

¹ Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. +380631671585, E-mail: borys.v.chetverikov@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5772-4865, 0000-0001-8677-1735, 0000-0002-6013-0873

² Кафедра картографії та геопросторового моделювання, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ORCID ID: 0000-0002-2180-5583

ТОЧНІСТЬ GPS І RTK-НАВІГАЦІЇ ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ЗМЕНШЕННЯ ПЕРЕКРИТТІВ І ВТРАТ ПІД ЧАС ПОЛЬОВИХ РОБІТ

Мета. Стаття присвячена аналізу точності GPS- та RTK-навігації та оцінці їхнього впливу на зменшення перекриттів, пропусків і технологічних втрат під час виконання польових робіт у системі точного землеробства. Основною метою дослідження є визначення ролі різних рівнів супутникової навігаційної точності у підвищенні ефективності агротехнічних операцій, зниженні витрат ресурсів і підвищенні врожайності сільськогосподарських культур. **Методи.** Використано методи аналізу супутникової навігації ГНСС, порівняльну оцінку стандартного GPS, диференціальних корекцій (SBAS, DGPS) та RTK-навігації, а також узагальнення практичних даних впровадження високоточних навігаційних систем у сільському господарстві. Дослідження базується на аналізі точності позиціонування, повторюваності траєкторій, впливу людського фактора та технічних характеристик агрегатів на якість виконання польових операцій. Оцінка ефективності проводилася за показниками перекриттів, пропусків, витрат насіння, добрив, засобів захисту рослин і продуктивності техніки. **Результати.** Встановлено, що використання стандартного GPS без корекцій забезпечує обмежену точність, недостатню для реалізації принципів точного землеробства, і призводить до значних перекриттів та пропусків. Застосування диференціальних корекцій істотно покращує точність виконання базових операцій, однак максимальний ефект досягається під час впровадження RTK-навігації, яка забезпечує сантиметрову горизонтальну та вертикальну точність. Практичні результати свідчать про зменшення перекриттів і пропусків на 9–13 %, скорочення витрат насіння і добрив на 10–20 %, підвищення продуктивності техніки та стабільну повторюваність траєкторій між сезонами. Економічний аналіз показав, що інвестиції в RTK-навігацію є найдоцільнішими для середніх і великих господарств з інтенсивними технологіями виробництва. **Практична значущість.** Отримані результати мають важливе прикладне значення для аграрних підприємств, інженерів, агрономів і менеджерів точного землеробства. Запропоновані узагальнення дають змогу обґрунтовано обирати рівень навігаційної точності залежно від масштабу господарства та типу польових робіт, оптимізувати використання ресурсів, зменшувати екологічні ризики та підвищувати економічну ефективність агровиробництва. Використання RTK-навігації формує основу для подальшої цифровізації та автоматизації сільськогосподарських технологій.

Ключові слова: точне землеробство, GPS, ГНСС, RTK-навігація, диференціальні корекції, перекриття і пропуски, польові роботи, агронавігація, ефективність агровиробництва.

Вступ

Точність навігації стала критичною для сучасного землеробства через комплекс змін у технологіях виробництва, економічних умовах та екологічних вимогах. Сучасне землеробство дедалі більше орієнтується на точне використання ресурсів, максимізацію врожайності та мінімізацію витрат, тому навіть незначні відхилення під час виконання польових операцій можуть призводити до суттєвих фінансових та екологічних втрат (Gebbers & Adamchuk, 2010; Radočaj et al., 2023; Taylor et al., 2002).

Наприклад, під час внесення добрив або засобів захисту рослин неякісне позиціонування техніки може спричинити подвійне перекриття або пропуски, що знижує ефективність використання матеріалів і підвищує витрати (Grisso et al., 2004; Sukhenko et al., 2025). Крім того, точна навігація дає змогу зменшити пошкодження посівів під час обробки ґрунту, що особливо важливо на великих полях, де навіть невеликі відхилення у маршруті трактора можуть впливати на загальний урожай.

Сучасні технології землеробства передбачають застосування автоматизованих систем керування технікою, дронів для моніторингу, датчиків для внесення ресурсів точково, а також картування полів з високою просторовою розрізненістю. Для ефективної роботи таких систем необхідне максимально точне визначення положення техніки у полі, що забезпечує використання RTK-GNSS або подібних високоточних методів навігації. Без такої точності переваги сучасного обладнання значною мірою втрачаються, а економічна доцільність інвестицій у технології стає під питанням (Ahamed et al., 2011; Reid et al., 2016; “On the importance of precise positioning...”, 2024).

Крім економічної складової, точність навігації важлива й для екологічної безпеки. Зменшення зайвого внесення добрив або пестицидів знижує ризик забруднення ґрунту та водних ресурсів, що стає особливо актуальним у країнах із жорстким законодавством щодо охорони навколишнього середовища. Висока точність дає змогу застосовувати принципи “точного землеробства” у повному обсязі, оптимізуючи витрати і одночасно підтримуючи сталість агровиробництва.

