

ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ СТРАТОСФЕРНИХ ПЛАНЕРІВ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ І РОЗВІДКИ

Артёмов. І.В.¹; Артёмова. А.В., к.т.н., доцент²

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»

Україна, Харків

¹ i.artomov@khai.edu; ² ORCID 0000-0002-6761-2066

Анотація. В публікації проаналізовано використання автономних стратосферних планерів для тривалого спостереження за територіями. Пропонується створення багаторівневої системи спостереження, де планери використовують енергію вітру та сонця для тривалих польотів. Окремо розглядається програмне забезпечення для управління польотом та обробки даних.

Ключові слова: стратосфера; планер; спостереження; динамічне ширяння.

Постановка проблеми. Автономні повітряні системи є перспективними інструментами для досягнення завдань, пов'язаних із тривалим спостереженням за визначеними територіями. Хоча сучасні супутникові мережі, такі як Starlink і Iridium, забезпечують значне покриття, повністю глобальне і безперервне спостереження вимагає або численних сузір'їв супутників, або геосинхронних систем. Це створює низку проблем, включно з низькою роздільною здатністю через велику відстань до цілі, обмеженою кількістю орбітальних слотів, забезпеченням надійного зв'язку в екстремальних погодних умовах і складністю масштабування інфраструктури. Одним із потенційних рішень цих викликів є використання стратосфери як нового стратегічного простору.

Метою цього дослідження є розробка та впровадження глобальної системи спостереження та розвідки (ISR), що базується на використанні автономних стратосферних планерів. Вивчаються можливості збільшення тривалості польотів безмоторних планерів за рахунок використання енергії вітрових потоків і сонячної енергії для довготривалого спостереження. Крім того, дослідження фокусується на розробці інфраструктури програмного забезпечення, що інтегрує засоби зв'язку, датчики та канали управління між супутниками, планерами та командними центрами.

Основним завданням є підвищення ефективності системи ISR через поліпшене охоплення, розширений діапазон і розширені можливості спостереження. Це досягається шляхом використання динамічного та статичного ширяння в стратосфері для тривалих польотів планерів, а також шляхом створення програмних рішень для керування польотом і обробки даних. Дослідження також ставить за мету подолання аеродинамічних викликів, пов'язаних із польотами при низьких числах Рейнольдса та високих числах Маха, для покращення моделей прогнозування поведінки повітряних потоків на великих висотах.

Актуальність цього дослідження обумовлена зростаючою потребою в ефективних і тривалих системах спостереження та розвідки (ISR), що здатні забезпечувати безперервний моніторинг великих територій у режимі реального часу. Сучасні супутникові системи, такі як Starlink або Iridium, мають обмеження щодо охоплення, роздільної здатності, доступності орбітальних слотів та складності підтримки стабільного зв'язку в екстремальних погодних умовах. Відповідно, дослідження альтернативних методів спостереження, таких як стратосферні планери, стає необхідним для подолання цих проблем.

Застосування стратосферних планерів дозволяє використовувати нові технічні рішення, що забезпечують постійне спостереження завдяки їхній витривалості та можливості використовувати енергію вітрових потоків і сонця. Це дослідження спрямоване на підвищення ефективності глобальних ISR систем шляхом розширення покриття та тривалості спостереження з меншою залежністю від обмежень традиційних супутникових систем.

Актуальність також підкреслюється необхідністю інтеграції сучасних програмних рішень, здатних забезпечити автономне управління планерами та обробку великих обсягів даних у режимі реального часу. Це має велике значення для виконання місій у складних і віддалених регіонах, де традиційні засоби спостереження неефективні.

Виклад основного матеріалу. Для польотів у стратосфері застосовуються системи на основі повітряних куль, легших за повітря, або безпілотних літальних апаратів, спеціально розроблених для тривалих місій на великій висоті. Раніше подібні системи розробляли такі компанії, як Boeing, AeroVironment, Airbus та Lockheed-Martin, однак використання силових установок суттєво ускладнює конструкцію та збільшує масу апаратів, що є критичним фактором для їхньої тривалої експлуатації на великих висотах.

Для забезпечення ефективного доступу до спостережуваних територій пропонується створення глобальної системи спостереження та розвідки (ISR), основними технологічними компонентами якої є стратосферні планери та комплекс інфраструктури допоміжного програмного забезпечення. Стратосферні планери нового покоління здатні використовувати енергію динамічного ширяння в непостійних атмосферних потоках, а також сонячну енергію, що значно збільшує тривалість їх місій.

