

УДК 519.7

**Р. Н. Квстний, д. т. н., проф.; І. П. Борщова****АЛГОРИТМ УНИКНЕННЯ ЗІТКНЕНЬ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ  
ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

*Описано галузі застосування безпілотної техніки. Зроблено аналіз існуючих систем уникнення зіткнення. На основі математичної моделі руху матеріальної точки запропоновано алгоритм уникнення зіткнення для безпілотних літальних апаратів. Він може бути основою майбутніх розробок та алгоритмів у цій галузі.*

**Ключові слова:** алгоритм, безпілотної літальний апарат, матеріальна точка.

**Вступ.** Зараз спостерігається значне підвищення інтересу до безпілотних літальних апаратів (БЛА). Відсутність людини на борту дозволяє здійснювати маневри, недоступні для пілотованих літаків. БЛА вперше застосовувались в розвідувальних місіях під час війни у В'єтнамі. Сьогоднішні БЛА використовують найсучасніші технології, включаючи камери, радари та інфрачервоні датчики. Вони варіюються від невеликих, дистанційно керованих літальних апаратів, схожих на планери, до величезних БЛА, що можуть літати самостійно за сотні миль під час запрограмованих місій [1 – 4].

Безпілотні літальні апарати зазвичай застосовуються для виконання таких завдань, які не можуть бути вирішені при використанні пілотованих об'єктів. Такими завданнями є: моніторинг повітряного простору, наземних і водних поверхонь, екологічного контролю, управління повітряним рухом, контроль морської навігації, розробка мереж зв'язку та інші.

Основною проблемою при проектуванні безпілотних літальних апаратів є розробка алгоритмів уникнення їх зіткнення.

**Аналіз попередніх досліджень.** Зараз в світі існують сотні БЛА різних типів та класів – від мініатюрних, розмір яких складає кілька десятків сантиметрів, до великих стратегічних транспортних засобів. Найбільш відомими є системи TCAS [5] та системи ADS-B [6].

TCAS – це інструмент, призначений для запобігання зіткнень між літальними апаратами у повітряному просторі. Досвід роботи продемонстрував користь та ефективність TCAS. У той же час при використанні TCAS було визначено області, в яких дизайн та алгоритми потребують уточнення або поліпшення для подальшого підвищення ефективності TCAS і її взаємодії з контролерами. TCAS також не запобігає всім ризикам зіткнення, і система може викликати додатковий ризик.

Сьогодні особлива увага приділяється безпілотним літальним апаратам, які використовують системи ADS-B. Від інших систем ADS-B відрізняється покращеними візуальними можливостями: можливістю здійснення операцій на поверхні, можливістю виконання операцій за будь-яких погодних умов, зменшення простору для можливого наближення.

Однак є багато проблем, які мають бути вирішені при розробці безпілотних літальних апаратів, обладнаних такою системою. По-перше, оператори безпілотних літальних апаратів і контролери не можуть повністю керувати польотом, так як вони фізично не можуть побачити весь рух навколо безпілотної системи; по-друге, алгоритми уникнення зіткнення є недосконалими і не дозволяють повністю і за будь-яких умов уникати зіткнення з іншими літальними апаратами. Ще однією не менш важливою проблемою при проектуванні літальних апаратів, обладнаних системою ADS-B є те, що не всі існуючі алгоритми і підходи уникнення зіткнення узгоджуються з принципами ADS-B. Таким чином, гостро стоїть завдання поліпшення алгоритмів уникнення зіткнення для безпілотних літальних апаратів.

**Метою роботи** є вдосконалення системи запобігання зіткнень для безпілотних літальних апаратів, використовуючи алгоритм уникнення зіткнення на основі математичної моделі руху матеріальної точки.

**Матеріали та результати досліджень.** Рух безпілотного літального апарата складається з поступальної ходи його центру мас, що визначає траєкторію польоту, і обертового руху довкола центру мас, що визначає кутове положення безпілотного літального апарата відносно інерціального простору [7]. При русі безпілотного літального апарата в атмосфері Землі ці дві складові загального руху взаємозв'язані і повинні розглядатися спільно.

