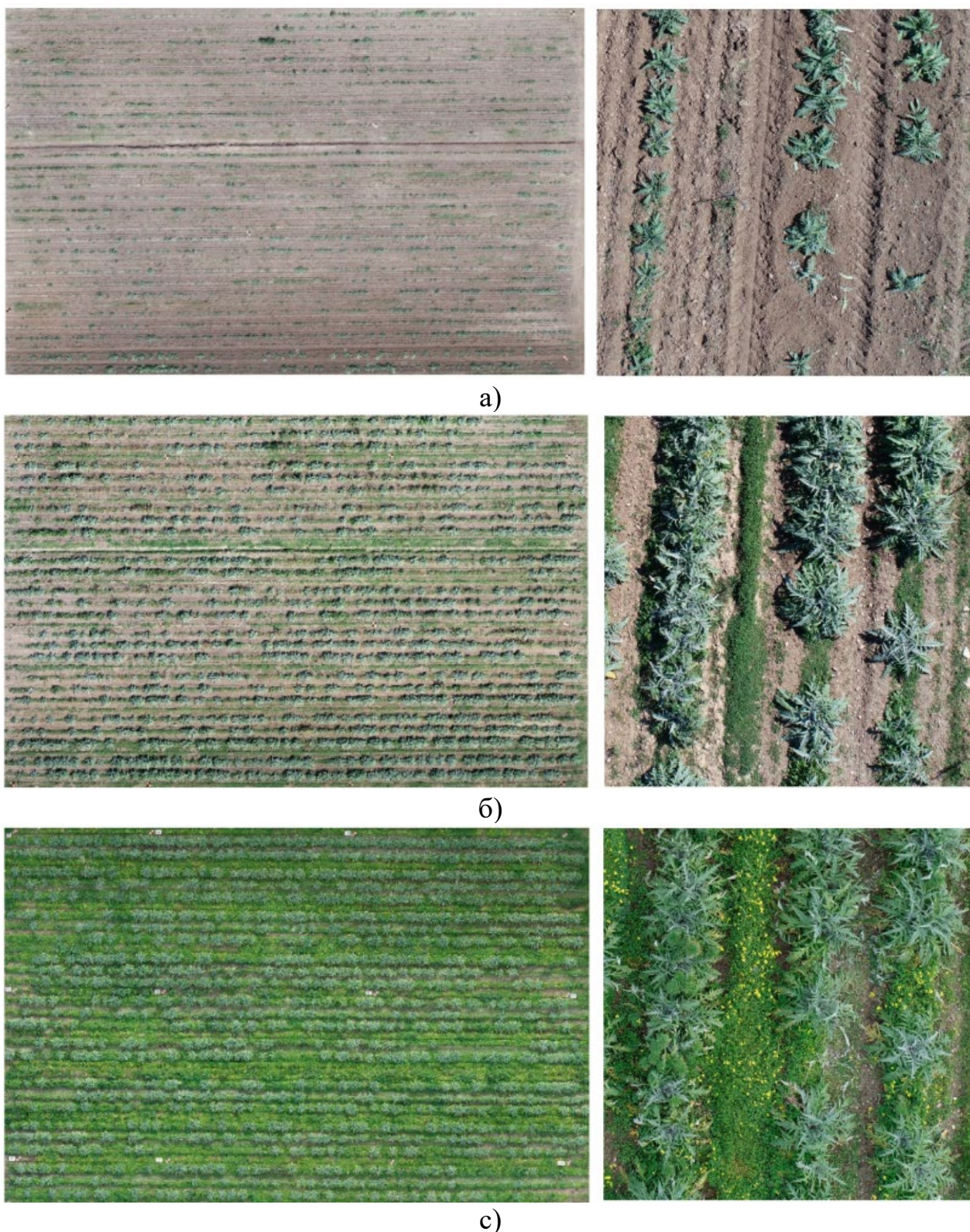


Рис. 3.5. Ортомозаїки RGB (лівий стовпчик) та деякі деталі рослин артишоку (правий стовпчик), отримані на висоті польоту 15 м у три різні дати зйомки із розривом у 1 міс.

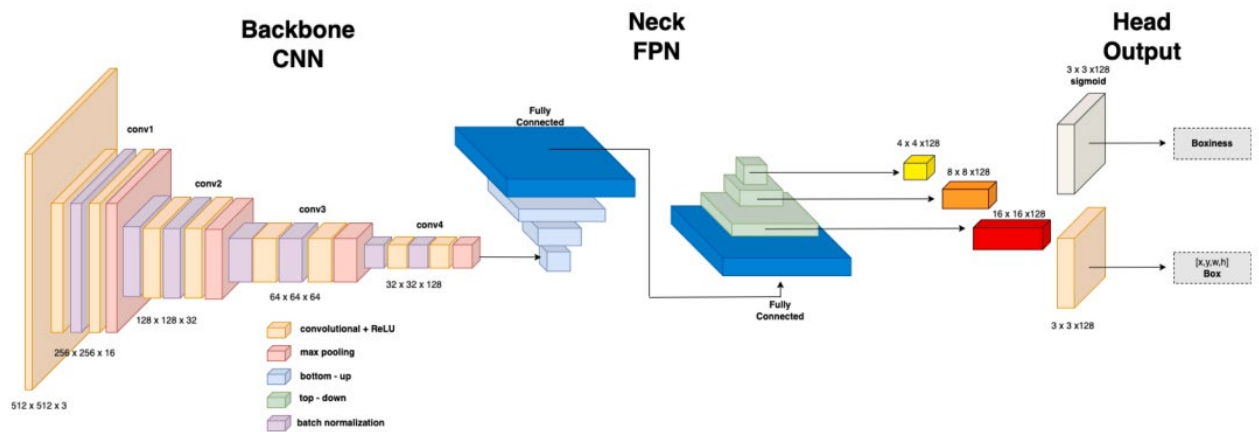


Рис. 3.6. Пропонована схема мережевого процесу аналізу класифікації

Особливістю підходу до побудови даної FPN є використання її для покращення інформаційної потужності вилучення ознак. Зокрема, пропонована мережа (рис. 3.6) складається із згорнутої основи для вилучення визначальних ознак, а потім структура FPN використовується як основа для покращення інформації і вилучення ознак у різних масштабах.

3.2.3. Навчання мережі FPN

Модель мережі FPN була навчена з нуля шляхом проектування і налагодження усіх вихідних параметрів. Це означає, що мережа була ініційована із випадковими вагами і зміщеннями, а потім навчена на підмножині набору даних зображень артишоку, що побудована на етапі попередньої обробки шляхом розділення їх на навчальні і тестові набори із пропорцією 70% та 30% відповідно. Тестовий набір використовувався для отримання початкового зворотного зв'язку по продуктивності виявлення мережі перед використання моделі для автономного розпізнавання (детально висвітлено у п. 3.2.6). Зазначимо, що втрати місцеположення – це невідповідність між істинним полем і передбачуваним граничним полем, а втрати прямокутності визначають, наскільки мережа впевнена у об'єктності розрахованого обмежуючого поля. Показник IoU закладається у межах 50% (аббревіатура IoU позначає коефіцієнт перетину за поєднанням. Він

використовується для оцінки продуктивності виявлення об'єктів і складається із відсотка обмежуючого прямокутника істинного рівня, вкритого прямокутником прогнозу). Змінюючи набір даних, можна вплинути на час навчання і кількість епох. Кожне нове ортофотопланування об'єднане із набором навчальних даних. Тому результати, отримані в останній вибірці даних, є найбільш повними, оскільки набір даних складається із усіх попередніх ортомозаїк. Зазвичай, кожна мережа навчалася приблизно 72-80 годин для отримання задовільних результатів.

3.2.4. Навчання нейромережі YOLOv5

Для навчання мережі YOLOv5n, зменшеного варіанту версії YOLOv5, використовувалося трансферне навчання. Попередньо навчена модель YOLOv5n, яка вже була навчена на великому наборі даних зображень (80 класів), була точно налаштована і повторно навчена на наборі даних зображень артишоку. Зокрема, була використана основа мережі YOLOv5, що складається зі згорнутих шарів, які відповідають за виявлення і вилучення ознак, і заморозила ці шари. Були навчені тільки останні декілька шарів, які відповідають за виявлення об'єктів, на наборі даних артишоку. В цілому, наномоделі підтримують кратність глибини YOLOv5 0,33, але зменшують кратність ширини YOLOv5 з 0,050 до 0,25, що призводить до зменшення приблизно на 25% параметрів з 7,5 М до 1,9 М, що ідеально підходить до мобільних обчислювальних блоків.

Фаза навчання включала фазу попередньої обробки, на якій зображення даних були отримані з обрізаних артомозаїк різних польотів БПЛА, а потім надані мережі для навчання. Навчання складалося із 2000 епох із розмірністю пакетів 8.

3.2.5. Тестування і оцінка продуктивності роботи нейромережі

Для обох мереж перед використанням моделі для офлайн-виявлення і розпізнавання був проведений тест для кожної фази навчання, щоб оцінити продуктивність мережі і максимально розширити можливості виявлення і розпізнавання мереж. Як було відмічено, на етапі навчання мережі 30% наборів даних були використані для її тестування, визначаючи показники mAP, повноти, точності та оцінки F1, які є звичайними показниками для оцінки моделі машинного навчання [25]:

$$recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3.1)$$

де TP – кількість квадратів (блоків), які були правильно ідентифіковані мережею, із мірою перекриття IoU більше 50% по відношенню із істинними комітками, які були обрані в процесі ручної вказівки;

FP – кількість квадратів, які виявила мережа і які не відповідають істинним блокам, або IoU нижче межового значення 50%;

FN – це кількість комірок істинності (у списку анотацій), які були пропущені мережею розпізнавання.

$$precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3.2)$$

$$F1score = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} \quad (3.3)$$

$$surfacerrecallSRI = \frac{matched\ area\ (px)}{GT\ area\ (px)} \quad (3.4)$$

$$surfaceprecisionSP = \frac{matched\ area}{DET\ area\ (px)} \quad (3.5)$$

де $GT_Area\ (px)$ – відповідає кількості пікселів зображення, вкритих блоками *Ground-Truth (GT)* (будь-яке перекриття пікселів враховується тільки один раз);

DET_Area (px) – відповідає кількості пікселів зображення, вкритих виявленими блоками;

$Matched_Area$ (px) – кількість пікселів зображення, де блоки GT і блоки DET перекривають один одного.

Отже, TP , FP та FN вказують кількість істинно позитивних (позначаються як правильно виявлені рослини артишоку), негативно-позитивних (бур'яни та інші об'єкти, невірно визначені як артишок) та негативно-негативних (незнайдених рослин артишоку) об'єктів відповідно. **Відгук (*Recall*)**, інколи також позначається як чутливість (*sensitivity*), є мірою ефективності виявлення мережі для мінімізації кількості пропущених об'єктів. **Точність (*Precision*)** є мірою точності мережі для досягнення мінімальної кількості похибок виявлення. Оцінка $F1$ є середньозваженим значенням **відгуку** і **точності**, включаючи як негативно-позитивні, так і негативно-негативні результати.

Для ефективного аналізу результатів виявлення доцільно зупинитися на тому факті, що цільова функція (обприскувач БПЛА) має дві основні мети – максимізація кількості рослин для розпилювання і мінімізація втрат добрив (на ґрунті або на бур'янах). Нажаль, класичні індекси (відгук і точність) засновані тільки на кількості перетинів об'єкту і квадрату, незалежно від фактичної форми і розміру рослин. Тому були введені два додаткових індексу, а саме **SR (поверхня-відгук)** та **SP (поверхня-точність)**, які визначаються за виразами (3.4) та (3.5).

Спочатку були оптимізовані параметри мережі для досягнення найкращих можливостей у процесі виявлення і розпізнавання. Після цього роблені конфігурації мережі були використані для офф-лайн тривалого моніторингу і аналізу.

