

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Петрівний О. І., к.т.н.

Супутникові навігаційні системи дозволяють любому користувачу на суші, на морі та у повітрі визначати своє місцеположення з достатньо високою точністю. Більше 200 іноземних фірм пропонують свою навігаційну апаратуру, технічні і цінові характеристики яких суттєво відрізняються, а рекламні проспекти та наявна технічна документація не дозволяють уявити причини цієї різниці.

Отже, існує необхідність аналізу точності визначення місцеположення супутникових навігаційних систем, що пропонуються іноземними фірмами.

Для визначення місцеположення машино-тракторних агрегатів (МТА) на земній поверхні в географічній системі координат (λ , φ , H) використовуються наступні операції:

1. Навігаційні супутники постійно передають в ефір радіоповідомлення (табл.1), які містять його координати X_i , Y_i , Z_i в прямокутній системі координат відносно центра Землі, а також час передачі повідомлення $t_{ві}$ (це обов'язково, тому що супутники змінюють своє місце на орбіті з швидкістю приблизно 3 км/с).

Приймальний пристрій апаратури користувача приймає ці повідомлення, декодує їх та передає на навігаційний процесор (рис.1).

2. Приймач користувача приймає також кодовані псевдовипадковими послідовностями радіосигнали супутників, обробляє їх за допомогою кореляторів та процесора і визначає дальності (відстані) від навігаційних космічних апаратів (НКА) до МТА.

$$D_i = C \times T_i, \quad (1),$$

де $C=300000$ км/с = 3×10^8 м/с – швидкість розповсюдження радіохвиль; $T_i = t_{при} - t_{ві}$, $t_{при}$ – час прийому сигналу приймачем користувача.

3. Після прийому і обробки сигналів від усіх «хороших» супутників (їх повинно бути не менш 4-ех) процесор користувача складає систему рівнянь для визначення місцеположення МТА в прямокутній системі координат XYZ :

$$\begin{aligned} D_1 &= \sqrt{(X-X_1)^2 + (Y-Y_1)^2 + (Z-Z_1)^2} + c \times T', \\ D_2 &= \sqrt{(X-X_2)^2 + (Y-Y_2)^2 + (Z-Z_2)^2} + c \times T', \\ D_3 &= \sqrt{(X-X_3)^2 + (Y-Y_3)^2 + (Z-Z_3)^2} + c \times T', \\ D_i &= \sqrt{(X-X_i)^2 + (Y-Y_i)^2 + (Z-Z_i)^2} + c \times T', \end{aligned} \quad (2),$$

де $i \geq 4$, чим більше рівнянь (прийнято сигналів від супутників), тим точніше будуть визначені координати МТА; X_i , Y_i , Z_i – відомі прямокутні координати відносно центра Землі i -того супутника в момент $t_{ві}$ (див.п.1); D_i - дальність від i -того НКА до МТА, що виміряна (див.п.2); X , Y , Z – прямокутні координати МТА, які потрібно знайти за допомогою рішення системи рівнянь; T' - поправка часу (систематична похибка часів МТА відносно часів НКА. Бортовий комп'ютер МТА має всього лиш кварцові часи, відносна похибка яких до 10^{-6} , а точність визначення часу навігаційних супутників значно вище, тому що вони мають часи атомні, які ще корегуються з наземного центру керування системою GPS, відносна похибка яких знаходиться у межах $10^{-11} \dots 10^{-13}$.

Надалі навігаційний процесор МТА шукає розв'язок нелінійної системи рівнянь (2) ітераційним методом, тобто визначає прямокутні координати МТА X , Y , Z і поправку часу T' .

4. Потім по розрахованим прямокутним координатам МТА X , Y , Z визначаються географічні координати λ , φ , H за допомогою системи рівнянь

$$\begin{aligned} X &= (N+H) \times \cos\varphi \times \cos\lambda, \\ Y &= (N+H) \times \cos\varphi \times \sin\lambda, \\ Z &= [(1 - e^2) \times N + H] \times \sin\varphi, \end{aligned} \quad (3),$$

де N і e^2 - параметри моделі Землі, яка вважається еліпсоїдом Красовського. Ці параметри визначаються за формулами $e^2 = 2a - a^2$, $N = b(1 - e^2 \sin^2\varphi)^{-1/2}$, a – коефіцієнт стиснення еліпсоїда.