В основу математичної моделі руху безпілотного літального апарата покладено нелінійну систему диференціальних рівнянь, що описує рух БЛА у просторі.

Введемо деякі визначення. Вектором положення називається вектор, проведений з початку вибраної системи координат у точку місця розташування літального апарата ( $\bar{r}_1(t)$  і  $\bar{r}_2(t)$  для двох літальних апаратів відповідно). Вектор положення і швидкість його зміни записуються в проекціях на осі вибраної (декартової або сферичної) системи координат. Вектором відносної дальності назвемо вектор, який направлений від одного БЛА до іншого уздовж лінії візування і по величині дорівнює відстані між центрами мас цих БЛА. Ця відстань називається відносною дальністю  $\bar{D}$ .

Безпілотний літальний апарат рухається в просторі разом з іншим літальним пристроєм. Для отримання рівнянь відносного руху двох таких літальних апаратів використовуватимемо відомі положення теоретичної механіки. Використовуючи вищенаведені визначення, можна стверджувати, що положення літальних апаратів визначається в кожен момент часу векторами  $\bar{r}_1(t)$  і  $\bar{r}_2(t)$ .

Таким чином, вектори дальності і відносної швидкості запишуться:

$$\begin{cases} \bar{D}(t) = \bar{r}_1(t) - \bar{r}_2(t), \\ \bar{V} = \dot{\bar{D}}(t) = \dot{\bar{r}}_1(t) - \dot{\bar{r}}_2(t); \end{cases} \quad (1)$$

Векторне рівняння динаміки відносного руху можна представити у вигляді:

$$\dot{\bar{V}} = \ddot{\bar{D}}(t) = \bar{a}_1(t) - \bar{a}_2(t), \quad (2)$$

де  $\bar{a}_1(t), \bar{a}_2(t)$  – вектори прискорень двох БЛА відповідно.

Далі описуватимемо відносний рух літальних апаратів у зв'язаній системі координат, яка рухається відносно інерціальної системи координат. У цьому випадку перехід від абсолютних похідних векторів до локальних здійснюється за відомими формулами:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} = \ddot{\bar{r}} + 2[\omega \dot{\bar{r}}] + [\omega[\omega \bar{r}]] + [\dot{\omega} \bar{r}], \\ \frac{d \bar{r}}{dt} = \dot{\bar{r}} + [\omega \bar{r}]; \end{cases} \quad (3)$$

Абсолютний рух літального апарата в зв'язаній з літальним апаратом, що до нього наближається, системі координат, визначатиметься виразами:

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \dot{\bar{D}} + [\omega \bar{D}], \\ \bar{a}_1 = \bar{a}_2 + \ddot{\bar{D}} + [\omega[\omega \bar{D}]] + [\dot{\omega} \bar{D}] + [2\omega \dot{\bar{D}}]; \end{cases} \quad (4)$$

Кінематичні і динамічні векторні рівняння відносного руху двох БЛА в зв'язаній системі координат отримаємо з (4):

$$\begin{cases} \bar{D} = \bar{V}_1 - \bar{V}_2 - [\bar{\omega}\bar{D}], \\ \bar{D} = \bar{a}_1 - \bar{a}_2 - [\bar{\omega}[\bar{\omega}\bar{D}]] - [\bar{\varepsilon}\bar{D}] - [2\bar{\omega}\bar{D}]; \end{cases} \quad (5)$$

Таким чином, із рівняння відносного руху двох літальних апаратів, можна обчислити, на яку відстань вони перемістяться за певний проміжок часу, яка відстань буде між ними через певний проміжок часу, які координати прийматимуть вони через певний проміжок часу. Розроблений алгоритм уникнення зіткнення на кожному кроці обчислень враховує рух одного літального апарата відносно іншого.

Припустимо, що даний літальний апарат рухається в горизонтальній площині і повинен дістатися до деякої цілі, залишаючись у цій же площині.

