**Спаський Ярослав Вячеславович**

студент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури,

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бондаренко Віктор Миколайович**  
кандидат технічних наук,

доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури,

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Дослідження системи управління та навігації БПЛА**

У сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА) стали невід'ємною частиною багатьох галузей діяльності, від військових операцій до комерційного застосування у сферах агрокультури, фото- та відеозйомці і навіть доставки товарів. Центральне місце у функціонуванні цих складних технологічних систем займають системи управління та навігації, які забезпечують точність, надійність та автономність їхньої роботи.

Одним з ключових завдань у розробці систем управління для БПЛА є необхідність забезпечення стабільності польоту та точності виконання заданих місій у різноманітних умовах. Сучасні системи навігації мають високий рівень інтеграції з різними типами датчиків, включаючи GPS, ІЧ-сенсори, лідари тощо. Це дозволяє БПЛА ефективно орієнтуватися в просторі і виконувати складні завдання з високою точністю. Значне місце у розвитку БПЛА займає також штучний інтелект, що включає машинне навчання та алгоритми глибокого навчання, дозволяючи дронам самостійно адаптуватися до нових умов та виконувати завдання без прямого втручання людини.

Метою роботи є дослідження існуючих систем управління та навігації для виявлення їх переваг та недоліків з тим, щоб на основі проведеного аналізу розробити систему, яка акумулюватиме в собі переваги досліджених зразків. Основна увага приділяється портативності, ефективності, легкій інтегрованості у вже існуючу систему, низькій вартості.

Супутникова навігація для безпілотних літальних апаратів (БПЛА) базується на використанні глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). Ці системи складаються із супутників, що обертаються навколо Землі та постійно передають сигнали. Кожен сигнал містить дані про точний час передачі та положення супутника у момент передачі. На основі часу, який знадобився сигналу для досягнення апарату, приймач обчислює відстань до кожного супутника. Зазвичай для точного визначення місцезнаходження потрібно щонайменше чотири супутники. За допомогою даних від трьох супутників можна визначити широту, довготу та висоту БПЛА. Четвертий супутник використовується для корекції можливих похибок часу в приймачі [1].Точність супутникової навігації залежить від кількості видимих супутників і якості сигналу. Відкрите небо забезпечує найкращі умови, тоді як міські каньйони або густі ліси можуть створювати перешкоди і знижувати точність через відбиття сигналів.

Інерційна навігаційна система (ІНС) є однією з основних технологій, що використовуються для навігації БПЛА. Вона базується на використанні інерційного вимірювального блоку , який містить акселерометри та гіроскопи для вимірювання прискорення та кутових швидкостей [2,3]. ІНС працює за принципом "мертвої навігації" (dead-reckoning), де положення розраховується шляхом інтеграції вимірювань прискорення та швидкості обертання. Ці дані дозволяють визначати траєкторію польоту апарату, навіть коли GPS сигнал недоступний або спотворений. Однак, ІНС має тенденцію до накопичення похибок з часом, тому для підвищення точності її часто використовують разом з іншими навігаційними системами, такими як GPS.

Метод візуальної одометрії використовує аналіз послідовності зображень, отриманих з однієї або декількох камер, для оцінки позиції і орієнтації БПЛА. Цей метод включає в себе збір візуальної інформації з оточення, яка потім обробляється для визначення руху БПЛА відносно його попередньої позиції. Візуальна одометрія дозволяє БПЛА визначати своє місцезнаходження без залежності від GPS, що є корисним у випадках, коли сигнали GPS недоступні або ненадійні, наприклад, у закритих просторах або у складних умовах [4,5]. Ключовими етапами є виявлення орієнтирів на зображенні, відстеження їх між послідовними кадрами та використання різниць між їх позиціями для визначення вектору руху БПЛА. Використання візуальної одометрії також вимагає значних обчислювальних ресурсів та алгоритмів машинного зору для точного визначення руху на основі зображень, які можуть включати шум або бути неповними через перешкоди в полі зору.

Навігація за сигналами (SoO) є інноваційним методом, що використовує існуючі радіосигнали, такі як сигнали стільникових мереж, Wi-Fi, телевізійних передач та інших джерел, для визначення місцезнаходження апарату. У міських умовах, де супутникові сигнали можуть бути ослаблені, відбиті або заблоковані високими будівлями, SoO пропонує надійне альтернативне рішення. БПЛА обладнують приймачами, які можуть виявляти та аналізувати ці сигнали, визначаючи параметри, як-от час прибуття (Time of Arrival, ToA) та зміну частоти сигналу (Frequency of Arrival, FoA). За допомогою цих параметрів можна обчислити відстань до джерел сигналу, а потім триангуляцією визначити точне місце знаходження апарату [6]. Спочатку відбувається збір сигналів від різних джерел, що знаходяться в межах досяжності. Потім за допомогою алгоритмів обробки сигналів визначаються точні характеристики сигналів, такі як час прибуття або зміна частоти. Після цього ці дані використовуються для триангуляції, що дозволяє обчислити точне місцезнаходження БПЛА відносно джерел сигналу.