Проблема перекриттів і пропусків під час польових операцій є однією з ключових у сучасному землеробстві, оскільки вона безпосередньо впливає на ефективність використання ресурсів, якість посівів та економічну рентабельність виробництва. Перекриття відбувається тоді, коли техніка повторно обробляє одну й ту саму ділянку поля або вносить добрива та засоби захисту рослин двічі на одному місці. Це призводить до зайвих витрат на матеріали, підвищує ризик перевитрати хімічних речовин, що може негативно вплинути на стан ґрунту та навколишнє середовище (Gebbers & Adamchuk, 2010; Radočaj et al., 2023).

Пропуски виникають, коли ділянки поля залишаються необробленими або не отримують належної кількості добрив чи засобів захисту. Це безпосередньо знижує врожайність і погіршує якість продукції, оскільки рослини на таких ділянках розвиваються гірше або стають більш вразливими до шкідників і хвороб. На великих полях проблема перекриттів і пропусків стає особливо критичною, оскільки навіть незначні похибки у маршруті техніки накопичуються, збільшуючи фінансові та виробничі втрати.

Сучасні технології точного землеробства, такі як системи автоматичного керування технікою, GNSS-навігація високої точності та датчики для точкового внесення ресурсів, покликані мінімізувати ці проблеми. Вони дають змогу точно визначати положення машин на полі, планувати оптимальні маршрути та контролювати рівномірність внесення матеріалів. Без застосування таких технологій перекриття і пропуски залишаються практично неминучими, що значно знижує ефективність агровиробництва та економічну доцільність сучасних інвестицій у техніку й добрива.

GPS і RTK відіграють центральну роль у точному землеробстві, забезпечуючи високу точність визначення положення техніки та ресурсів на полі. GPS (Global Positioning System) дозволяє аграріям визначати координати з точністю до кількох метрів, що вже дає змогу планувати маршрути обробітки та контролювати основні операції. Однак для досягнення максимальної ефективності точного землеробства цієї точності часто недостатньо, особливо на великих або складних за рельєфом полях.

Система RTK (Real-Time Kinematic) суттєво підвищує точність позиціонування, зменшуючи похибку до кількох сантиметрів. Це дає змогу техніці рухатися по чітко заданих траєкторіях, мінімізуючи перекриття та пропуски під час посіву, внесення добрив, захисту рослин та інших польових операцій. Використання RTK також відкриває можливості для автоматизованого керування машинами, що зменшує людський фактор та підвищує продуктивність праці.

Завдяки GPS і RTK фермери отримують точні дані для картування полів, аналізу врожайності та застосування ресурсів з високою ефективністю. Це дає змогу економити добрива та пестициди, знижувати витрати палива та часу, а також підтримувати сталий підхід до землеробства, зменшуючи негативний вплив на ґрунт і навколишнє середовище. Отже, GPS і RTK стали фундаментальними технологіями, що роблять точне землеробство реальною і економічно доцільною практикою.

Основи супутникової навігації в сільському господарстві

Системи ГНСС (Глобальні навігаційні супутникові системи) у польових умовах працюють за принципом визначення координат приймачем на основі сигналів, що надходять від супутників. Кожен супутник передає радіосигнал із точною часовою міткою та інформацією про свою орбіту. Приймач отримує ці сигнали від кількох супутників одночасно і, використовуючи триангуляцію, розраховує своє точне положення на поверхні Землі. У польових умовах робота системи може ускладнюватися через різні фактори, такі як щільна рослинність, будівлі, рельєф місцевості та погодні умови, які можуть затримувати або відбивати сигнали супутників. Для підвищення точності та надійності роботи застосовують спеціальні алгоритми обробки сигналу, а також додаткові технології, такі як диференціальні корекції (“A Low-Cost Global Navigation...”, 2022; Gao & Shen, 2002; “Centimetre-precision guidance...”, 1998).

Відмінності між стандартним GPS, диференціальними сигналами та RTK полягають у точності та способі опрацювання даних (рис. 1). Стандартний GPS використовує сигнали супутників для визначення

координат, але його похибка зазвичай коливається в межах кількох метрів через атмосферні спотворення, похибки годинника супутника та інші фактори. Диференціальні сигнали (DGPS) підвищують точність, використовуючи наземні опорні станції, які вимірюють похибки супутникових сигналів у відомих координатах і передають ці корекції до польових приймачів. RTK (Real-Time Kinematic) забезпечує ще вищу точність,

використовуючи не лише диференціальні корекції, а й фазову обробку несучої хвилі сигналу супутника, що дає змогу досягати сантиметрової точності в реальному часі. RTK є особливо важливим для точного землеробства, будівництва та картографування, де навіть невелике зміщення може призвести до значних втрат або помилок (Ahamed et al., 2011; Huang et al., 2022; “Tractor-based RTK-GPS...”, 2012).