3.2.6. Автономне виявлення і розпізнавання

Важливим кроком перед використанням моделі у сценарії реального часу є оцінка її поведінки в автономному режимі, оскільки і автономна обробка зображень, і обробка у програмних додатках в реальному часі мають справу з одними і тими самими RGB-зображеннями або відеоданими, незалежно від того, чи були вони отримані і збережені з камери напряму або збережені заздалегідь. Зокрема, була використаний невеликий, але потужний мініПК Nvidia Jetson Nano (рис. 3.7), придатний для роботи із IoT-додатками на базі штучного інтелекту (ШІ), для встановлення навчених і протестованих мереж для такого етапу оцінювання. Як буде показано далі, на етапі оперативного виявлення на БПЛА у режимі реального часу на мініПК Nvidia Jetson Nano буде завантажена тільки YOLOv5. Це пов'язано з тим, що неймережа YOLOv5 виявилася більш «легкою» мережею, ніж піраміда функцій користувача FPN, і вона досягла кращих результатів у виявленні, розпізнаванні та продуктивності обладнання (енергоспоживання, зберігання у пам'яті і т.д.). Порівняння продуктивності неймереж FPN і YOLOv5 коротко наведене у п. 3.3, а деякі дані о реалізації YOLOv5 на мініПК Jetson наведені у п. 3.4.

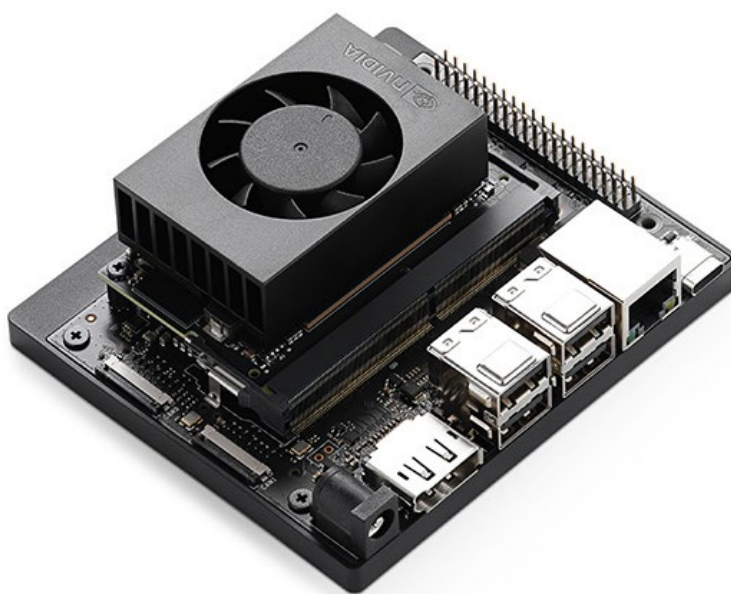


Рис. 3.7. МініПК Nvidia Jetson Nano

3.2.7. Часовий моніторинг та інтеграція

Для коректної реконструкції повної історії протягом часу для кожної рослини був розроблений алгоритм часового моніторингу. Першим кроком цього процесу є просторова реєстрація послідовності пар ортофотопланів. 12 наземних контрольних точок (GCP ground control points) (рис. 3.8) були розміщені на землі шляхом реєстрації їх геоприв'язаного положення (довгота, широта, висота) у відповідності із моделлю географічної проекції WGS84 (EPSG 4326).



Рис. 3.8. Одна із 12 опорних точок (0,5х0,5 м), що використовуються для прив'язки зображень

Таким чином, усі центри виявлених квадратів завжди можуть бути перенесені у світові координати за допомогою спеціального перетворення для підтримки оптимального планування місії БПЛА для обприскування рослин у реальному часі.

Прийняте рішення для реєстрації ортофотопланів у різний час запису являє собою процес автоматичної реєстрації, заснований на інформації, яка

отримана від квадратів-рослин, виявлених і розпізнаних нейронною мережею. Така автоматична реєстрація реалізується при виконанні наступних двох кроків:

1. Пошук загальної трансляції (dx , dy), яка максимізує перетин по об'єднанню **IoU** (**IoU** – **Intersection over Union**) між квадратами, що виявлені на двох послідовних ортофотопланах.

2. Вибір квадратів із IoU вище заданого порогу (більше 50%) та розрахунок відносного гомографічного перетворення між центрами мас.

Слід підкреслити, що в цьому випадку гомографічне перетворення обчислюється між центрами мас квадратів, виявлених на двох послідовних ортофотознімках. Перетворення дозволяє співставляти положення квадратів з одного зображення з іншим, вирівнюючи їх у просторі. Оцінюючи гомографію, алгоритм може реконструювати повну часову історію кожної рослини, вирівнюючи та реєструючи виявлені квадрати на послідовних ортофотознімках. Середньоквадратичне відхилення гомографічного перетворення варіюється у межах від 9 до 12 см, що приблизно відповідає фактичному розкиду центрів тяжіння порівнюваних квадратів у двох послідовних часових інтервалах.

Автоматична реєстрація дозволяє виконувати просторове прогнозування між координатами ортофотоплану у момент часу t_0 (попереднє значення) і координатами у момент часу t_1 (наступне значення) і навпаки. Це являє собою основу процесу моніторингу часу [23], який, в свою чергу, реалізується за дві фази:

- моніторинг в прямому напрямку: для кожного квадрату, виявленого у момент часу t_0 , шукає найкраще спів падіння (з точки зору максимального IoU) серед усіх квадратів, виявлених в момент часу t_1 ; якщо прийнятне спів падіння не знайдене (межове значення IoU), генерується нова гіпотеза (прогноз), яка додається до списку квадратів, доступних в момент часу t_1 , тим самим забезпечуючи розповсюдження і неперервність поточного треку.

- моніторинг у зворотному напрямку, генеруючи обернені прогнози для усіх полів, які ще не пов'язані із попередніми етапами врожаю.

Результатом цього процесу моніторингу є серія повних рядків, від першого записаного ортофотознімку до останнього доступного, для усіх рослин-квадратів, виявлених нейронною мережею. Загальна кількість рядків обов'язково містить певну кількість похибок, які можна класифікувати як:

- пропущені рослини-квадрати, в основному внаслідок низької контрастності зображень, перешкод від інших елементів на полі та ін.

- декілька екземплярів квадратів для одної і тієї ж самої істинної точки внаслідок похибок локалізації і розміру при прямому або зворотному представленні.

- нові фантомні квадрати-рослини, які можуть з'являтися у тих областях, де немає рослин, часто внаслідок наявності бур'янів, розкиданого листя і т.п.

Таким чином, пряме та зворотне співставлення дозволяє повністю реконструювати розвиток рослини від початку до кінця врожаю.

3.2.8. Аналіз врожайності артишоку на полі вирощування

Отриманий список рослин-квадратів із часової інтеграції реорганізується шляхом впорядковування їх як у вертикальному, так і в горизонтальному положенні вздовж рядків рослин у полі. На рис. 3.9 зображена підмножина поля культури (повний розмір складає 14112x9072 пікселів) із перекриттям виявлених та відслідковуваних у часів рослин-квадратів. В реальному часі у програмному додатку, що встановлений на БПЛА, найкраща конфігурація мережі повинна бути здатною досягти високої швидкості відклику, щоб виявити максимальну кількість цільових рослин і спрямувати розпилювач рідких добрив до фактичного положення рослин у полі. Висока швидкість точного виявлення і розпізнавання є також

надзвичайно важливою для мінімізації кількості добрив, що розприскуються за межами цільової рослини.

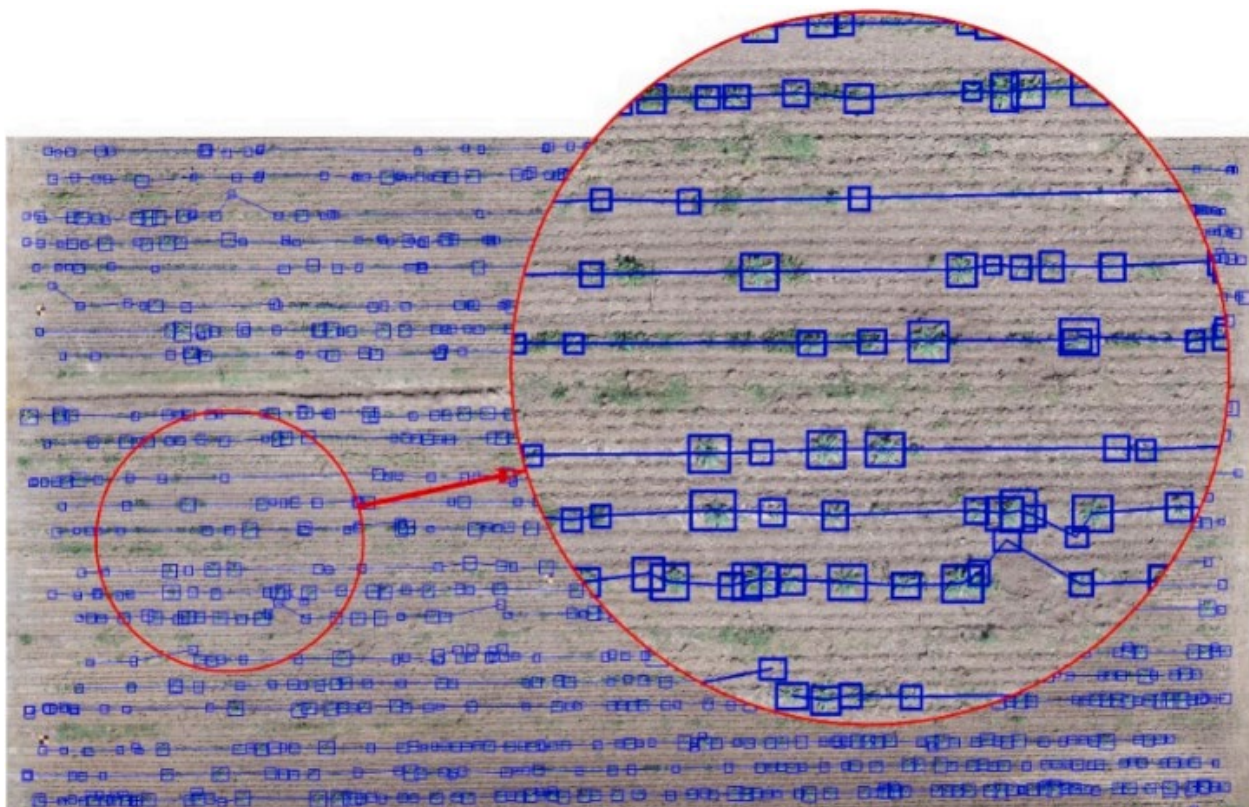


Рис. 3.9. Фрагмент виду ортмозаїки RGB із виявленими і відслідковуваними у часі і просторі квадратами-рослинами (синій колір) і пов'язаними вздовж кожного ряду врожаю

Плануючи потенціальне реальне використання, слід відмітити, наскільки можуть відрізнятися виявлені квадрати (образи рослин) від реальних рослин: мінімальне відхилення у виявленні можуть суттєво впливати на позиціонування БПЛА над окремими цільовими рослинами і на планування місії обприскування в цілому, тому було оцінене відхилення між центрами виявлених квадратів-рослин та їх істинними очікуваними положеннями на полів рядку висаджених рослин. Була визначене нормоване значення L^2 (Евклідова відстань) як найбільш репрезентативна міра для оцінки відстані між центрами квадратів, оскільки вона враховує відхилення в усіх напрямках площини.