Зміст навігаційних повідомлень НКА

№ блоку (формату)	Зміст
1	Часові поправки, поправки для двочастотної іоносферної корекції
2	Ефемериди – координати
3	Ефемериди – координати
4	Альманах НКА, характеристики їх радіосигналів і траєкторій
5	Ознаки роботоздатності НКА
6	Резервне повідомлення
7	Резервне повідомлення
8	Параметри UTC іоносферної моделі
9	Ознаки A/S і роботоздатності НКА
10	Службове повідомлення
11	Резервне повідомлення

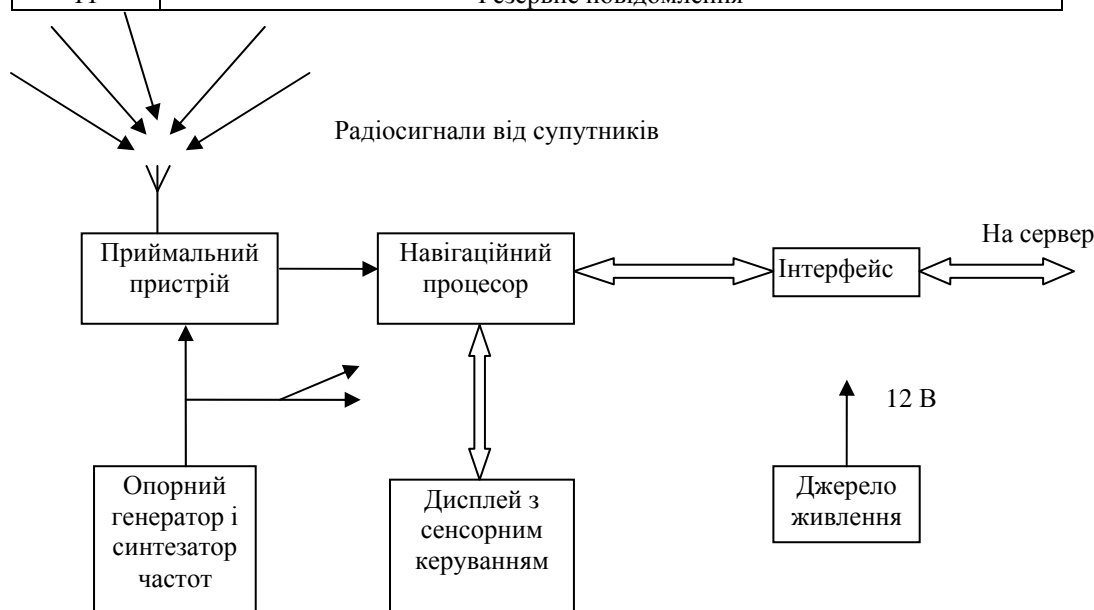


Рис. 1. Апаратура користувача GPS

На точність навігаційних та часових розрахунків супутникових навігаційних систем впливає безліч факторів. Їх можна поділити на три категорії:

- похибки, які вносяться підсистемою навігаційних супутників та підсистемою контролю і керування цими супутниками (космічні складові);
- похибки, які вносяться на трасі розповсюдження радіосигналів від навігаційних супутників до машино-тракторних агрегатів;
- похибки, які вносяться апаратурою користувача.

Космічні складові (ефемерідні) похибок пов'язані з неточністю визначення параметрів орбіт НКА, а також із непередбачуваним зміщенням положення супутників на орбіті через різні збурюючі фактори. За різними оцінками ефемерідні похибки становлять 0,6...10 м [1]. Похибки частотно – часового забезпечення зводяться до мінімуму завдяки застосуванню високоточних атомних еталонів часу на борту НКА ($\delta t = 10^{-13}$ с). Космічні похибки постійно контролює центр керування системою GPS і при необхідності включає двигуни НКА для корекції орбіт та корегує атомні часи відносно еталонних часів державної служби єдиного часу ($\delta t = 10^{-14}$ с). Похибки на трасі розповсюдження радіохвиль виникають на атмосферній ділянці траси, в іоносфері радіопромінь викривляється, а в тропосфері швидкість його розповсюдження зменшується.