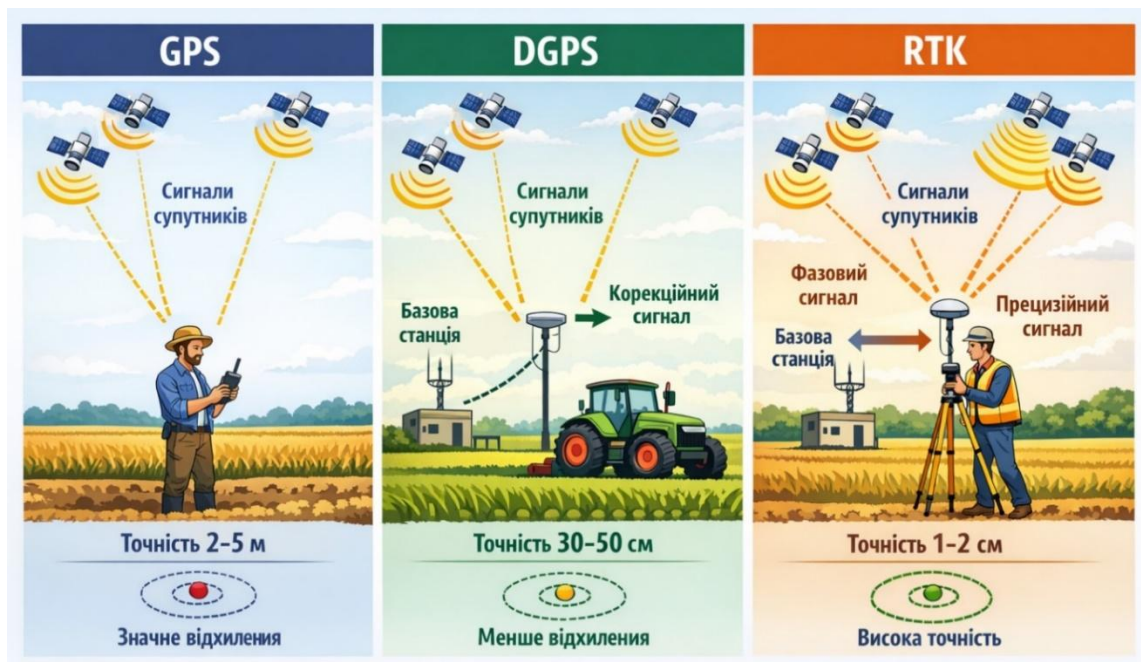


Рис. 1. Зображення роботи GPS, DGPS і RTK у польових умовах

Поняття горизонтальної та повторюваної точності описує якість позионування. Горизонтальна точність відображає, наскільки точно система визначає положення об'єкта на площині Землі, зазвичай у метрах або сантиметрах. Вона показує, наскільки виміряна точка відповідає реальному положенню на місцевості. Повторювана точність характеризує стабільність системи за багаторазового вимірювання тієї самої точки: якщо приймач кілька разів вимірює одне й те саме місце, повторювана точність показує, наскільки близькі отримані координати одна до одної. Для польових робіт високий рівень повторюваної точності особливо важливий, оскільки він забезпечує узгодженість даних і дає змогу виконувати роботи з мінімальними перекриттями, пропусками та помилками (Reid et al., 2016; “Centimetre-precision guidance...”, 1998).

Рівні точності навігаційних систем

Типові показники точності без корекції характеризуються значними обмеженнями для використання у точному землеробстві. Стандартна навігація ГНСС без застосування додаткових корекційних сигналів забезпечує горизонтальну точність на рівні приблизно 2–5 метрів за умов відкритої місцевості та стабільного

прийому сигналу супутників (“A Low-Cost Global Navigation...”, 2022; “Positioning Accuracy Comparison...”, 2023). Вертикальна точність зазвичай вдвічі нижча та становить приблизно 3–10 метрів. Така похибка робить неможливим виконання високоточних операцій у полі, оскільки навіть незначне відхилення призводить до перекриттів або пропусків у внесенні ресурсів і технологічних операціях, що суттєво знижує ефективність агровиробництва.

Використання систем SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems), таких як EGNOS або WAAS, дає змогу значно покращити точність стандартного GPS-сигналу завдяки диференціальним корекціям, що передаються через геостационарні супутники. Горизонтальна точність під час використання SBAS зазвичай є в межах 0,5–2 метрів, що вже дозволяє виконувати більшість базових агротехнічних операцій з порівняно низьким рівнем перекриттів і пропусків. Комерційні платні сервіси диференціальних корекцій, наприклад Network RTK або VRS, забезпечують ще вищу точність, зменшуючи похибку до 10–20 см горизонтально і до 15–30 см вертикально. Це дає змогу виконувати точні операції, такі як внесення добрив або посів із високою ефективністю.

RTK-навігація є найточнішим варіантом сучасного ГНСС-знімання і забезпечує сантиметрову точність як у горизонтальній, так і у вертикальній площині. RTK-система використовує сигнал базової станції для формування реального часу диференційних поправок, що дає змогу отримати точність на рівні 1–3 см горизонтально та 2–5 см вертикально. Така висока точність критично важлива для високотехнологічного землеробства, оскільки дає змогу суттєво зменшити витрати ресурсів, підвищити однорідність обробки полів і знизити ризик технологічних помилок.