Позначивши відповідно

$$c_i^D = (c_{x,i}^D, c_{y,i}^D) \quad (3.6)$$

$$c_i^T = (c_{x,i}^T, c_{y,i}^T) \quad (3.7)$$

центри i -го виявленого квадрату та істинної рослини-квадрату, була визначена відстань d_i для усіх пар виявлених та істинних квадратів як:

$$d_i = \sqrt{(c_i^D)^2 - (c_i^T)^2} = \sqrt{(c_{x,i}^D - c_{x,i}^T)^2 + (c_{y,i}^D - c_{y,i}^T)^2} \quad (3.8)$$

З такого представлення даних можна отримати автоматичну сегментацію даних кожного ряду рослин у відповідності з певними параметрами: **кількість рослин/рядів**, **індекс вегетаційної маси** та **щільність рослин**, які дають чітке уявлення про стан здоров'я врожаю. Ще одною важливою характеристикою, отриманою в результаті тривалого аналізу, є **індекс росту**, який пов'язаний із сезонним розвитком врожаю. Він розраховується як відношення середнього розміру (ширини і висоти) обмежуючої рамки рослин, виявлених у різний час експерименту:

$$GI_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{w_j^i + h_j^i}{w_j^{i-1} + h_j^{i-1}}, i = 2, \dots, 7 \quad (3.9)$$

де w_j^i та h_j^i – відповідно ширина і висота обмежуючих квадратів на i -му ортофотоплані;

N – кількість обмежуючих квадратів на ортофотоплані, яка завдяки алгоритму часового моніторингу, є однаковою для кожного ортофотоплану ($N = 1419$ для мережі FPN та $N = 1351$ для мережі YOLOv5).

3.3. Аналіз отриманих результатів. Навчання нейромереж виявленню та розпізнаванню рослин

3.3.1. Аналіз продуктивності роботи мережі FPN.

На етапі оцінювання мережа FPN була протестована на частині набору даних, які не використовувалися для навчання. Таблиця 3.2 відображає продуктивність мережі при виявленні рослин артишоку. Позначення показників *TP*, *FP*, *FN*, розрахункових показників, наведені у п. 3.2.5.

Продуктивність виявлення і розпізнавання була протестована із різними значеннями IoU, від 0,5 до 0,25. Звичайно, було отримане незначне покращення як повноти, так і точності, але завжди нижче 0,5%. Таким чином, весь тест продуктивності був проведений із межевим значенням $\text{IoU} = 0,5$. Слід відмітити, що індекси поверхні (*SR* та *SP*) не залежать від значення IoU.

У таблицях 3.2 та 3.3 порівнюються показники продуктивності, отримані до і після моніторингу в прямому і зворотному представленні.

Таблиця 3.2.

Показник ефективності FPN виявлення
у кожний окремий день тестування

Date	BBCN	TP	FP	FN	Precision	Recall	F1score	SR	SP
день 1	14	474	11	72	0.97	0.86	0.91	0.87	0,95
день 2	16	533	22	53	0.96	0.91	0.93	0.91	0,96
день 3	35	541	39	66	0.93	0.89	0.91	0.90	0,98
день 4	47	544	18	57	0.96	0.90	0.93	0.94	0,96
день 5	51	460	32	141	0.93	0.76	0.84	0.90	0,98
день 6	55	450	73	125	0.86	0.78	0.82	0.92	0,98
день 7	59	509	71	95	0.87	0.84	0.86	0.92	0,98

Проміжок часу між днями тестування складає в середньому 12-14 діб.

Показник продуктивності виявлення мережею FPN
після багаторазового моніторингу

Date	BBCN	TP	FP	FN	Precision	Recall	F1score	SR	SP
день 1	14	487	146	59	0.76	0.89	0.83	0.89	0.88
день 2	16	531	95	55	0.84	0.91	0.88	0.91	0.92
день 3	35	555	102	52	0.85	0.91	0.88	0.90	0.96
день 4	47	550	82	51	0.87	0.92	0.89	0.94	0.96
день 5	51	517	124	84	0.8	0.86	0.83	0.91	0.98
день 6	55	499	121	76	0.81	0.87	0.84	0.93	0.97
день 7	59	519	106	85	0.83	0.86	0.85	0.92	0.97

Таблиця 3.2 ілюструє, як точність повільно знижується у часі і відповідності із процесом розвитку урожаю. Фактично, рослини артишоку досягають свого максимального зростання приблизно за 3,5 міс. від початку росту, і по мірі того, як рослини стають більше, вони часто заважають одне одному, частково перекриваючи один одне, що утруднює розрізнення рослин артишоку на полі. Такий нерівномірний розподіл рослин-квадратів також впливає на поведінку індексу відклику (*Recall*). Більш низькі значення, отримані при вимірюванні на самій початковій стадії тестування (перший день), обумовлені наявністю у переліку ґрунтової поверхні дуже маленьких цільових рослин артишоку, які часто мало помітні навіть людському погляду.

З іншого боку, два індексу поверхні SR та SP є набагато більш стабільними протягом усього періоду розвитку. Вони краще описують продуктивність мережі у контексті застосування БПЛА для розприскування і демонструють, що більше 90% листової поверхні можуть бути охопленими процесом розпилювання, при цьому менше 5% розприсканого продукту випадає за межі фактичного розміру (простору) культури. Згадане пряме та обернене відслідковування дозволяє покращити індекс відклику, відновивши деякі рослини-квадрати, які були пропущені мережею на певній стадії розвитку, але це також обов'язково визначає зниження міри точності

внаслідок генерації декількох гіпотез для рослин, що дуже близько зростають, або частково перекривають одна одну. Таблиця 3.3 (для мережі FPN) і таблиця 3.5 (для мережі YOLOv5) підтверджують цю тенденцію, але не сприяють визначенню, яка з мереж є кращою, оскільки продуктивність після відслідковування є майже однакова для них обох.

Таблиця 3.4 показує показники, дістані з ді для оцінки відхилення між центрами передбачених полів і центрами істинного положення. Спочатку статистика розраховувалася на пік сель, а потім переводилася у сантиметри, враховуючи, що один піксель = 0,5 см.

Таблиця 3.4.

Статистика відхилення між центрами передбачених квадратів
та дійсними положеннями центру рослини

Date	BBCH	Min (cm)	Max (cm)	Mean (cm)	Mode (cm)	Median (cm)	Std (cm)
день 1	14	0.00	21.82	4.89	1.11	4.30	3.24
день 2	16	0.00	30.56	6.17	3.53	4.74	4.99
день 3	35	0.50	40.05	8.99	1.80	6.40	7.40
день 4	47	0.50	44.77	8.10	2.50	6.51	6.35
день 5	51	0.70	47.16	14.11	4.03	12.06	9.73
день 6	55	0.70	51.24	12.30	4.03	9.92	9.02
день 7	59	0.00	56.64	12.08	1.11	9.48	9.51

Таблиця 3.5.

Показник ефективності YOLOv5 виявлення
у кожний окремий день тестування

Date	BBCH	TP	FP	FN	Precision	Recall	F1 score	SR	SP
день 1	14	437	1	109	0.99	0.8	0.88	0.91	0,96
день 2	16	469	2	117	0.99	0.8	0.88	0.91	0,97
день 3	35	534	3	73	0.99	0.88	0.93	0.94	0,98
день 4	47	543	7	58	0.98	0.9	0.94	0.94	0,97
день 5	51	522	7	79	0.98	0.86	0.92	0.95	0,99
день 6	55	494	5	81	0.99	0.85	0.92	0.95	0,98
день 7	59	509	3	95	0.99	0.84	0.91	0.95	0,98

3.3.2. Аналіз продуктивності роботи мережі YOLOv5.

Така ж сама оцінка продуктивності, яка була проведена для мережі FPN, була повторена і для мережі YOLOv5 для кожного набору даних кожного ортофотоплану. Результати, наведені в таблиці 3.5, демонструють доволі високий рівень точності, що підтверджується також індексом SP. З іншого боку, індекс повноти є дещо низьким на ранніх стадіях зростання рослин. В будь-якому випадку, індекс SR, який надає інформацію про фактичне покриття ґрунту рослинами, залишається високим (більше 90%) і стабільним протягом усього періоду тестування.

Навіть в цьому випадку ефективність виявлення вимірювалася після багаторазових досліджень в прямому і оберненому напрямках (таблиця 3.6) для підтвердження більшого охоплення листового покриву за рахунок дещо зниженої точності. Ці характеристики підходять для мультичасового аналізу врожайності, щоби точно відтворити розвиток кожної рослини на полі.

Наприкінці, таблиця 3.7 відображає відхилення між центрами передбачуваних та фактично зростаючих рослинах-квадратах для отриманих від мережі YOLOv5 даних. Отримані значення мінімуму (Min), максимуму (Max), дійсного (Mean), режимного (Mode), усередненого (Median) і стандартного відхилення (Std) демонструють, що виявлені квадрати добре перекривають істинні дані, що і є показником якості прогнозування мережі.

Таблиця 3.6.

Показники продуктивності мережі YOLOv5, спрямовані на досягнення меншої кількості похибок виявлення

Date	BBCH	TP	FP	FN	Precision	Recall	F1 score	SR	SP
день 1	14	475	127	71	0.78	0.87	0.82	0.96	0.80
день 2	16	492	105	94	0.82	0.84	0.83	0.96	0.85
день 3	35	567	56	40	0.91	0.93	0.92	0.96	0.94
день 4	47	554	46	47	0.92	0.92	0.92	0.96	0.95
день 5	51	557	51	44	0.91	0.92	0.92	0.95	0.98
день 6	55	530	61	45	0.89	0.92	0.9	0.95	0.97
день 7	59	550	44	54	0.92	0.91	0.91	0.95	0.97

Статистика відхилень між центрами передбачених рослин-квадратів та реальними даними для YOLOv5

Date	BBCH	min	max	mean	mode	median	std
день 1	14	0.00	16.86	2.54	1.11	2.61	2.15
день 2	16	0.00	13.41	2.83	1.11	2.12	2.19
день 3	35	0.00	33.63	3.94	1.11	2.69	3.84
день 4	47	0.00	34.05	4.66	1.11	3.35	4.16
день 5	51	0.00	59.03	5.70	1.58	3.60	5.88
день 6	55	0.00	45.02	7.05	1.58	4.52	7.24
день 7	59	0.00	41.50	5.84	2.23	4.03	5.55



а)



б)

Рис. 3.10. Виявлення усієї засіяної цільовими рослинами (артишок) обома мережами

Бачимо у верхній частині лівого зображення (а), як мережа FPN виявляє декілька фальшивих рослин артишоку. Навпаки, мережа YOLOv5 здійснює майже ідеальне виявлення рослин на всьому полі (б)

3.4. Порівняння результатів роботи мереж FPN та YOLOv5

На рис. 3.10 зображені результати виявлення на усій досліджуваній площі поля за допомогою двох різних мереж: обидві показали, що спроможні виявляти і розпізнавати велику кількість рослин (виявлення усієї ортмозаїки є складною задачею для однієї нейромережі), при чому кращі результати показує YOLOv5, яка має тенденцію мінімізувати кількість фальшивих виявлень (ідентифіковані великими червоними квадратами у верхній і нижній частинах лівого поля на рис. 3.10, а). Обидві мережеві моделі демонструють прийнятну продуктивність для тієї задачі, що вирішується в цьому дослідженні, а індекси площі (SR и SP) демонструють високе покриття листової поверхні рослин із мінімальною площею виявлення за межами поля із цільовими рослинами.

В будь-якому випадку, YOLOv5 досягає вищого рівня точності у порівнянні з FPN, дані навчання якої включали також значну кількість дрібних об'єктів-рослин. Навпаки, YOLOv5 навчалася на більш широких і більш різноманітних наборах даних із тенденцією до узагальнення на більш крупні форми об'єктів.