Атмосферу поділяють на дві області: тропосферу – до висоти 10 км у середніх, до 20 км в екваторіальних і до 7 км у полярних широтах та іоносферу – ту частину, яка розміщується вище за тропосферу. Іоносфера характеризується наявністю великої

кількості вільних електричних зарядів – електронів та іонів, які знаходяться в магнітному полі Землі. Якщо магнітне поле не збурене, то верхня межа атмосфери розташовується на висоті двох-трьох земних радіусів ($R = 6370$ км). У разі збуреного магнітного поля верхня межа атмосфери збільшується до 20-ти земних радіусів.

Швидкість ЕМХ уздовж траси «НКА-споживач» під час проходження крізь атмосферу відрізняється від швидкості світла у вільному просторі. Це розходження швидкостей і призводить до похибок у навігаційних розрахунках псевдодальності. Зміна швидкості поширення ЕМХ під час проходження крізь атмосферу зумовлена зміною і неоднорідністю діелектричної проникливості атмосфери. Характер тропо-та іоносферних похибок різний, тому в СРНС для корекції похибок використовують дві окремих моделі – тропосферну та іоносферну. Застосування тропосферної моделі дає змогу визначати затримку сигналу з похибками в декілька наносекунд, а без використання моделі похибка буде – десятки наносекунд. Аналогічні результати простежуються і в разі використання іоносферної моделі [1, 2].

Іоносферні похибки зменшують декількома методами – моделюванням траси «НКА – споживач», двочастотними та надлишковими одночастотними вимірюваннями.

Похибки апаратури користувача залежать від якості її складових частин: антени, приймача, процесора, синтезатора частот (рис.1). Важливі характеристики антени – це ширина діаграми спрямованості та коефіцієнт підсилення. Швидкість обробки радіосигналів залежить від кількості каналів приймача (потрібно не менш 12). Точність обробки сигналів і визначення дальності залежить від методів оброблення сигналів (як правило, кореляційного), що закладені в апаратуру споживача, від характеристик кореляторів приймача, розрядності і швидкодії процесора та інших складових апаратури споживача. У високоякісній апаратури значення цих похибок не перевищують одиниці метрів.

Похибки через багатопроменеве поширення сигналів НКА виникають через те, що апаратура споживача оточується різними спорудами і крім прямого сигналу НКА в антену можуть надходити сигнали, що відбиті від цих споруд. Інтерференція прямого і відбитих сигналів створює додаткові похибки під час виявлення корисного сигналу, а потім і під час проведення навігаційних обчислень. Можна виділити наступні способи зменшення цих похибок: формування спеціальних діаграм спрямованості приймальних антен; застосування спеціальних алгоритмів оброблення вхідних сигналів.

На похибки місцевизначення суттєво впливає також досконалість програми процесора з вибору сузір'я супутників (взаємне розташування вибраних НКА) під час проведення вимірювань. Цей вплив кількісно визначається так званим геометричним фактором.

Розберемо ці фактори більш ретельно (див. рис.3 та рис.4). Передавачі НКА випромінювали спочатку один радіосигнал на частоті L_1 , а зараз для підвищення точності (усунення іоносферних похибок) випромінюють два неперервних радіосигнали на частотах L_1 і L_2 . Частота L_1 дорівнює 1575,42 МГц, а частота L_2 – 1227,6 МГц.

Несуча частота L_1 має дві складові, які знаходяться у квадратурі для зручності їх розділення. Перша складова L_1 модулюється двома двійковими послідовностями: дальномірним Р кодом (Protected code) – кодом високої точності й інформаційною послідовністю лінії передачі даних, які додаються за модулем 2. Друга складова L_1 також модулюється двома двійковими послідовностями: дальномірним С/А кодом (Clear Acquisition) пониженої точності і інформаційною послідовністю лінії передачі даних, які додаються за модулем 2.