Повторюваність траєкторій між сезонами є ключовим показником стабільності навігаційних систем у довгостроковій перспективі. Високоточні системи з RTK-корекціями здатні забезпечувати повторюваність траєкторії на рівні 2–5 см навіть під час зміни супутникових конфігурацій і погодних умов. Це дає змогу агровиробникам проводити багаторічні експерименти, оптимізувати сівозміни та впроваджувати точне внесення ресурсів на основі даних попередніх сезонів, зберігаючи ідентичність маршрутів і технологічних операцій (табл. 1).

Таблиця 1

Типи точності ГНССу землеробстві

Тип навігації / корекції	Горизонтальна точність	Вертикальна точність	Особливості	Рекомендоване застосування
Без корекції (стандартний GPS)	2–5 м	3–10 м	Виконання базових польових операцій обмежене; високі перекартти та пропуски	Загальна орієнтація на полі, контроль тракторів, просте обстеження полів
SBAS (EGNOS, WAAS)	0,5–2 м	1–3 м	Підвищена точність; дозволяє більшість агротехнічних операцій з меншими втратами	Базове внесення добрив, обприскування, посів із середньою точністю
Платні диференційні корекції (Network RTK, VRS)	10–20 см	15–30 см	Висока точність для точного внесення ресурсів та посіву	Точне внесення добрив та ЗЗР, рядковий посів, контурна обробка полів
RTK-навігація	1–3 см	2–5 см	Сантиметрова точність; критично важлива для високоточного землеробства	Суперточний посів і внесення добрив, керування роботизованою технікою, оптимізація ресурсів
Повторюваність траєкторій між сезонами (RTK)	2–5 см	2–5 см	Дозволяє багаторічні експерименти та ідентичність технологічних операцій	Мультисезонне планування полів, моніторинг урожайності, повторне застосування точних технологій

Причини виникнення перекарттів і втрат у польових роботах

Людський фактор під час ручного водіння є одним із основних джерел похибок у виконанні польових операцій. Навіть досвідчені оператори тракторів або обприскувачів можуть допускати відхилення від заданої траєкторії через фізичну втому, втрату концентрації або психологічні чинники. Такі відхилення призводять до перекарттів або пропусків під час внесення добрив і ЗЗР, що знижує ефективність агротехнічних операцій та збільшує витрати матеріальних ресурсів.

Обмежена видимість та складні умови роботи суттєво впливають на точність виконання технологічних процесів. Наявність пилу, туману, дощу або сонячної засвітки обмежує поле зору оператора і підвищує ризик помилок у позиціонуванні агрегатів на полі. Також робота в умовах нерівного рельєфу або на

великих площах без чітких орієнтирів значно ускладнює підтримання стабільної прямолінійної траєкторії, що збільшує ймовірність технологічних втрат.

Нерівні контури полів і складна конфігурація загонів є додатковим чинником, який ускладнює точне водіння. Площі з вигинами, складними формами або численними перешкодами потребують частого маневрування, що призводить до локальних перекарттів або пропусків у роботі агрегатів. Такі умови зменшують ефективність обробки полів і підвищують витрати палива та матеріалів (табл. 2).

Вплив ширини захвату агрегатів на точність також є важливим чинником. Широкозахватні машини потребують більш точного позиціонування, оскільки навіть незначне відхилення на кілька сантиметрів на великій ширині призводить до суттєвих перекарттів або пропусків. Навпаки, агрегати з меншим захватом більш гнучкі у маневруванні, проте зменшення ширини

захвату може знижувати продуктивність, що потребує компромісного підходу між точністю та ефективністю.

Вплив точності GPS і RTK на різні польові операції

Посів з дотриманням міжряддя є критичною операцією в сучасному точному землеробстві, оскільки правильне розташування насіння визначає рівномірність росту рослин, оптимізацію використання ресурсів

і потенційний урожай. Невідповідність міжряддя або відхилення від заданої траєкторії призводять до перекриттів або пропусків, що негативно впливає на густоту стояння рослин та ефективність використання площі. Використання високоточних систем навігації, таких як RTK, допомагає забезпечити дотримання міжряддя з точністю до кількох сантиметрів, що критично для рядкового посіву культур з високими вимогами до щільності.

Таблиця 2

Оцінка впливу людського фактора та умов роботи на точність польових операцій

Фактор впливу	Типові похибки	Особливості	Рекомендоване застосування / заходи
Людський фактор під час ручного водіння	20–100 см горизонтально	Втома, втрата концентрації, психологічні чинники	Використання автопілотів, GPS/RTK-навігації для зменшення помилок; навчання операторів
Обмежена видимість та складні умови роботи	30–150 см горизонтально	Туман, дощ, пил, сонячна засвітка знижують видимість	Планування роботи за сприятливих погодних умов; системи моніторингу та сигналізації
Нерівні контури полів і складна конфігурація загонів	10–50 см локальні відхилення	Маневрування на вигнутих або маленьких ділянках	Використання GPS-навігації для точного повторного проходу; адаптивне програмування траєкторій
Вплив ширини захвату агрегатів	5–40 см відхилення по краях захвату	Широкі агрегати посилюють ефект перекриттів; вузькі – знижують продуктивність	Оптимізація ширини захвату під точність і продуктивність; комбінування з навігаційними системами

Внесення мінеральних добрив і засобів захисту рослин потребує високої точності, оскільки неправильне дозування або розподіл матеріалів може призвести до локального дефіциту або надлишку поживних речовин і хімікатів. Похибки в позиціонуванні агрегатів під час внесення можуть спричинити перекриття, що підвищує витрати ресурсів та шкодить довкіллю, або пропуски, які зменшують ефективність захисту рослин. Точні навігаційні системи та автоматизовані системи контролю внесення дозволяють забезпечити рівномірний розподіл ресурсів по всій площі поля.