Протокол SBUS (Serial Bus) є цифровим протоколом розробленим для передачі команд керування між радіопередавачем і приймачем, а також іншими компонентами БПЛА та інших радіокерованих моделей. SBUS використовує один сигнальний кабель для передачі даних, що дозволяє значно зменшити кількість проводів у системі керування.

Протокол SBUS працює на принципі послідовної передачі даних і підтримує до 16 каналів керування, що дозволяє передавати команди для різних компонентів, таких як серводвигуни, контролери швидкості та інші пристрої. Дані передаються з частотою 100 Гц, що забезпечує високу швидкість реакції та точність керування [7]. Однією з головних переваг SBUS є можливість використання одного кабелю для підключення кількох пристроїв. Це досягається завдяки каскадному з'єднанню компонентів, де сигнал передається від одного пристрою до іншого, зменшуючи кількість необхідних з'єднань та спрощуючи монтаж системи.

CRSF (Crossfire) є високошвидкісним цифровим протоколом передачі даних для забезпечення надійного зв'язку між радіопередавачем і приймачем у БПЛА. Працюючи на частотах 868 МГц або 915 МГц, CRSF забезпечує низьку затримку, високу стійкість до перешкод та велику дальність дії. Завдяки використанню нижчих частот і адаптивних алгоритмів модуляції, протокол забезпечує стабільний зв'язок на відстанях до кількох десятків кілометрів, що робить його ефективним у складних умовах. CRSF підтримує високу частоту оновлення даних до 150 Гц, що забезпечує швидку реакцію на команди оператора. Протокол також включає зворотний канал телеметрії для передачі даних про стан системи, рівень заряду батареї та GPS-координати, що дозволяє оператору контролювати БПЛА в режимі реального часу [8].

Автопілоти для БПЛА є складними системами, що забезпечують автономне керування польотом. Вони поєднують апаратне та програмне забезпечення для виконання різних завдань, таких як зліт, політ за маршрутом, уникнення перешкод і посадка. Автопілоти використовуються у військових, комерційних, наукових та цивільних додатках, забезпечуючи високу точність і надійність керування [9].

В кожного із методів присутні як переваги так і недоліки. Так, інерційна система навігації, хоча і найбільш автономна, але її не бажано використовувати там, де потрібна точність, хоча вона стійка до систем радіоелектронної боротьби.

Системи навігації на основі GNSS навпаки мають високу точність, але не мають автономності, тобто вони залежать від зовнішнього сигналу, а отже не стійкі до завад.

Візуальна одометрія – це дійсно новий підхід до навігації дронів. Вона може бути повністю автономною, при цьому не втрачаючи точність. Але для цього потрібні додаткові обчислювальні потужності, а в сьогоднішніх умовах все робиться задля зменшення габаритів та ваги БПЛА.

Розглянуті системи керування спираються на радіохвилі. Хоча вони і мають деякий захист від перешкод та захист даних, але цього інколи виявляється замало. Цього не скажеш про автопілот, якому не потрібні сигнали для управління, але необхідні системи навігації, для того щоб коректно керувати БПЛА.

**Список літератури:**

1. Mika OkuharaTorleiv Håland Bryne Kristoffer Gryte Tor Arne JohansenPhased Array Radio Navigation System on UAVs: In-Flight Calibration. Oct. 2023.Р. 1–2.
2. Inertial Navigation Systems(INS)

URL: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-navigation-systems-ins-an-introduction> (Дата звернення 21.06.2024).

1. Inertial Navigation Systems and How INS Works

URL: [https://www.pnisensor.com/inertial-navigation-systems](https://www.pnisensor.com/inertial-navigation-systems/) (Дата звернення 21.06.2024)

1. Yuhao Bai, Baohua Zhang, Naimin Xu, Jun Zhou, Jiayou Shi, Zhihua Diao Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: A review.

URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169922008924> (Дата звернення 22.06.2024)

1. Mohammad O.A. Aqel, Mohammad Hamiruce Marhaban, M Iqbal Saripan, Napsiah Ismail. Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications. Dec. 2016. P. 7-10.
2. Dr. John F. Raquet Dr. Mikel M. Miller Navigation Using Pseudolites, Beacons, and Signals of Opportunity Oct. 2007. P. 4-5.
3. Written by Edward H. Frank and Jim Lyle. SBus Specification B.O. 1990. Р. 20-23.
4. TBS CROSSFIRE R/C System URL: <https://www.team-blacksheep.com/media/files/tbs-crossfire-manual.pdf> (Дата звернення 22.06.2024)
5. Arducopter Auto mode URL: <https://ardupilot.org/copter/docs/auto-mode.html> (Дата звернення 22.06.2024)