Точність виміру часу при кореляційної обробці залежить від тривалості дискрети кодової послідовності (обернено пропорційна). Для С/А коду тривалість дискрети 1 мкс, а для Р коду всього 0,1 мкс, тому Р код забезпечує більш високу точність визначення дальності. Обидві інформаційні послідовності містять ефемериди (прямокутні координати відносно центру Землі, швидкість руху по траєкторії НКА), системний час, стан «годинників» НКА, статус повідомлення тощо.

Несуча частота $L_2 = 1227,6$ МГц має одну складову і модулюється двома

двійковими послідовностями: дальномірним Р кодом високої точності й інформаційною послідовністю лінії передачі даних, які додаються за модулем 2. Передбачений також режим використання тільки спеціального Р(У) коду без передачі інформаційної послідовності. Швидкість передачі даних інформаційних послідовностей 50 біт/с. Для всіх сигналів використовується двійкова фазова маніпуляція BPSK.

Основним дальномірним псевдовипадковим кодом є закритий Р код. Якщо увімкнути спеціальний режим А/С (Antispoofing), то замість Р коду вмикається закритий Р(У) код, що вперше введений для НКА Блок-П.

У розпорядженні світової спільноти знаходиться відкритий комерційний С/А код, всі НКА використовують однакові частоти L_1 і L_2 , але кожен НКА має свій код відповідно до різновиду дальномірних кодів, тому забезпечується надійна ідентифікація кожного НКА в апаратурі споживача шляхом застосування принципу кодового розділення сигналів.

Відкритий С/А код – код Голда являє собою псевдовипадкову послідовність радіоімпульсів (ПВП) довжиною 1 мс з тактовою частотою 1,023 МГц, тобто тривалість дискрети $\tau_0 \approx 1$ мкс (0,9775171 мкс). Кількість дискрет $N=1023$ – це є база С/А сигналу.

Закритий Р код високої точності додається до інформаційної послідовності за допомогою суматора за модулем 2, а потім здійснюється маніпуляція фази несучої частоти L_1 на $\pm 90^\circ$ (рис.2, а). С/А код пониженої точності формується разом із інформаційною послідовністю за допомогою суматора за модулем 2, а потім здійснюється маніпуляція фази несучої частоти L_1 на $0^\circ - 180^\circ$ (рис. 2, а).

Ортогональність сигналів пониженої та високої точності забезпечує їх повне розділення в апаратурі споживача. На частоті L_2 випромінюється тільки дальномірний Р код (рис. 2, б). Уникнути іоносферної рефракційної похибки (при проходженні радіохвиль через іоносферу) можуть тільки ті споживачі, які мають доступ до Р коду тому, що приймають ці дальномірні сигнали на двох частотах: L_1 та L_2 .

Отже сигнали GPS займають в L – діапазоні дві смуги завширшки у 20,46 МГц (рис. 3).

Сигнал, випромінюваний і-м НКА на частоті L_1 можна подати у вигляді

$$S_1(t) = (P_i \oplus D_i) \cos \omega_1 t + (C/A_i \oplus D_i) \sin \omega_1 t, \quad (4)$$

де D_i – код даних і-го НКА із швидкістю 50 біт/с; P_i – дальномірний код високої точності і-го НКА із швидкістю 10,23 Мбіт/с; $\omega_1 = 2\pi L_1$; C/A_i – відкритий дальномірний код пониженої точності і-го НКА із швидкістю 1,023 Мбіт/с.

Сигнал $S_2(t)$, випромінюваний і-м НКА на частоті L_2 має вигляд:

$$S_2(t) = (P_i \oplus D_i) \cos \omega_2 t, \quad (5)$$

де $\omega_2 = 2\pi L_2$.

Дальномірний С/А код – код Голда – формується через додавання за модулем 2 двох спеціально підібраних М–послідовностей однакової довжини $N=1023$. При різних часових зсувах перемножуваних М–послідовностей отримуються різні послідовності Голда і тому кожному НКА присвоєна своя, індивідуальна послідовність Голда.