Механічний обробіток ґрунту, включно з оранкою, дискуванням або культивуванням, потребує стабільного проходу агрегатів по заданих траєкторіях для рівномірної обробки поверхні та збереження структури

ґрунту. Похибки водіння або відхилення траєкторії призводять до нерівномірного обробітку, локального ущільнення або недобору обробленої площі, що може знизити ефективність наступних технологічних операцій і вплинути на врожайність.

Збирання врожаю та формування карт урожайності є завершальним етапом виробничого циклу, який потребує точного проходу агрегатів для мінімізації втрат продукції. Сучасні комбайни з GPS-навігацією та сенсорними системами врожайності дають змогу формувати карти врожайності з високою просторовою роздільною здатністю (табл. 3). Ці карти є основою для аналізу продуктивності полів, корекції агротехнічних заходів та впровадження диференційованого внесення добрив і ЗЗР у наступні сезони (рис. 2).

Таблиця 3

Оцінка впливу точності виконання технологічних операцій на ефективність польових робіт

Технологічна операція	Типові похибки / відхилення	Особливості	Рекомендоване застосування / заходи
1	2	3	4
Посів з дотриманням міжряддя	1–5 см за RTK, 10–50 см без корекції	Відхилення впливають на густоту стояння рослин і рівномірність поля	Використання RTK-навігації та автопілотів; контроль міжряддя сенсорами

Продовження табл. 3

1	2	3	4
Внесення мінеральних добрив і ЗЗР	2–20 см горизонтально, локальні перекриття / пропуски	Невідповідність дозування призводить до витрат матеріалів і нерівномірного захисту	Автоматизовані системи внесення; GPS-навігація для стабільних проходів
Механічний обробіток ґрунту	5–30 см відхилення від заданих траєкторій	Нерівномірна обробка спричиняє ущільнення або недообробку ґрунту	Навігація та планування траєкторій; контроль глибини і ширини захвату агрегатів
Збирання врожаю та формування карт урожайності	1–10 см, локальні втрати продукції	Точність важлива для мінімізації втрат і формування якісних карт урожайності	Використання GPS/RTK-навігації, сенсорів врожайності; постопрацювання даних для аналізу поля

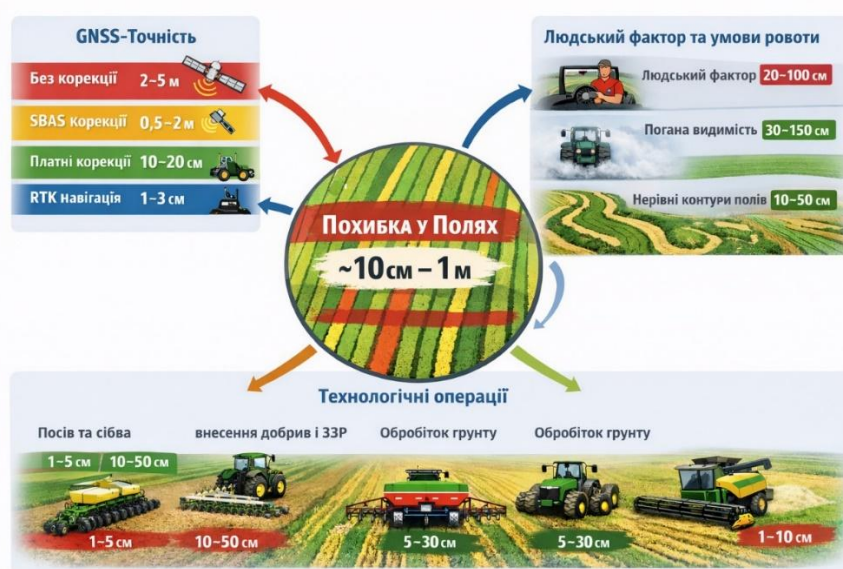


Рис. 2. Загальна комбінована схема, де показані всі фактори похибок

Практичні приклади впровадження RTK-навігації

Після впровадження RTK-навігації в сільському господарстві зазвичай спостерігається суттєве покращення точності виконання польових операцій та загальної ефективності виробничих процесів. Одним із ключових результатів є значне зменшення перекриттів та пропусків під час виконання основних агротехнічних операцій, таких як посів, внесення мінеральних добрив, обробіток ґрунту та застосування засобів захисту рослин. Зниження технологічних втрат дає змогу більш раціонально використовувати матеріальні ресурси, скоротити витрати на насіння, добрива та ЗЗР і підвищити економічну ефективність господарства. Крім того, точність позиціонування RTK забезпечує можливість створення високоточних карт виконаних робіт, що дає змогу аналізувати ефективність технологій на рівні окремих полів і ділянок, оптимізувати розподіл ресурсів та приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо агротехнічних заходів у наступні вегетаційні періоди.