Статистика, наведена в таблиці 3.7, також показує, що YOLOv5 краще порається із виявленням і розпізнаванням рослин артишоку. Зокрема, стовпчики середнього значення і стандартного відхилення демонструють, що мережа YOLOv5 є більш надійною і не схильна до впливу зростання рослин на результати протягом місяців.

У якості останнього показника для порівняння двох мереж на рис. 3.11 представлений індекс mAP для кожного ортофотоплану.

Немає сумнівів, що YOLOv5 працює краще, ніж користувацька мережа FPN, як свідчать результати порівняння вказаного індексу. Причини такої невідповідності у продуктивності можна пояснити різними факторами. По-перше, архітектура моделі відіграє вирішальну роль – YOLOv5 і FPN мають різні базові архітектури, які можуть впливати на їх продуктивність. Хоча FPN

досягає більш низьких результатів продуктивності, її архітектура є простішою, ніж у YOLOv5, з іншою кількістю параметрів для навчання. По-друге, стратегії навчання є дуже важливими для розгляду факторами. Пошук оптимальних гіперпараметрів (швидкість навчання, оптимізатори, розмежування навчання і тестування та ін.) може бути складним завданням, яке вимагає значних витрат часу і енергії.

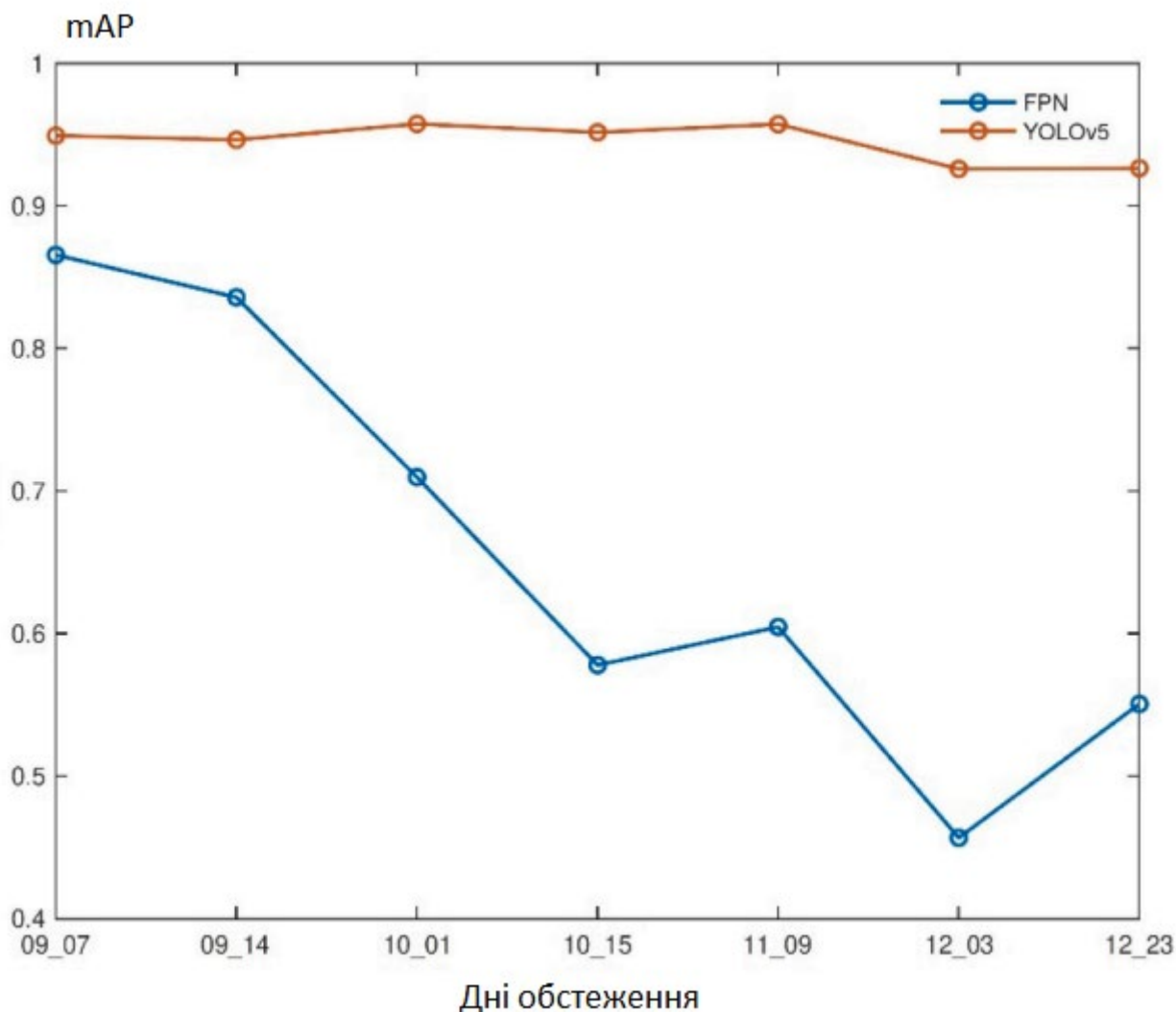


Рис. 3.11. mAP індекс точності для мереж по усім наборам даних

YOLOv5 – це сучасна технологія, і передбачається, що гіперпараметри були правильно налагоджені. По-третє, кроки пост-обробітку, що застосовані до даних на виході моделі, можуть спричинити вплив на фінальні результати виявлення. Такі методи, як пом'якшене придушення для видалення дублюючого виявлення, межеве значення для оцінок впевненості і уточнення

обмежуючого поля, можуть розрізнятися у реалізації і впливати на невідповідність продуктивності роботи YOLOv5 і FPN, якщо вони не використовуються послідовно.

Підводячи підсумки, можна сказати, що різну продуктивність можна пояснити декількома факторами, включаючи доступність даних, вибір оптимальних гіперпараметрів та параметри пост-обробітку, але слід відмітити, що індивідуальне навчання нейронних мереж (наприклад, розглянутої FPN) може призвести до співставної продуктивності із самою сучасною технологією.

3.5. Оцінка роботи мережі, встановленої на мініПК Nvidia Jetson

Як вказувалося у попередньому матеріалі, на наступному етапі дослідження і експлуатації на мініПК Nvidia Jetson буде встановлена тільки нейромережа YOLOv5. У таблиці 3.8 наведені деякі статистичні параметри плати Nvidia Jetson, коли на ній працює мережа YOLOv5 на етапі тестування. Статистика була отримана від пакета програмного забезпечення Jetson-stats для моніторингу і керування NVIDIA Jetson [серія Orin, Xavier, Nano, TX1, TX2]. Статистика продуктивності оцінювалася при двох різних режимах живлення плати: режим 5 Вт (плата працює із низьким енергоспоживанням і використовує тільки 2 із 4 ядер ЦП) та режим повної потужності 15 Вт (позначений як режим MAXN). На рис. 3.12 показана кількість FPS (англ. *frames per second* - кількість кадрів в секунду на екрані монітора), що оцінене платою у двох різних режимах живлення. Обчислена статистика складається із різних параметрів: використання ЦП, ОЗУ, температура і енергоспоживання, кожен із яких розділений на два вказаних режими споживання енергії.

Таблиця статистики плати Nvidia Jetson Nano
при роботі навченої мережі YOLOv5

	5 W mode				MAXN mode			
	Min	Max	Mean	Std	Min	Max	Men	Std
CPU1 (%)	10.00	100.00	66.08	23.13	2	81	38.14	11.82
CPU2 (%)	12.00	100.00	66.39	22.77	1	81	36.48	10.89
CPU3 (%)	\	\	\		0	53	35.52	11.33
CPU4 (%)	\	\	\	\	0	54	35.98	11.58
GPU (%)	7.00	99.00	56.36	44.65	0	99	79.48	34.82
RAM	2,067,900	2,101,352	2,087,900	13,757	2,084,768	2,104,596	2,099,000	59,371
TempCPU (°)	28.50	33.00	30.87	1.36	32.00	38.5	35.65	1.63
TempGPU (°)	28	32.5	30.28	1.49	32	37	35.76	1.36
PowerAvg (mW)	1945	3035	2553	551.1	3435	4722	4237	383.93

1. Столпчики «min» і «max» показують мінімальне і максимальне значення для кожного параметра під час процесу навчання.

2. Столпчики «Std» показують стандартне відхилення для кожного параметра, що надає уявлення про те, наскільки сильно коливаються значення під час процесу виявлення.

3. Рядки «CPUs» показують ступінь завантаження 4-ох ядер CPU у %.

4. Рядки «GPUs» показують ступінь завантаження GPU у %.

5. Рядок «RAM» показує використання завантаження оперативної пам'яті мініПК Nvidia Jetson Nano.

6. Рядки «TempCPU» і «TempGPU» показують температуру CPU і GPU відповідно.

7. Рядок «PowerAvg» відображає середнє енергоспоживання під час процесу виявлення.

З таблиці видно, що навчена мережа YOLOv5 використовує більшу частину доступних ресурсів плати Jetson Nano, при цьому використання GPU є найвищим на рівні 99%. Значення стандартного відхилення порівняно невисокі, що вказує на те, що продуктивність роботи мережі є стабільною. Температура CPU і GPU є порівняно високою, причому найвище температурне значення, досягнуте GPU у режимі MAXN, складає 38,5°C.

Споживання енергії є також відносно високим, при цьому найвищі показники споживання досягнуті у режимі MAXN. На рис. 3.12, як було згадано, наведена кількість FPS, оцінена платою у двох різних режимах живлення.

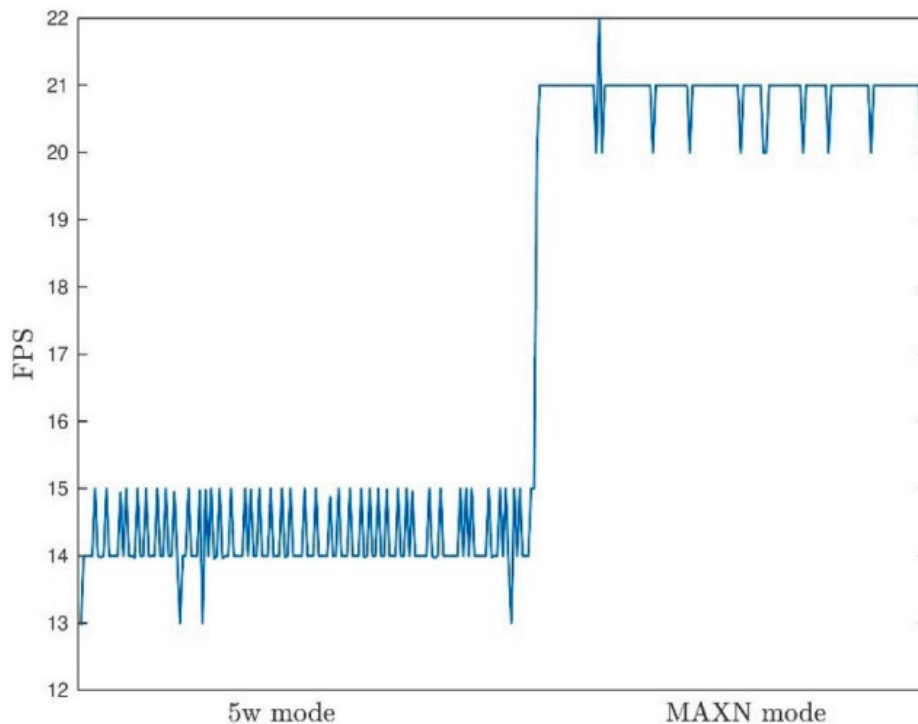


Рис. 3.12. FPS у різних режимах потужності (при використанні повної потужності мініПК Nvidia Jetson продуктивність за FPS різко зростає)

3.6. Оцінка отриманих даних

Графіки на рис. 3.13 показують еволюцію індексу зростання GI (Growing Index) для кожної мережі. На рисунку показаний діапазон змін у диференційній шкалі (між послідовними картами) як кумулятивна зміна значень у часі.