Інший важливий елемент цієї системи полягає в інтеграції засобів зв'язку, сенсорного обладнання та каналів керування між супутниками, планерами і наземними командними центрами. Для побудови глобальної багаторівневої системи необхідна нова інфраструктура програмного забезпечення. Вона включає комунікаційні рішення для управління передачею даних та мережевими операціями, програмне забезпечення для автономної навігації та управління польотами, а також інструменти для спостереження та обробки даних. Ця система підвищить ефективність ISR завдяки покращенню покриття, розширенню діапазону і підвищенню спостережних можливостей.

Забезпечення тривалого терміну служби безмоторних планерів у стратосфері можливо завдяки використанню вітрової та сонячної енергії. Стратосфера характеризується наявністю різних вітрових режимів, включаючи реактивні течії та турбулентність, що відкриває можливості для використання енергії вітру. Планери можуть отримувати підйомну силу і рухатися вперед за рахунок різниці швидкостей і напрямків вітру на різних висотах, забезпечуючи ефективне виконання довготривалих місій.

Статичне ширяння ґрунтується на використанні висхідних повітряних потоків, таких як терміки, що утворюються через нерівномірне нагрівання земної поверхні. Планери здатні ефективно кружляти в межах цих терміків для набору висоти без витрат енергії. Динамічне ширяння передбачає маневрування в повітряних масах із різною швидкістю вітру з метою отримання кінетичної енергії. Планер може зберігати або навіть збільшувати свою енергію без використання двигуна завдяки ретельному плануванню маневрів. Особливий інтерес становлять реактивні течії — потужні та стійкі вітри, що існують по всій планеті.

Поєднання енергії вітру і сонячної енергії дозволяє планеру підтримувати тривалі польоти. Взаємодія динамічного та статичного ширяння забезпечує ефективне використання атмосферних умов, тоді як сонячна енергія виступає надійним і відновлюваним джерелом

енергії. Ця інтегрована методика підвищує тривалість автономних польотів і сприяє реалізації довготривалих місій у стратосфері.

Автономне управління енергоресурсами значно покращується завдяки знанням про навколишнє середовище. Наприклад, планери збирають дані про повітряне середовище, які передаються в оперативний центр для синхронізації з існуючими погодними моделями, що дозволяє оновлювати регіональні карти повітряних потоків. Місцеві дані, оброблені на борту планера, допомагають оптимізувати енергоефективні траєкторії польоту. Цілі місії, такі як точки маршруту або межі регіону, визначаються користувачем і використовуються як параметри в алгоритмах автономної навігації.

Постійний зв'язок між автопілотом і бортовим комп'ютером забезпечує отримання інструкцій польоту в реальному часі, що доповнюється системами керування положенням і управлінням кінетичною та потенційною енергією. Дані від датчиків, що використовуються автопілотом, передаються в комп'ютер для точного визначення орієнтації, швидкості та місця розташування літального апарата, що підвищує ефективність і автономність виконання місій.

Програмне забезпечення для спостереження та обробки даних використовує датчики для отримання зображень на різних масштабах, включаючи електрооптичні (ЕО) та інфрачервоні (ІР) технології. Воно також проводить моніторинг атмосферних параметрів, таких як тиск, температура та вітер. Завдяки меншій робочій висоті стратосферних планерів у порівнянні з орбітальними платформами, якість зображень із землі значно покращується. Стратосферні апарати також мають перевагу в постійній навігації та гнучкій зміні позиції для кращого охоплення цільових регіонів.

Програмне забезпечення для керування операціями відповідає за локалізацію та навігацію всіх компонентів системи під час виконання місій. Мікросупутники використовують автономну систему наведення для підтримки зв'язку зі стратосферними об'єктами та наведення на віддалені атмосферні сенсори. Планери керуються автономною системою польоту, яка визначає траєкторії на основі поточних умов навколишнього середовища та цілей місії. Для управління польотом використовуються комерційні системи автопілота, такі як Pixhawk blue [1] та мікропрограмна система AduPilot [2], що включає потрібні резервні інерційні вимірювальні блоки (IMU), барометричний датчик висоти MS5611 і GPS з підтримкою RTK (NEO-M8P) [3].

Навігаційні інструкції надходять від автономної системи управління, що працює на одноплатному комп'ютері Raspberry Pi Linux [4]. Планери, які функціонують за принципом «запустив і забув», використовують динамічні траєкторії ширяння в стратосфері, зокрема в реактивних потоках та зсувах. Вони автоматично визначають карти вітрів різних масштабів для вибору енергоефективних траєкторій польоту, що моделюються в реальному часі на основі нелінійних оптимізаційних алгоритмів. Ці траєкторії коригуються відповідно до вимог місії, а модифікації вагових коефіцієнтів враховують типи місій, визначені кінцевим користувачем через наземний інтерфейс управління.