Впровадження RTK-технологій сприяє також помітним змінам у технологічній дисципліні господарств. Використання систем високоточної навігації зумовлює необхідність суворого дотримання встановлених параметрів міжрядь, ширини обробки і глибин посіву або внесення добрив, що значно зменшує ймовірність механічного пошкодження рослин та забезпечує рівномірність обробітку. Працівники господарств отримують нові професійні компетенції, пов'язані з експлуатацією і калібруванням обладнання, моніторингом показників точності та контролем виконання польових робіт у режимі реального часу. Це змінює організацію польових операцій: планування робіт стає більш точним, з'являється можливість автоматизованого контролю технологічних процесів, а також оцінки ефективності конкретних агротехнічних заходів на основі зібраних даних.

Разом із очевидними перевагами впровадження RTK також супроводжується певними типовими помилками, які можуть значно знижувати ефективність технології. Найпоширенішою проблемою є недостатній рівень

підготовки персоналу, що проявляється у неправильному налаштуванні обладнання, некоректному визначенні початкових точок та порушенні маршрутів руху техніки. Часто недооцінюють необхідність регулярного обслуговування системи, її калібрування та контролю за рівнем сигналу базової станції, що може призвести до зниження точності позиціонування. Іншою характерною помилкою є недостатнє інтегрування RTK-навігації у загальну систему управління господарством, коли отримані дані не використовуються для планування

та аналізу технологічних операцій, що обмежує потенційні вигоди від використання високоточних технологій. Також спостерігаються випадки перевантаження техніки або використання RTK у складних географічних умовах без врахування рельєфу та властивостей ґрунтів, що може призводити до нерівномірного обробітку, пошкодження посівів і втрат врожайності.

Нижче наведена узагальнена таблиця, що ілюструє типові ефекти впровадження RTK у господарствах (табл. 4).

Таблиця 4

Узагальнена таблиця, що ілюструє типові ефекти впровадження RTK у господарствах

Показник	До RTK	Після RTK	Відсоткове покращення
Перекриття посіву	12–15 %	2–3 %	–10–13 %
Пропуски у посіві	10–12 %	1–2 %	–9–10 %
Витрати насіння	100 %	85–90 %	–10–15 %
Витрати добрив	100 %	80–90 %	–10–20 %
Втрати врожайності	0–8 %	0–2 %	–6 %
Продуктивність техніки	100 %	110–115 %	+10–15 %
Час на виправлення помилок	100 %	70–80 %	–20–30 %

Економічна доцільність використання GPS і RTK

Впровадження RTK-навігації потребує значних початкових інвестицій в обладнання та програмне забезпечення. Орієнтовні витрати передбачають придбання GNSS-приймачів високої точності, базових станцій, контролерів для тракторів та обприскувачів, а також підписки на сервісні оновлення і диференціальні сигнали RTK. За даними практичних досліджень, середня вартість комплексу обладнання для одного агрегату коливається від 30 000 до 70 000 доларів США, а щорічна підписка на базову RTK-станцію становить приблизно 2 000 – 4 000 доларів. Вартість інтеграції обладнання на всі агрегати господарства залежить від масштабу і кількості машин, що робить RTK більш доцільним для середніх і великих господарств із розвинутою технічною базою. Термін окупності інвестицій у RTK залежить від кількості техніки, площі оброблюваних полів, культури, технології внесення ресурсів та рівня початкової точності польових робіт.

За умов економії насіння, добрив, ЗЗР та скорочення технологічних втрат окупність інвестицій для середніх і великих господарств може становити від 2 до 4 років. Для менших господарств із обмеженою кількістю техніки термін окупності може бути тривалішим, а ефект від впровадження менш відчутним через меншу економію ресурсів та обмежений масштаб операцій.

RTK-навігація є найбільш виправданою для господарств, які обробляють великі площі, використовують високопродуктивну техніку, застосовують інтенсивні технології вирощування культур та прагнуть оптимізувати витрати на матеріальні ресурси. Також RTK доцільний для господарств, що здійснюють точкове диференційоване внесення добрив та ЗЗР, створюють карти врожайності та використовують дані для агрохімічного аналізу та планування майбутніх польових робіт.

Нижче наведено узагальнену таблицю для наочного порівняння ключових показників фінансової доцільності та окупності RTK (табл. 5).