Щоби дослідити, наскільки рівномірно розподіляється швидкість зростання, можна скласти «теплову карту», як це зображено на рис. 3.14, де просторовий розподіл значення індексу зростання для кожної

відслідковуваної рослини відображено (у відповідності із кольоровою шкалою) по усьому полю.

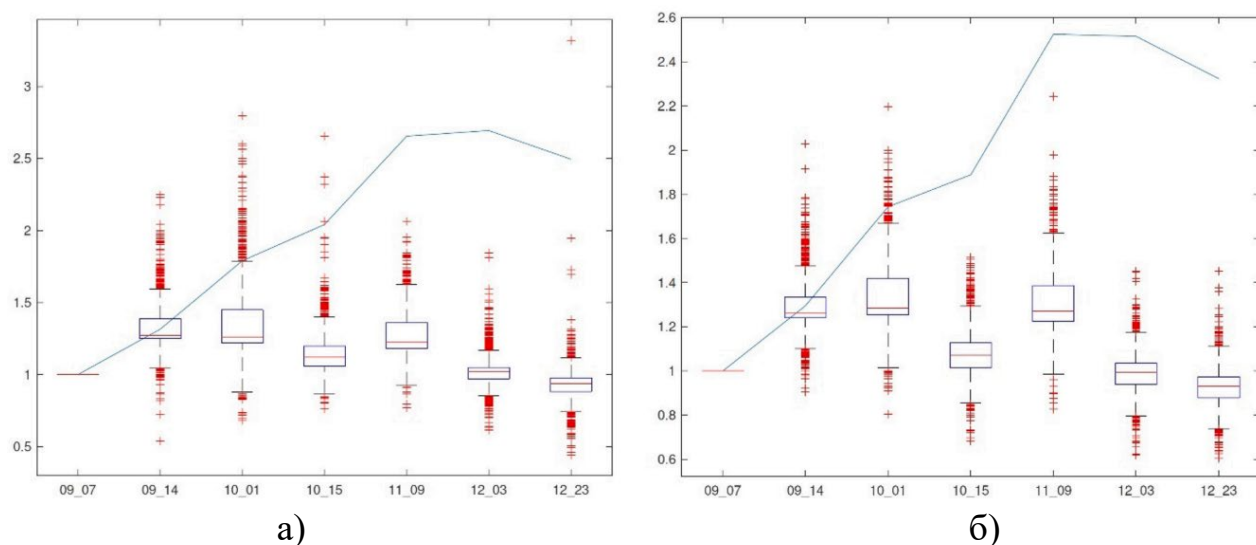


Рис. 3.13. Графіки еволюції індексу зростання GI для мереж FPN (а) та YOLOv5 (б). GI вимірюється як відношення між розмірами обмежуючої рамки, зібраними у різний час експерименту. Синя лінія являє собою кумулятивний середній індекс.

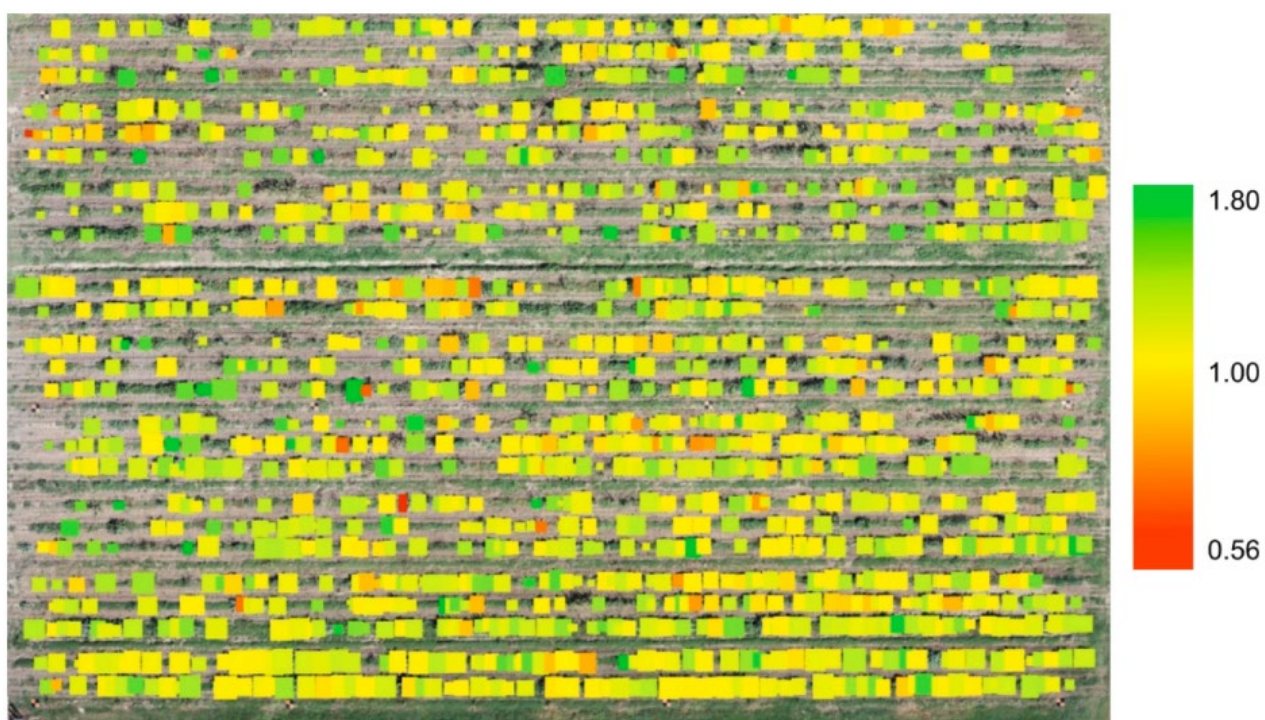


Рис. 3.14. Теплова карта індексу зростання GI у початково-середній стадії вирощування 2 тижні (тривалість 2 тижні). Кольорова шкала (від червоного до зеленого) показана із значенням діапазону (від мінімуму 0,55 до максимуму 1,8)

На рис. 3.15 показана еволюція рослин артишоку у часі (виявлених за допомогою мереж YOLOv5 та FPN, які є аналогічними) у простому ізолюваному випадку (а) та ситуації, коли зростання сусідніх рослин швидко досягає розміру взаємних перешкод і часткового перекривання (б).

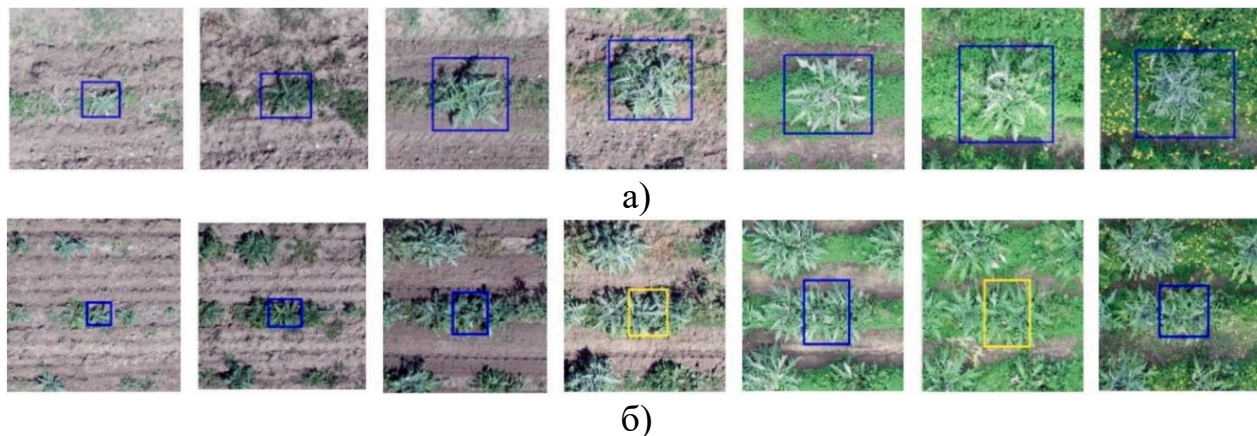


Рис. 3.15. Карта історії для кожної окремої рослини артишоку по усьому набору даних: простий випадок ізолюваної рослини (а); більш поширений випадок, коли рослини зростають дуже близько і перекривають одне одну (б) (жовті прямокутники відповідають результатам прогнозованого моніторингу)

Інший важливий результат наведений у таблиці 3.9. Він показує швидкість заповнення (тобто відсоток поля, заповнений виявленими рослинами-квадратами) і середній розмір виявлених квадратів, виміряний для кожного доступного набору. Не дивно, що рівень зайнятості збільшується із зростанням рослин артишоку і досягає свого найбільшого значення на піку розвитку рослин. Аналогічні спостереження можна зробити для середнього розміру рослин. Якщо порівняти FPN та YOLOv5, то буде видно, що результати майже однакові. Це, безумовно, пов'язано із однаковою продуктивністю двох нейромережових моделей, але в основному це пов'язано із багаторасовою інтеграцією, яка за допомогою прямого та оберненого перетворення має тенденцію відновлювати усі відсутні рослини і забезпечувати надійне представлення еволюції рослин на протязі усього вегетаційного періоду.

Заповнюваність та середній розмір рослин-квадратів по рядах у період розвитку культури для кожної мережі

Date	BBCH	FPN		YOLOv5	
		Occupancy rate (%)	Avg. plant size (cm)	Occupancy rate (%)	Avg. plant size (cm)
день 1	14	30.03	53	28.37	57
день 2	16	40.38	65	39.31	71
день 3	35	52.34	85	52.36	93
день 4	47	57.90	95	56.78	97
день 5	51	65.59	122	66.52	127
день 6	55	66.06	119	66.21	125
день 7	59	61.60	107	61.95	115

Отже результати, отримані на різних наборах даних, показують, що нейромережа задовільно виконує виявлення рослин артишоку, незалежно від дня тестування. Слід нагадати, що одна і та ж сама навчена мережа використовувалася на протязі усього експериментального сезону, без будь-якої оптимізації для окремих наборів даних. Це важливо для промислового використання цієї технології у точному землеробстві, оскільки її можна використовувати для різних сценаріїв в невеликому проміжку часу для різних досліджуваних культур.

В цілому, швидкість виявлення (відклик) є вищою на ранній стадії зростання, коли рослини менші за розміром і є більш ізольовані одна від одної. Така поведінка підкреслює зростаючі труднощі виявлення і розпізнавання рослин на останніх фазах внаслідок взаємного перекриття більш крупних рослин в рядках (рис. 3.14). Подібна тенденція також видна для точності, яка складає більше 90% у ранішні дати.

Кількість відсутніх рослин, зазвичай, зменшується в у наступні дати проведення експериментів. Різні умови освітленості, які викликані різними кутами спадаючого освітлення, а також наявність *Oxalis pes-caprae* L., одного із найпоширеніших сторонніх видів на полях артишоку, могли б забезпечити більш високий контраст, допомагаючи системі виявлення легше відрізнити

рослини артишоку від бур'янів або інших елементів в останні дати проведення експерименту (рис. 3.16).



Рис. 3.16. Зображення двох різних днів збирання даних для однієї і тієї ж самої ділянки поля. Інвазивні рослини *Oxalis pes-caprae* в останні дні вирощування (б) визначили більш сильний контраст по відношенню із експериментом, проведеним на 1,5 міс. раніше (а)

Голий ґрунт, високий контраст і різниця в кольорі між цільовими рослинами і ґрунтом є надзвичайно важливими аспектами виявлення рослин. Так, реалізація системи виявлення бур'янів на основі YOLOv3 допомогла виявити однодольні та дводольні бур'яни на полях кукурудзи та сої, особливо коли сходи були подібного кольору і розміру [31]. Модель підрахунку арахісу в реальному часі, запропонована дослідниками [20] на основі аналізу відео за допомогою покращеного алгоритму YOLOv5, показала точність 98,08%, при цьому швидкість виявлення сходів була у п'ять разів вищою, ніж отриманою оператором. Схожий підхід «на льоту» [37] показав можливість виявлення інвазивних рослин у полі за допомогою комерційно доступного БПЛА, інтегрованого із мережею глибокого навчання, та її здатність бути використаною до інших видів рослин.