Код Голда отримується із двох 10-різрядних ПВП з утворюючими поліномами

$$G_1(x) = 1 + x^3 + x^{10}; \quad G_2(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^6 + x^8 + x^9 + x^{10}. \quad (6)$$

Код і-го НКА утворюється завдяки додаванню за модулем 2 цих ПВП, при цьому друга ПВП $G_2(x)$ має індивідуальний для даного НКА зсув на фіксовану кількість символів. Сигнали, які випромінюються передавачами НКА мають правосторонню колову поляризацію. Зараз виготовляються приймачі багатоканальні, що дозволяють одночасно приймати та обробляти 12 закодованих псевдовипадковими послідовностями сигналів. Для виконання міжрядової обробки посівів, при якій потрібна точність не менша 5 см, потрібні приймачі, що обробляють кодовані сигнали на частотах L_1 і L_2 , а також сигнали базової станції RTK. Є приймачі, що приймають сигнали не тільки американської системи GPS, але і російської ГЛОНАСС.

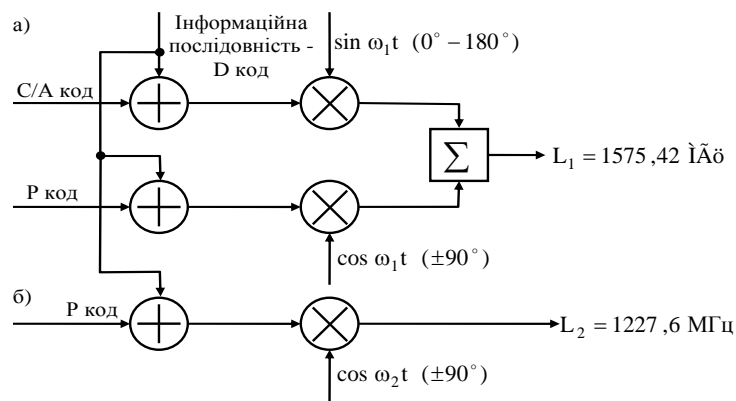


Рис.2 Структурна схема бортового формувача навігаційних сигналів:
⊕ – знак додавання за модулем 2; а – на частоті L_1 ; б – на частоті L_2

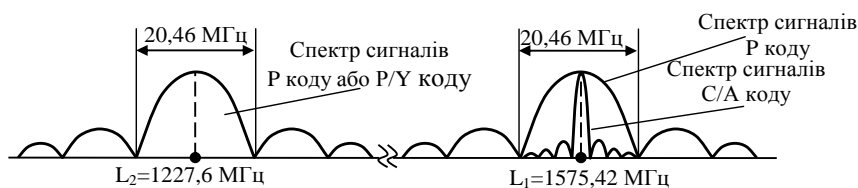


Рис. 3 Смуги частот дальномірних сигналів

Найбільший вклад в сумарну похибку надають похибки, що пов'язані неоднорідністю атмосфери на трасі розповсюдження радіохвиль. В іоносфері радіопромінь супутника викривляється, а в тропосфері змінюється його швидкість. Ці похибки мають випадковий характер, вони залежать від місцезнаходження МТА і поточного часу (від стану атмосфери в даний час над даним полем). Таки похибки можна усунути за допомогою диференційних систем GPS.

Для розрахунку цих похибок використовують радіолокаційні (в Європі діє система EGNOS, в США - WAAS) або базові станції, які розташовані в точках з точно визначеними координатами. Постійно приймаючи сигнали навігаційних супутників, ці РЛС визначають атмосферні похибки для даної місцевості в даний час, а потім передають їх через геостационарні супутники для всіх МТА, які працюють в цьому районі. Україна поки що таких радіолокаційних станцій і геостационарних супутників не має, тому наші агропідприємства використовують сигнали від польських станцій (№120 та №124). Безкоштовно можна користуватися радіосигналами тільки системи EGNOS, а за плату на договірних умовах кодованими сигналами системи OmniSTAR. Система OmniSTAR забезпечує більш високу точність місцезнаходження МТА, але потребує і більш дорогих приймачів, які приймають і обробляють сигнали на двох несучих частотах 1572,42 МГц та 1227,6 МГц. Існуючі варіанти цієї системи та її технічні можливості наведені в табл.2.