Таблиця 5

Узагальнена таблиця для наочного порівняння ключових показників фінансової доцільності та окупності RTK

Показник	Орієнтовне значення	Коментар
1	2	3
Вартість обладнання (за агрегат)	30 000–70 000 \$	GNSS-приймач, контролер, базова станція
Щорічна підписка	2 000–4 000 \$	Підтримка диференціальних сигналів RTK

Продовження табл. 5

1	2	3
Термін окупності	2–4 роки	Для середніх і великих господарств
Доцільність для господарств	Висока	Великі площі, інтенсивні технології, високопродуктивна техніка
Доцільність для господарств	Середня	Середні площі, обмежена кількість агрегатів
Доцільність для господарств	Низька	Малі господарства з низьким рівнем механізації

Висновки

Використання RTK-навігації у сільському господарстві забезпечує значне підвищення точності виконання польових операцій. До основних переваг належать зменшення перекриттів і пропусків під час посівів, внесення мінеральних добрив та застосування засобів захисту рослин, що дає змогу економно використовувати матеріальні ресурси та підвищувати врожайність культур. Високоточне позиціонування забезпечує можливість формування детальних карт виконаних робіт та картографічної бази даних для подальшого аналізу продуктивності полів. RTK-технологія сприяє підвищенню технологічної дисципліни, забезпечує рівномірність міжрядь і ширини обробки, зменшує час на виправлення помилок та підвищує продуктивність агрегатів.

Впровадження RTK-навігації безпосередньо впливає на економічну ефективність господарств. Зменшення технологічних втрат насіння, добрив і засобів захисту рослин дає змогу скоротити витрати на 10–20 %, водночас зберігаючи або підвищуючи врожайність культур на 5–12 % залежно від типу культури та умов вирощування. Висока повторювана точність забезпечує стандартизовану якість виконання польових робіт і дає змогу господарствам здійснювати точковий аналіз ефективності агротехнічних заходів. Це сприяє сталому використанню ресурсів, підвищенню продуктивності техніки та оптимізації виробничих процесів, що забезпечує конкурентоспроможність господарства на ринку.

Перспективи розвитку RTK та інших високоточних навігаційних систем полягають у подальшій інтеграції з цифровими платформами управління господарствами, автоматизації агротехнічних операцій та застосуванні систем штучного інтелекту для аналізу польових робіт. Очікується зростання доступності технологій для середніх і малих господарств через зменшення вартості обладнання та оптимізації сервісних підписок. Майбутній розвиток навігаційних систем передбачає підвищення точності позиціонування до субсантиметрового рівня, інтеграцію з безпілотними агрегатами та платформами точного внесення ресурсів, що дасть змогу реалізувати концепцію повністю цифрового та автоматизованого агропромисловництва, підвищуючи його ефективність та екологічну стійкість.

Список літератури

- A Low-Cost Global Navigation Satellite System Positioning Accuracy Assessment for Agricultural Machinery. (2022). *Applied Sciences*, 12(2), 693. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12020693>
- Ahamed, T., Tian, L., Takigawa, T., & Zhang, W. (2011). Navigation and control of agricultural vehicles using RTK-GPS. *Biosystems Engineering*, 110(4), 393–404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.09.010>
- Centimetre-precision guidance of moving implements in the open field: A simulation based on GPS measurements. (1998). *Computers and Electronics in Agriculture*, 20(3), 185–197. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(98\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(98)00016-7)
- Gao, Y., & Shen, X. (2002). A new method for carrier-phase-based precise point positioning. *Navigation*, 49(2), 109–116. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2002.tb00265.x>
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- Grisso, R. D., Kocher, M. F., & Vaughan, D. H. (2004). Predicting tractor field efficiency. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(5), 553–561. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.17466>
- Huang, Y., Fu, J., Xu, S., Han, T., & Liu, Y. (2022). Research on integrated navigation system of agricultural machinery based on RTK-BDS/INS. *Agriculture*, 12(8), 1169. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12081169>
- On the importance of precise positioning in robotised agriculture. (2024). *Remote Sensing*, 16(6), 985. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16060985>
- Positioning Accuracy Comparison of GNSS Receivers Used for ... (2023). *Agronomy*, 10(7), 924. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10070924>
- Radočaj, D., Plaščak, I., & Jurić, M. (2023). Global Navigation Satellite Systems as state-of-the-art solutions in precision agriculture: A review of studies indexed in the Web of Science. *Agriculture*, 13(7), 1417. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13071417>

- Reid, T. G. R., et al. (2016). Localization requirements for autonomous vehicles. *SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles*, 1(1), 173–190. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0143>
- Sukhenko, A., Meirambekuly, N., Syzdykov, A., Mukhamedgali, A., & Mellatova, Y. (2025). GNSS for high-precision and reliable positioning: A review of correction techniques and system architectures. *Applied Sciences*, 15(22), 12304. DOI: <https://doi.org/10.3390/app152212304>
- Taylor, R. K., Schrock, M. D., & Staggenborg, S. A. (2002). Using GPS technology to control traffic patterns. *Applied Engineering in Agriculture*, 18(2), 185–191. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.7789>
- Tractor-based real-time kinematic-global positioning system (RTK-GPS) guidance system for geospatial mapping of row crop transplant. (2012). *Biosystems Engineering*, 111(1), 64–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.009>