3.7. Висновки по 3 розділу

Був розроблений підхід машинного навчання для ідентифікації рослин артишоку у програмну забезпеченні для обприскування у режимі реального часу за допомогою БПЛА. FPN показала задовільні характеристики виявлення на етапах тестування та off-line, оброблюючи зображення за допомогою мініПК Nvidia Jetson Nano і показуючи співставні результати із нейромережею YOLOv5. Тести показали помітну невідповідність показника mAP між двома мережами, визначивши YOLOv5 як таку, що краще працює краще протягом усього вегетаційного періоду. Запропонована автоматична процедура багаточасового моніторингу і аналізу показала можливість розробки процедури планування шляху БПЛА для оптимізації польоту, необхідної для виконання точного і правильного розподілу агрохімікатів. Така процедура дозволила здійснювати моніторинг врожаю протягом усього сезону, показуючи важливі результати, пов'язані із зростаючою неоднорідністю поля.

Наступними кроками, на основі отриманих позитивних результатів, буде встановлення плати Nvidia Jetson Nano прямо на БПЛА для здійснення виявлення, розпізнавання і розпилювання агрохімікатів у режимі реального часу, що дасть потенційно значний ефект від цього процесу. Більше того, багаточасовий аналіз дозволить досліджувати важливу інформацію для підвищення надійності виявлення і розробки автоматичної процедури для моніторингу розвитку сільськогосподарських культур.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА GNSS (GPS) МОДУЛЯ ДЛЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ МОБІЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Для реалізації високошвидкісного і точного GNSS-Bluetooth-модуля для позиціонування і визначення швидкості мобільного агрегату вибрано наступні технічні засоби.

Основою модуля є GNSS-GPS-приймач UBlox NEO-M8N-0-10 GPS Module EVK Board (рис. 4.1).

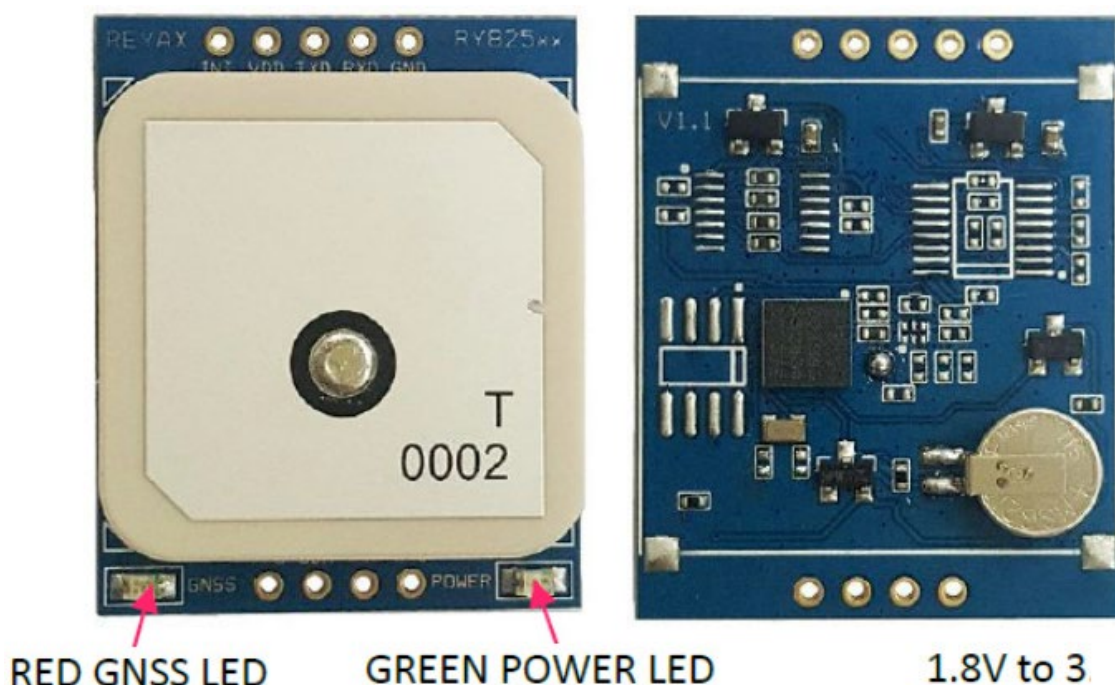


Рис. 4.1. GNSS-GPS-приймач UBlox NEO-M8N-0-10 GPS Module EVK Board

Для стабілізації роботи і запобігання підвисання роботи модуля використовується перетворювач рівнів UART SPI – 4-ох канальний ПС I2C перетворювач логічного рівня двохнаправлений 3...5В (рис. 4.2).

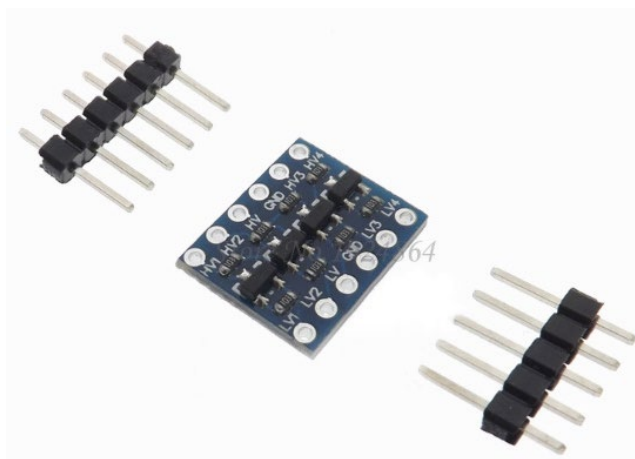


Рис. 4.2. Перетворювач рівнів UART SPI

DC-DC регулятор на 3,3 В (рис. 4.3).



Рис. 4.4. DC-DC регулятор на 3,3 В

Для реалізації Bluetooth-з'єднання із сторонніми пристроями (наприклад, із смартфоном) використовується Bluetooth-модуль Hc-06 HC 06 RF Wireless Bluetooth Transceiver Slave Module RS232 / TTL to UART converter and adapter (рис. 4.4).

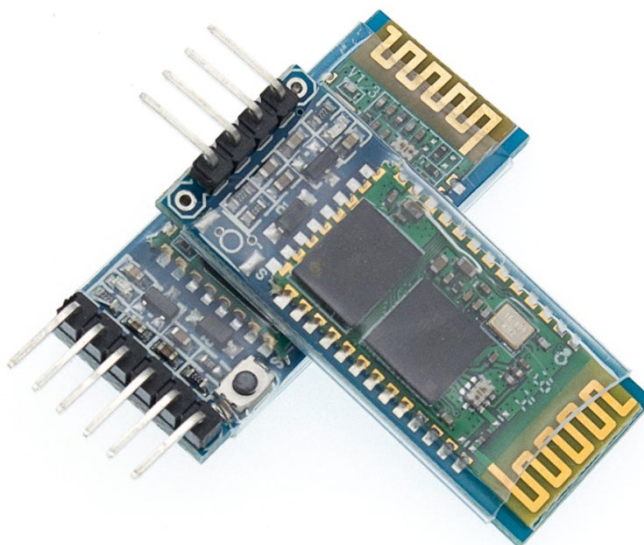


Рис. 4.4. Bluetooth-модуль Hc-06 HC 06 RF Wireless Bluetooth

Для зарядки акумуляторів використаний зарядний пристрій 5 pcs Micro USB 5V 1A 18650 TP4056 Lithium Battery Charger Module Charging Board With Protection Dual Functions 1A Li-ion (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Зарядний пристрій 5 pcs Micro USB 5V 1A 18650 TP4056 Lithium Battery Charger Module Charging Board With Protection Dual Functions 1A Li-ion

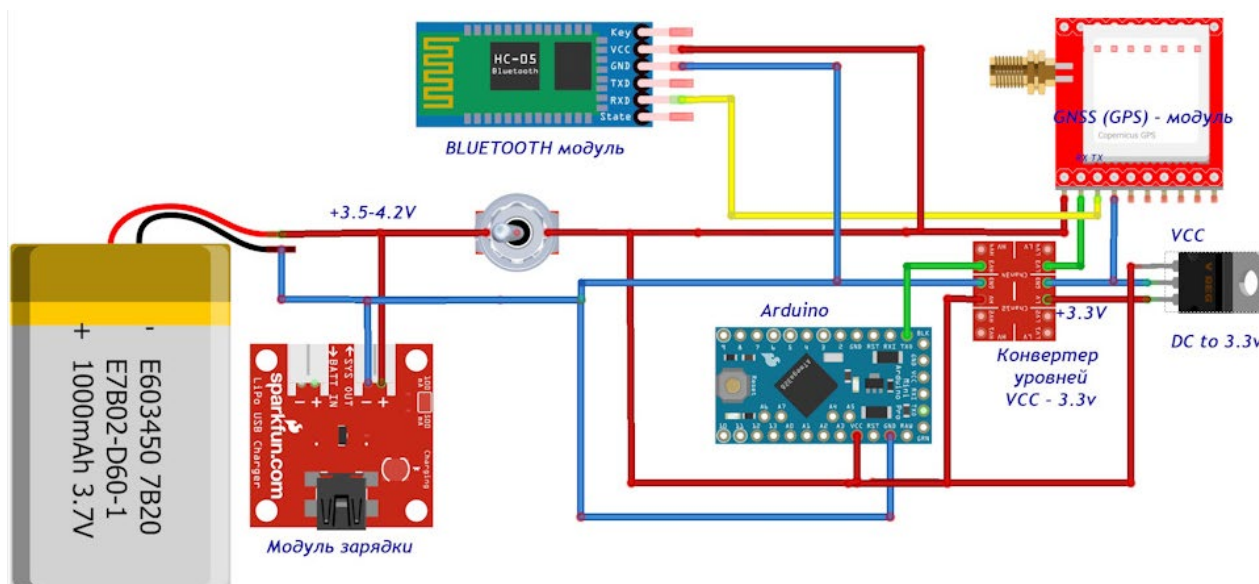


Рис. 4.6. Схема з'єднань складових елементів GNSS-Bluetooth-модуля для позиціонування і визначення швидкості мобільного агрегату

Bluetooth-модуль необхідно налагодити на швидкість 230400, і задати ім'я, для того, щоб його міг побачити смартфон (рис. 4.7).

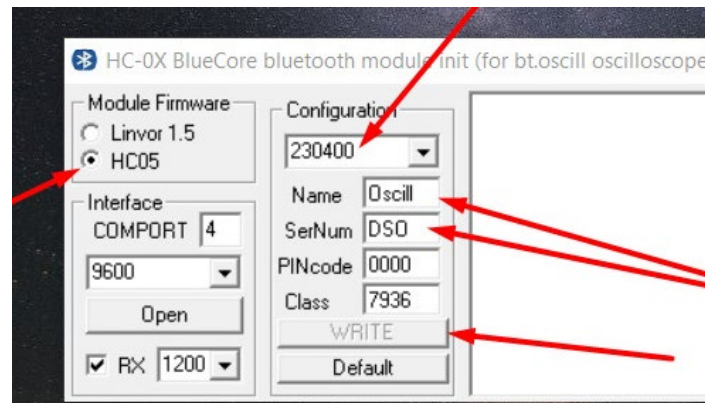


Рис. 4.7. Налагодження Bluetooth-модуль за допомогою програмного забезпечення на ПК

Перевірку роботи приймача можна за допомогою програми BLUETOOTH GPS (рис. 5.8).