Таблиця 2.

Види та переваги систем радіосигналів для агропідприємств

Сільськогосподарські операції	OmniSTAR VBS	OmniSTAR XP	OmniSTAR G2	OmniSTAR HP
Точність від проходу до проходу	< 25 см	< 7,5 см	< 7,5 см	< 5 см
Автоматичне водіння	+	+	+	+
Обприскування	+	+	+	+
Диференційне внесення мінеральних добрив	+	+	+	+
Обробка ґрунту	+	+	+	+
Збір і картографування врожаю	+	+	+	+
Рядкова сівба		+	+	+
Створення гребенів				+
Міжрядкова обробка				+

Таблиця 2 показує, що OmniSTAR HP забезпечує виконання всіх сільськогосподарських операцій, в тому числі таких як рядкова сівба, внесення дорогих мінеральних добрив, створення гребенів та міжрядкова обробка посівів.

Інше технічне рішення усунення атмосферних похибок – це покупка мобільної базової станції (RTK), схема якої наведена на рис.4. Диференційна система визначення місцеположення МТА типу DGPS з RTK містить крім апаратури користувача, яка наведена на рис.1, приймальну апаратуру базової станції, комп'ютер з спеціальною програмою обчислення навігаційних поправок для МТА, що працюють поблизу, та передавач радіосигналів на апаратуру користувачів. На МТА в склад апаратури входять додатково приймач сигналів поправок та коректор навігаційних координат МТА.

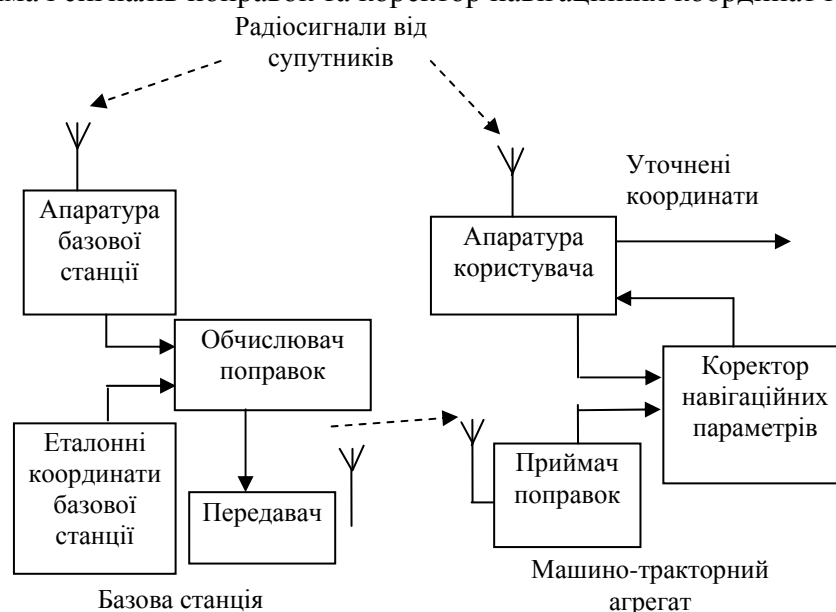


Рис. 4. Диференційна навігаційна схема.

Серед вагомих причин похибок, які пов'язані з апаратурою користувача, є ще похибка, що пов'язана з кутом нахилу поля α (рис.5).

Суть в тому, що антена користувача GPS встановлюється на даху МТА, висота якого досягає декількох метрів (так, наприклад, трактор має висоту порядку 3 м, а комбайн - 4 м). Отже, система GPS фактично визначає місцеположення антени, яка приймає радіосигнали від супутників, а не точки на полі, що і є причиною похибки (рис.5).