L. BABIY¹, M. YURKIV², B. CHETVERIKOV¹, Kh. BURSHTYNSKA¹

¹ Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, Phone: +380631671585, E-mail: borys.v.chetverikov@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5772-4865, 0000-0001-8677-1735, 0000-0002-6013-0873

² Department of Cartography and Geospatial Modeling, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-2180-5583

ACCURACY OF GPS AND RTK NAVIGATION AND THEIR IMPACT ON REDUCING OVERLAPS AND LOSSES DURING FIELD OPERATIONS

Purpose. The article is devoted to the analysis of the accuracy of GPS and RTK navigation and to the assessment of their impact on reducing overlaps, skips, and technological losses during field operations within precision agriculture systems. The main purpose of the study is to determine the role of different levels of satellite navigation accuracy in improving the efficiency of agricultural operations, reducing resource consumption, and increasing crop yields. **Methods.** The study employs methods of GNSS satellite navigation analysis, a comparative assessment of standard GPS, differential corrections (SBAS, DGPS), and RTK navigation, as well as the generalization of practical data on the implementation of high-precision navigation systems in agriculture. The research is based on the analysis of positioning accuracy, trajectory repeatability, the influence of the human factor, and the technical characteristics of agricultural implements on the quality of field operations. Efficiency was evaluated using indicators of overlaps, skips, seed, fertilizer, and plant protection product consumption, as well as machinery productivity. **Results.** It was established that the use of standard GPS without corrections provides limited accuracy that is insufficient for the implementation of precision agriculture principles and leads to significant overlaps and skips. The application of differential corrections significantly improves the accuracy of basic operations; however, the maximum effect is achieved with the implementation of RTK navigation, which provides centimeter-level horizontal and vertical accuracy. Practical results demonstrate a reduction in overlaps and skips by 9–13%, a decrease in seed and fertilizer consumption by 10–20%, increased machinery productivity, and stable trajectory repeatability between seasons. Economic analysis showed that investments in RTK navigation are most justified for medium and large farms employing intensive production technologies. **Practical significance.** The obtained results have important practical value for agricultural enterprises, engineers, agronomists, and precision agriculture managers. The proposed generalizations enable a well-grounded selection of navigation accuracy levels depending on farm size and the type of field operations, optimization of resource use, reduction of environmental risks, and improvement of the economic efficiency of agricultural production. The use of RTK navigation forms the basis for further digitalization and automation of agricultural technologies.

Keywords: precision agriculture, GPS, GNSS, RTK navigation, differential corrections, overlaps and skips, field operations, agri-navigation, efficiency of agricultural production.

References

- A Low-Cost Global Navigation Satellite System Positioning Accuracy Assessment for Agricultural Machinery. (2022). *Applied Sciences*, 12(2), 693. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12020693>
- Ahamed, T., Tian, L., Takigawa, T., & Zhang, W. (2011). Navigation and control of agricultural vehicles using RTK-GPS. *Biosystems Engineering*, 110(4), 393–404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.09.010>
- Centimetre-precision guidance of moving implements in the open field: A simulation based on GPS measurements. (1998). *Computers and Electronics in Agriculture*, 20(3), 185–197. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(98\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(98)00016-7)

- Gao, Y., & Shen, X. (2002). A new method for carrier-phase-based precise point positioning. *Navigation*, 49(2), 109–116. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2002.tb00265.x>
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- Grisso, R. D., Kocher, M. F., & Vaughan, D. H. (2004). Predicting tractor field efficiency. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(5), 553–561. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.17466>
- Huang, Y., Fu, J., Xu, S., Han, T., & Liu, Y. (2022). Research on integrated navigation system of agricultural machinery based on RTK-BDS/INS. *Agriculture*, 12(8), 1169. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12081169>
- On the importance of precise positioning in robotised agriculture. (2024). *Remote Sensing*, 16(6), 985. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16060985>
- Positioning Accuracy Comparison of GNSS Receivers Used for ... (2023). *Agronomy*, 10(7), 924. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10070924>
- Radočaj, D., Plaščak, I., & Jurišić, M. (2023). Global Navigation Satellite Systems as state-of-the-art solutions in precision agriculture: A review of studies indexed in the Web of Science. *Agriculture*, 13(7), 1417. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13071417>
- Reid, T. G. R., et al. (2016). Localization requirements for autonomous vehicles. *SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles*, 1(1), 173–190. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0143>
- Sukhenko, A., Meirambekuly, N., Syzdykov, A., Mukhamedgali, A., & Mellatova, Y. (2025). GNSS for high-precision and reliable positioning: A review of correction techniques and system architectures. *Applied Sciences*, 15(22), 12304. DOI: <https://doi.org/10.3390/app152212304>
- Taylor, R. K., Schrock, M. D., & Staggenborg, S. A. (2002). Using GPS technology to control traffic patterns. *Applied Engineering in Agriculture*, 18(2), 185–191. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.7789>
- Tractor-based real-time kinematic-global positioning system (RTK-GPS) guidance system for geospatial mapping of row crop transplant. (2012). *Biosystems Engineering*, 111(1), 64–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.009>