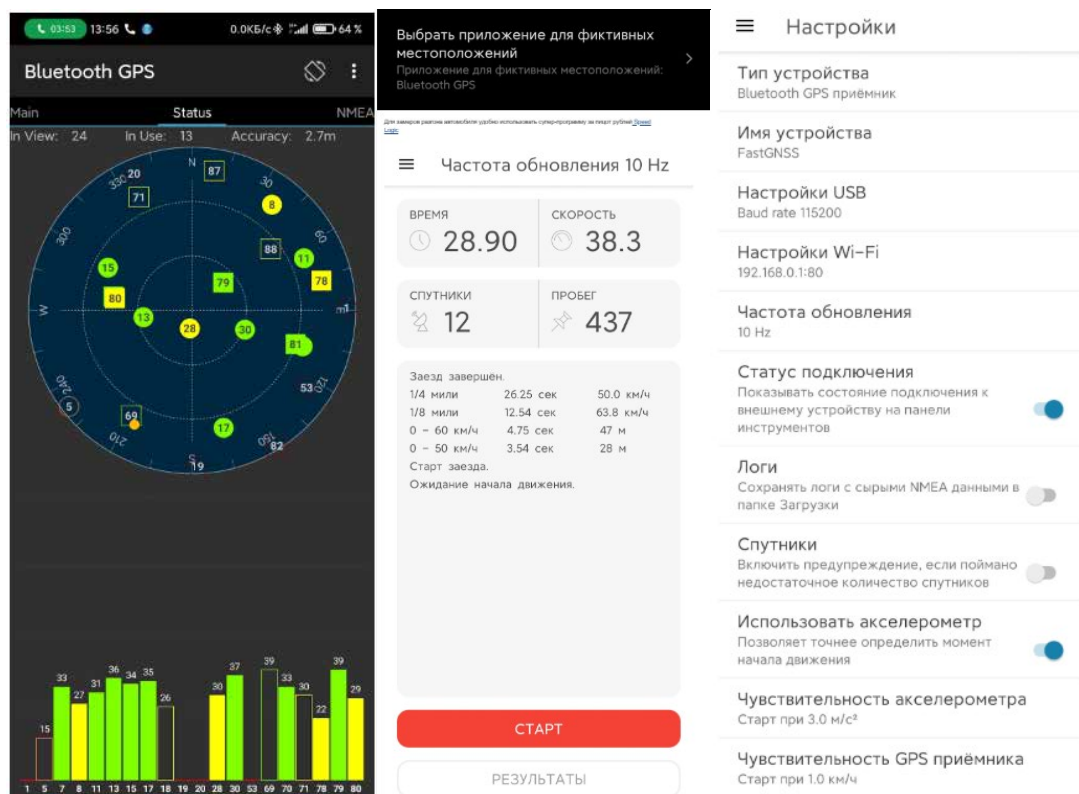


Рис. 4.8. Робочі вікна підключення Bluetooth-модуля до смартфона на Android

ВИСНОВКИ

При виконанні магістерської кваліфікаційної роботи досліджені питання організації підживлення рослин в межах побудови систем точного землеробства.

В результаті дослідження отримані наступні результати.

1. Для побудови системи керування підживленням рослин у реальному часі за технологією точного землеробства необхідно вирішити такі питання, як картографування поля за основними агротехнічними параметрами, шляхи реалізації навігаційної стратегії та алгоритми виявлення і розпізнавання цільових рослин на полі.

2. Для ефективного керування мобільним сільськогосподарським мобільним агрегатом розроблений алгоритм керування цим агрегатом на основі використання даних систем супутникової навігації GNSS, зокрема рядків даних протоколу NMEA 0183.

3. Розроблений підхід машинного навчання для ідентифікації рослин у полі у програмному забезпеченні для обприскування у режимі реального часу за допомогою БПЛА на базі навченої нейронної мережі YOLOv5, яка завантажена на мініПК Nvidia Jetson Nano.

4. Розроблений GNSS-Bluetooth-модуль для позиціонування і визначення швидкості мобільного агрегату із можливістю отримання інформації на системах Android смартфонів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Броварець О. О. Дистанційне керування технологічними операціями роботизованих систем у точному землеробстві / О. О. Броварець // *Механізація та електрифікація с.г.* –Глеваха, 2008.–Вип. 92. – С. 530–535.
2. Використання GPS у сільському господарстві – точне землеробство [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http:// garmin.km.ua](http://garmin.km.ua).
3. Войтюк Д.Г., Аніскевич Л.В., Гаврилюк Г.Р., Волянський М.С. Терміни точного землеробства // *Техніка АПК.* – 1999. - № 5. С. 29-30.
4. Ганначенко С.Л. Інноваційні ресурсозберігаючі технології в землеробстві / С.Л. Ганначенко // *Економіка АПК.* – 2012. – № 1. – С. 99 – 103.
5. Геоінформаційні системи в агросфері [Текст] : навчальний посібник / В. В. Морозов [та ін.]. - К. : Аграрна освіта, 2010. - 269 с.
6. Гічка М.М. Дистанційна зйомка в оптичному та мікрохвильовому діапазонах з метою картографування та моніторингу ґрунтів // *Вісник аграрної науки.* – 2004. - № 12. – С. 65 -68.
7. Ден Есс, Марк Морган. Довідник з точного землеробства (The Precision-Farming Guide for Agriculturist), John Deer Publishing, 2004, 159 с. (укр. переклад А.Г. Тарика, В.А. Забалуєв)
8. Казаченко Л.М., Казаченко Д.А. Переваги GPS-технологій під час розробки проектів консервації малопродуктивних і деградованих земель // *Вісник Харківського національного технічного університету с.г. ім. П. Василенка, Механізація сільськогосподарського виробництва, Вип. 75. Том. I, Харків: 2008. – с. 259 – 283.*
9. Кобець А.С., Михайліченко Є.М., Пугач А.М., Деркач О.Д., Макаренко Д.О., Сумятіна О.О. Практикум з елементами інтерактивного навчання «Системи GIS та основи технологій цифрового землеробства». Дніпровський державний аграрно-економічний університет, 2021, 117 с. Перероблене і доповнене видання.
10. Косик П. Відмови систем GPS // *The Ukrainian Farmer.* – 2009. - № 7. – С. 64 – 65.
11. Косик П. GPS – системи на обприскувачах // *The Ukrainian Farmer.* – 2009. - № 4. – С. 60 – 65.
12. Медведєв В.В., Пліско І.В. та ін.. Знаряддя для диференційованого (точного) обробітку ґрунту // *Вісник аграрної науки.* – 2009. - № 4. – С. 50 – 53.
13. Надикто В. GPS - навігатор на сівбі просапних // *The Ukrainian Farmer.* – 2010. - №3. – С. 94 – 95.
14. Опришко О.О., Болбот І.М., Андріїшина М.В., Пасічник Н.А. Методичні підходи для керування вибіркоким внесенням добрив // *Аграрна наука і освіта.* – 2008. – Том. 9. - №9. – С. 100 – 104.

15. Системи управління аграрним бізнесом на основі ГІС. – [Електронний Ресурс]. – Режим доступу: http://online-agro.com/ua/publications/item_16.
16. Чорний С.Г., Гашпоренко І.М. Визначення вмісту гумусу в ґрунтах дистанційними методами // Вісник аграрної науки.–2010.-№ 3.–С. 14 – 17.
17. Шпітальняк Я. Комп'ютер & GPS: удвох ефективніше // The Ukrainian Farmer. – 2010. - № 1. – С. 72 – 73.
18. Anderson, R., Bevly, D.M., 2010. Using GPS with a model-based estimator to estimate critical vehicle states. *Vehicle Syst. Dyn.* 48 (12), 1413–1438.
19. ASABE, 2010. Dynamic Testing of Satellite-Based Positioning Devices Used in Agriculture. Standard X587 (Draft 10) <<http://elibrary.asabe.org>> (accessed 03.12.12).
20. Chavarri, M.J., Herrera, A., Arino, ~ A., 2004. Pesticide residues in field-sprayed and processed fruits and vegetables. *J. Sci. Food Agric.* 84, 1253–1259. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1791>.
21. European Parliament, C. of the E., 2009. Directive 2009/128/EC of the European Parliament and Of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides (Text with EEA relevance). *Off. J. Eur. Union* 1–16.
22. Gerhards, R., Oebel, H., 2006. Practical experiences with a system for site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and GPS-controlled patch spraying. *Weed Res.* 46, 185–193. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2006.00504.x>.
23. Kalal, Z., Mikolajczyk, K., Matas, J., 2010. Forward-backward error: Automatic detection of tracking failures. In: 2010 20th international conference on pattern recognition. IEEE, pp. 2756–2759. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2010.675>.
24. Osco, L.P., Junior, J.M., Ramos, A.P.M., de Castro Jorge, L.A., Fatholahi, S.N., de Andrade Silva, J., Matsubara, E.T., Pistori, H., Gonçalves, W.N., Li, J., 2021. A review on deep learning in UAV remote sensing. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 102, 102456. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102456>.
25. Padilla, R., Netto, S.L., Silva, E.A.B. da, 2020. A Survey on Performance Metrics for Object-Detection Algorithms. 2020 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP) 237–242.
26. Popp, J., Peto, " K., Nagy, J., 2013. Pesticide productivity and food security. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0105-x>
27. Sensor Architecture and Task Classification for Agricultural Vehicles and Environments by Francisco Rovira-Más. Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. *Sensors* 2010, 10(12), 11226–11247; <https://doi.org/10.3390/s101211226>

28. Rovira-Más F, Banerjee R. GPS data conditioning for enhancing reliability of automated off-road vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2013;227(4):521-535. doi:10.1177/0954407012454976
29. Rovira-Más, F., Banerjee, R., 2013. GPS data conditioning for enhancing reliability of automated off-road vehicles. *J. Automob. Eng.* 227 (4), 78–92.
30. Rovira-Más, F., et al. The role of GNSS in the navigation strategies of cost-effective agricultural robots. *Comput. Electron. Agric.* (2015). <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.017>
31. Sarri, D., Martelloni, L., Rimediotti, M., Lisci, R., Lombardo, S., Vieri, M., 2019. Testing a multi-rotor unmanned aerial vehicle for spray application in high slope terraced vineyard. *J. Agric. Eng.* 50, 38–47. <https://doi.org/10.4081/jae.2019.853>.
32. Tabikha, R.M., Draz, A.K., 2022. Population Dynamics of *Capitophorus Elaeagni* (Hemiptera: Aphididae) and Its Associated Predators on Artichoke Plants in ElBehera. *Alex. Sci. Exch. J.* 43, 187–197. <https://doi.org/10.21608/asejaiqjsae.2022.230544>.
33. Van Bergeijk, J., Goense, D., Keesman, K.J., Speelman, L., 1998. Digital filters to integrate global positioning system and dead reckoning. *J. Agric. Eng. Res.* 70, 135–143.
34. Van den Berg, H., Gu, B., Grenier, B., Kohlschmid, E., Al-Eryani, S., da Silva Bezerra, H.S., Nagpal, B.N., Chanda, E., Gasimov, E., Velayudhan, R., Yadav, R.S., 2020. Pesticide lifecycle management in agriculture and public health: Where are the gaps? *Sci. Total Environ.* 742, 140598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140598>.
35. Wu, C., Ayers, P.D., Anderson, A.B., 2006. Influence of travel direction on GPS accuracy for vehicle tracking. *Trans. ASABE* 49 (3), 623–634.
36. DOP. [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://ua.wikipedia.org/wiki/DOP>
37. James, K., Bradshaw, K., 2020. Detecting plant species in the field with deep learning and drone technology. *Methods Ecol. Evol.* 11, 1509–1519. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13473>.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Універсальна поперечно-циліндрична проекція Меркатора (UTM)

Сутність проекції полягає у тому, що зображення поверхні земного еліпсоїда проектується по 6° зонам на січний циліндр, дотичний до еліпсоїда вздовж меридіану так, що вісь обертання Землі становить прямий кут з віссю циліндра (рис. А1).