Постійний моніторинг. Висотні планери, завдяки своїй високій витривалості, здатні забезпечувати безперервне спостереження за визначеними регіонами. Їх інтеграція з мікросупутниками розширює покриття, забезпечуючи можливість спостереження навіть поза прямою видимістю. Така мережа може використовуватися для завдань розвідки і спостереження, надаючи інформацію в реальному або майже реальному часі про певні регіони чи події. Постійна наявність систем візуалізації на висоті, що недосяжна для більшості загроз, підвищує надійність платформи ISR. Хоча камери, які використовуються на космічних апаратах, мають високу роздільну здатність, їхня ефективність обмежена відстанню та

орбітою. Впровадження цих технологій на стратосферних платформах значно розширює можливості мережі.

Для забезпечення тривалих польотів планери використовуватимуть енергію непостійних атмосферних потоків [5]. Протягом проекту будуть розроблені інноваційні динамічні маневри. У попередніх дослідженнях були виведені рівняння руху планера під час польоту в умовах неоднорідного вітру. Чисельне моделювання динаміки та енергетики проводилося для різних траєкторій з урахуванням атмосферних умов як на великих висотах, так і на рівні землі. Результати показали доцільність використання маневрів з позитивним енергетичним балансом в умовах нерівномірного вітру. Проведені попередні експериментальні польоти з отриманням телеметричних даних, які підтвердили доцільність запропонованих маневрів[6].

Висновки. Таким чином зазначимо, що польоти за умов низьких чисел Рейнольдса та високих чисел Маха створюють складні аеродинамічні проблеми. Повітряний потік навколо планера стає стисливим і нелінійним, що ускладнює точне прогнозування аеродинамічної поведінки[7]. Існуючі аеродинамічні моделі, досліджені раніше [8], можуть бути недостатні для таких умов і вимагають додаткового тестування та моделювання. Подальші дослідження та експерименти необхідні для глибшого розуміння цих аеродинамічних явищ та вирішення пов'язаних із ними викликів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Bouskela, A., Kling, A., Chandra, A., Schuler, T., Shkarayev, S., Thangavelautham, J. (2019). Planetary Exploration Using Cubesat Deployed Sailplanes. *International Astronautical Congress*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.03842>
- [2] Shkarayev, S., and Bouskela, A. (2020). Modeling of Dynamic Soaring Maneuvers in the Atmospheres of Earth and Mars. *AIAA AVIATION Forum*, 2020-2680. <https://doi.org/10.2514/6.2020-2680>
- [3] Bouskela, A., Kling, A., Schuler, T., Shkarayev, S., Kalita, H., and Thangavelautham, J. (2022). Mars Exploration Using Sailplanes. *Aerospace*, 9(6), 306. <https://doi.org/10.3390/aerospace9060306>.
- [4] Bouskela, A., Shkarayev, S.V. (2023). Numerical modeling and flight experiments of glider dynamics in non-uniform winds. *AIAA SCITECH Forum*, 757-779. <https://www.proceedings.com/content/069/069768webtoc.pdf>
- [5] Wachter, A. and Biegler, L.T. (2006). On the Implementation of a Primal-Dual Interior Point Filter Line Search Algorithm for Large-scale Nonlinear Programming. *Mathematical Programming*, 106, 25-57. <https://doi.org/10.1007/s10107-004-0559-y>
- [6] Bézard, H., Désert, T., Moschetta, J-M., and Jardin, T. (2019). Aerodynamic design of a Martian micro air vehicle. *8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences*, <https://doi.org/10.13009/EUCASS2019-217>.
- [7] Anyoji, M., Numata, D., Nagai, H., Asai, K. (2015). Effects of Mach number and specific heat ratio on low-Reynolds-number airfoil flows. *AIAA Journal*, 53(6), 1640-1654. <https://doi.org/10.2514/1.J053468>
- [8] Anyoji, M., Okamoto, M., Fujita, K., Nagai, H., and Oyama, A. (2017). Evaluation of Aerodynamic Performance of Mars Airplane in Scientific Balloon Experiment. *Fluid Mech. Res. Int.* 1(3), 00012. <https://doi.org/10.15406/fmrij.2017.01.00012>.

Artomov, I.V., Artomova, A.V.

Innovative solutions of using stratospheric sailplans for observation and recognition

Abstract. The publication analyzes the use of autonomous stratospheric gliders for long-term surveillance of territories. It proposes the creation of a multi-level surveillance system where gliders use wind and solar energy for long flights. Software for flight control and data processing is considered separately.

Keywords: stratosphere; sailplain; observation; dynamic soaring.