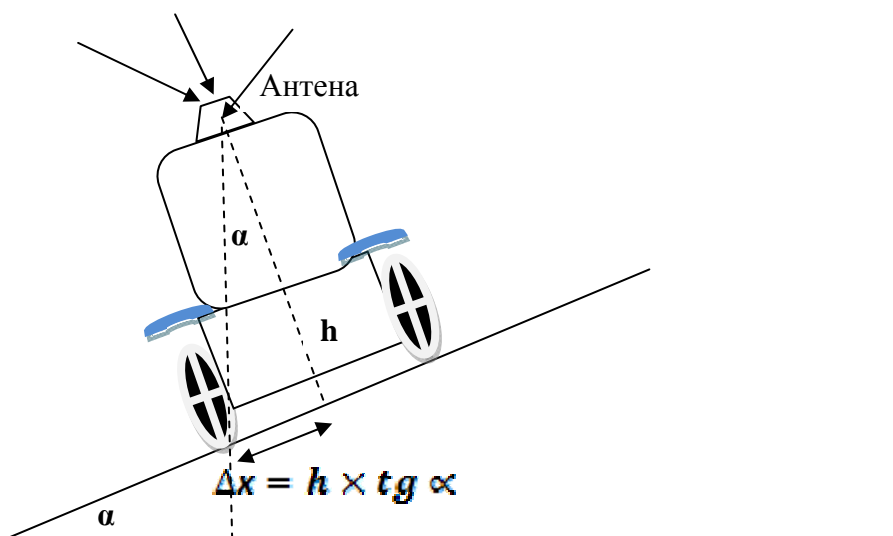


Рис.5 Вплив кута нахилу поля на похибки.

Цю похибку можна розрахувати за формулою:

$$\Delta x = h \times \operatorname{tg} \alpha, \quad (7)$$

Розраховані значення похибок Δx в см від кута нахилу поля α при висотах МТА для трактора $h = 3\text{ м}$ та для комбайна $h = 4\text{ м}$ занесені в табл.3.

Таблиця 3.

Значення похибок Δx в см від кута нахилу поля α при висотах МТА для трактора та для комбайна

α , град	1	2	3	4	5	7	10	15	20
Δx для $h=3\text{ м}$	5,25	10,5	15,7	20,97	26,25	36,84	52,89	80,37	109,2
Δx для $h=4\text{ м}$	7	14	21	27,96	35	49,12	70,52	107,16	145,6

Таблиця 3 показує, що вже нахил в 1 градус суттєво ускладнює посів і міжрядову обробку, а нахил в 3-5 градусів навіть внесення дорогих добрив.

Отже для усунення цієї складової похибок потрібно закупити і встановити на МТА модуль компенсації нахилу поля (вартість якого порядку 6500 грн). Таким чином, вибрати найкращий варіант для конкретного підприємства, який буде забезпечувати найбільший прибуток, є досить складною задачею.

Для виконання сільськогосподарських робіт, які не потребують знання місцеположення МТА з високою точністю (наприклад, обприскування, сінокіс, допустима похибка 20-30 см), можливо закупити спочатку просту систему паралельного водіння GPS з доповненням безкоштовною системою диференційної корекції EGNOS.

Потрібно нагадати, що в Європі розробляється нова навігаційна супутникова система, яка спроможна забезпечити незалежність від американської системи GPS.

Використані джерела інформації

1. Спутниковые радионавигационные системы и информационные технологии на их основе. В кн. «Информационные технологии в радиотехнических системах» / Под ред. И.Б. Федорова, МГТУ им. Баумана, Москва: 2003. – 224 с., ил.
2. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Н. Голиков, И.Н. Бусыгин и др. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с., ил.
3. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО МАКВИС, 1998. – 512 с., ил.
4. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио, 1972. – 410 с., ил.
5. В.П. Бабак, В.В. Конін, В.П. Харченко. Супутникова радіонавігація. – К.: Техніка, 2004. – 328 с., іл.
6. Е.Т. Скорик. Новая спутниковая радионавигационная система проекта Galileo. Наука та інновації. 2007. Т3 № 2. с. 64. Центральний НІІ навігації і управління. Минпромполитики Украины, Киев, 2007, 84 с.