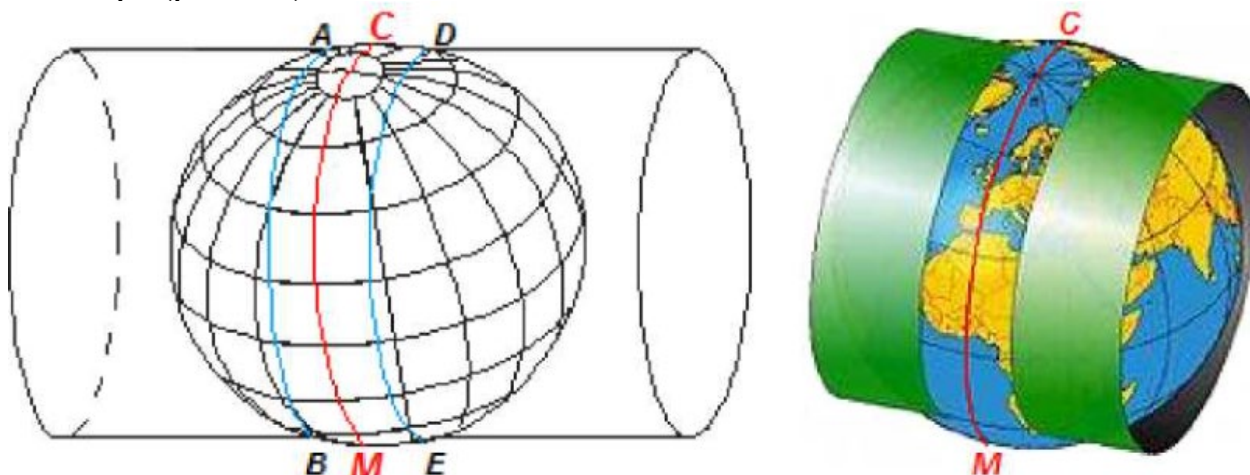


Рис. А1. Сутність проекції UTM

Проектування кожної із 60 зон проводиться на циліндр, який потім розгортають у площину так само, як і в проекції Гаусса. Різниця полягає в тому, що у проекції Гаусса циліндр дотичний до еліпсоїда по центральному (осьовому) меридіану, уздовж якого масштаб дорівнює 1, а в UTM еліпсоїд проектується на січний циліндр і масштаб уздовж січних ліній (меридіанів) теж дорівнює 1, а по центральному меридіану – 0,9996 (рис. А2).

Меридіани в проекції UTM представлені рівновіддаленими паралельними лініями. Паралелі ж являють собою паралельні лінії, відстань між якими дорівнює відстані між меридіанами на екваторі і збільшуються при наближенні до полюсів.

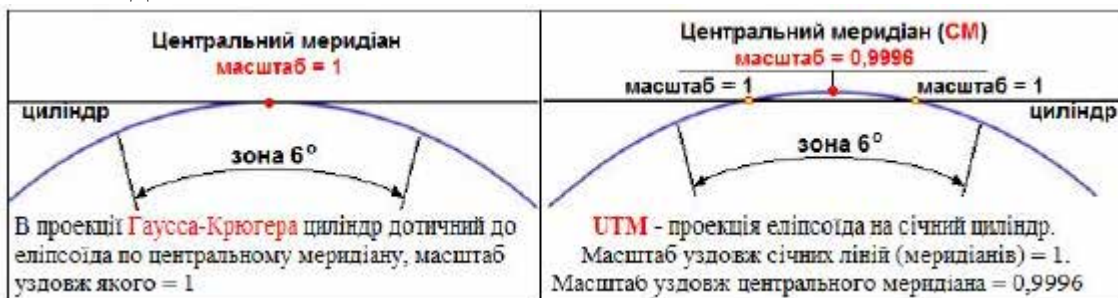


Рис. А2. Проекція зони на циліндр у проекції Гаусса і UTM

Земна поверхня на полюсах в цій проекції не може бути зображена. Тому складання карт в проекції UTM обмежують 84° пн. ш. і 80° пд. ш., що дозволяє відобразити на картах північ Гренландії, а на півдні – Південну Америку, Африку та Австралію.

ДОДАТОК Б

Супутникова система навігації (англ. *GNSS — Global Navigation Satellite System*) — комплексна електронно-технічна система, що складається з сукупності наземного та космічного обладнання та призначена для позиціонування в просторі (місцезнаходження в географічній системі координат) і в часі, а також визначення параметрів руху (швидкості, напрямку та ін.) для наземних, водних та повітряних об'єктів.

Загальні елементи супутникової системи навігації:

- Орбітальна група, що складається з декількох (від 2 до 30) штучних супутників Землі, які випромінюють спеціальні радіосигнали;
- Наземна система керування й контролю, що містить блоки вимірювання поточного положення супутників і передачі на них отриманих даних для корегування інформації про їх орбіти;
- Приймальне клієнтське обладнання (геодезичні, картографічні або навігаційні GNSS-приймачі), що використовуються для визначення координат;
- Опціонально: наземна система радіомаяків, що дозволяє значно підвищити точність визначення координат;
- Опціонально: інформаційна радіосистема для передачі користувачам поправок, які також відчутно поліпшують позиціонування.

Імпульсно-доплерівський радар — це система радіолокації, в якій визначення дальності до цілі виконується шляхом вимірювання часу затримки відбитого від неї зондуючого сигналу, а визначення швидкості цілі — по зсуву частоти відбитого сигналу, що виникає внаслідок ефекту Доплера. Такий радіолокатор поєднує в собі функції імпульсних радарів і радарів з безперервним випромінюванням, які раніше були розділені через складність спільної реалізації на елементній базі, що існувала тоді.

Інерційний вимірювальний пристрій (IMU) — це пристрій, що поєднує багатовісні датчики, акселерометри, гіроскопи та інші датчики для оцінки орієнтації об'єктів у просторі. Вимірювання прискорення, кутової швидкості та орієнтації є типовими вихідними даними. Інерційні датчики IMU зазвичай використовуються в динамічних рухах роботів і компенсації рельєфу місцевості, стабілізації платформи корисного навантаження, а також додатках для наведення антен і камер.

ДОДАТОК В

Опис протоколу NMEA 0183

NMEA 0183 (от «*National Marine Electronics Association*») – стандарт, який визначає текстовий протокол зв'язку морського (зазвичай, навігаційного) обладнання, або обладнання, яку використовується у залізничному транспорті, між собою. Набув особливої популярності із поширенням GPS-приймачів, які використовують цей стандарт.



Склад рядків протоколу NMEA 0183:

- Кожний рядок починається символом '\$'.
- Далі прописані 2 символи джерела даних і 3 символи ідентифікатора рядка.
- Після ідентифікатора прописуються дані, які складаються із певних параметрів, що розділені комою.
- Завершують рядок символ '*', 2 символи контрольної суми та символи "\r\n".

Джерело даних:

Джерело даних представлене двома символами, що прописані за символом '\$'.

GP – інформація отримана від супутників GPS (США).

GA – інформація отримана від супутників Galileo (Європа).

BD – інформація отримана від супутників Beidou (Китай).

GQ – інформація отримана від супутників QZSS (Японія).

GL – інформація отримана від супутників Глонасс (Росія).

GN – інформація отримана від супутників різних навігаційних систем.

Ідентифікатор рядка протоколу NMEA 0183:

Ідентифікатор рядка представлений трьома символами, розташованими за джерелом даних.

GGA – дані про останнє зафіксоване місцеположення.

GLL – географічні координати.

GSA – інформація про активні супутники (що приймають участь у позиціонуванні).

GSV – інформація про усі супутники, що спостерігаються в даний час.

RMC – рекомендований мінімум навігаційних даних.

VTG – швидкість та курс відносно землі.

ZDA – дата і час.

DHV – інформація про швидкість руху GNSS приймача.

GST – статистика похибок позиціонування.

TXT – текстове повідомлення.

ДОДАТОК Г

DOP – Зниження точності

DOP (*dilution of precision* із англ. — «**зниження точності**») – термін, що використовується в області *систем глобального позиціонування* для параметричного опису геометричного взаємного розташування *супутників* відносно антени приймача. Коли супутники в області видимості знаходяться надто близько один до одного, кажуть про «*слабке*» геометричне розташування (*високе значення DOP*), і навпаки, при достатній віддаленості геометрію вважають «*сильною*» (*низьке значення DOP*). Термін може використовуватися не тільки в супутниковому позиціонуванні, але і в інших системах локації.

Фактори, що впливають на зниження точності:

- орбіти супутників;
- наявність об'єктів-перешкод, які затуляють необхідні області неба;
- вплив атмосфери;
- відбиття радіохвиль.

Параметри:

HDOP (horizontal DOP) – зниження точності в горизонтальній площині;

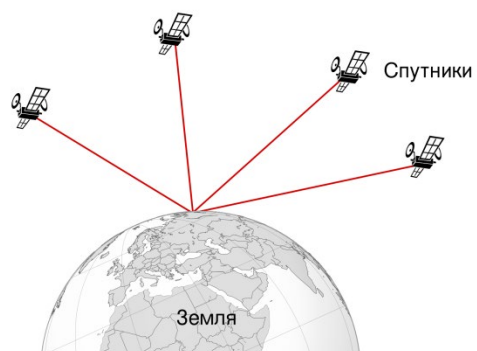
VDOP (vertical DOP) - зниження точності у вертикальній площині;

PDOP (position DOP) - зниження точності за місцеположенням;

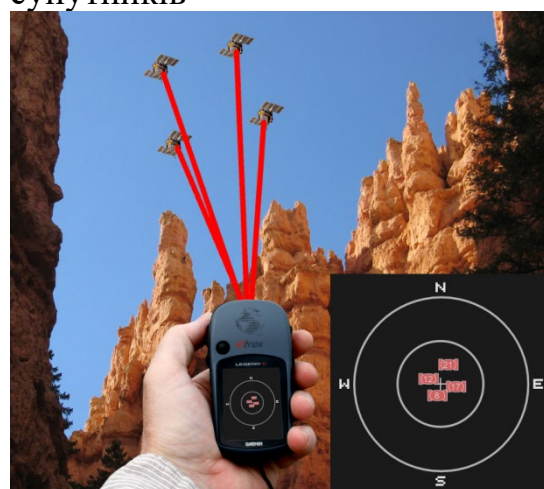
TDOP (time DOP) - зниження точності у часі;

GDOP (geometric DOP) - сумарне геометричне зниження точності за місцеположенням і часом.

Значення DOP	Точність	Опис
≤ 1	Ідеальна	Рекомендується до використання у системах, що вимагають максимально можливої точності під час її роботи
2-3	Дуже добра	Достатня точність для використання результатів вимірювань у достатньо чутливій апаратурі і програмному забезпеченні
4-6	Добра	Рекомендований мінімум для прийняття рішень по отриманим результатам. Результати можуть бути використані для достатньо точних навігаційних розпоряджень.
7-8	Середня	Результати можна використати у розрахунках, однак рекомендується намагатися підвищити точність, наприклад, за допомогою виходу на відкриту місцевість.
9-20	Нижче середнього	Результати можуть використовуватися тільки для грубого наближення місцеположення.
21-50	Погана	Початкова точність нижче половини футбольного поля. Зазвичай, такі результати можуть бути відкинуті.



Добре положення супутників



Погане положення супутників

Рис. Г1. Графічна інтерпретація точності позиціонування