Назустріч рухається інший літальний пристрій. Допустима відстань між літальними апаратами не повинна бути менша за деяке число  $R$ . Згідно з рівняннями відносного руху, вважаємо безпілотник матеріальною точкою, яка рухається, а інший літаючий об'єкт – перешкодою, що стоїть на місці. При цьому завданням є «обійти» цю перешкоду найкоротшим шляхом.

Спроекуємо в конкретному масштабі на площину  $XOY$  тривимірної сітки обидва літальні апарати. Комірку, в яку спроектувався другий літальний апарат, позначимо як перешкоду, причому врахуємо і мінімально допустиму відстань між літальними апаратами. Позначивши як перешкоду і ті квадрати сітки, які розташовані навколо літального апарата і потрапляють у діапазон недопустимої відстані між літальними апаратами. На рисунку 1 зображена проекція літальних апаратів на площину  $XOY$ .

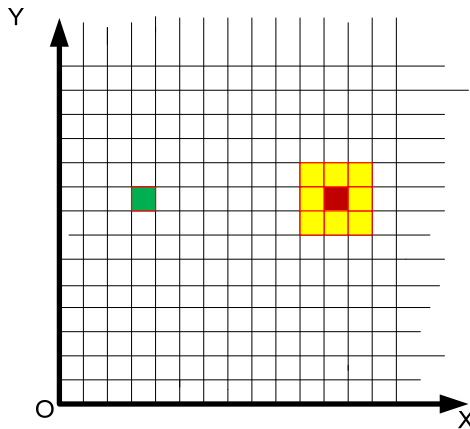


Рис. 1. Проекція літальних апаратів на площину  $XOY$

Розроблений алгоритм базується на принципах:

1. Розбиваємо тривимірний простір на сітку. Конкретний квадрат сітки – це «комірка», яку може займати безпілотник (як було зазначено вище, ми розглядаємо його рух як рух матеріальної точки).

2. Крок сітки обирається таким, що дорівнює мінімальному відносному переміщенню одного літального апарата відносно іншого за певний вибраний нами проміжок часу. Оскільки система інерціальна, і ми враховуємо відносне переміщення одного відносно іншого, то приймаємо, що безпілотник рухається з тією швидкістю, яку ми визначили як відносну, в той час як інший літаючий апарат стоїть на місці. Таким чином, алгоритм уникнення перешкод значно спрощується.

3. Якщо різниця координат  $z_1 - z_2$  між цими літальними апаратами більша або дорівнює допустимій відстані між літаючими апаратами, то рух безпілотника не потрібно коректувати. Якщо ж різниця координат  $z_1 - z_2$  між літальними апаратами менша, ніж допустима відстань

між ними або дорівнює нулю, тоді потрібно шукати найкоротший шлях обходу перешкоди.

**Висновки.** Зараз спостерігається значне підвищення інтересу до безпілотних літальних апаратів. У системах уникнення зіткнень для безпілотних літальних апаратів актуальною є задача проведення цього літального апарата з початкового стану в задану область у потрібний момент часу, уникаючи зіткнень з іншими літальними апаратами. Ключовим питанням при рішенні цієї задачі є розробка алгоритмів уникнення їх зіткнення. Запропонований алгоритм використовує математичну модель відносного руху двох матеріальних точок. Цей алгоритм може застосовуватись у системах навігації, а також у системі ADS-B.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Beylin M. System approach to weapons production in unmanned aviation systems / Beylin M., Burkovsky S. // Management systems, navigation and communication. – 2008. - № 6(2). – Pp. 60-61
2. Unmanned Aircraft Systems for the Navy [internet-resource] / Shcherbakov V.–: [http://www.uav.ru/articles/naval\\_uav.pdf](http://www.uav.ru/articles/naval_uav.pdf)
3. Best R. A. Intelligence Technology in the Post-Cold War Era, the Role of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Report to Congress // Congressional Research Service, 1993. – Pp. 12-16.
4. Sterne-Perkins D. Military Unmanned Aerial Vehicles Report to Congress // Congressional Research Service, 1996. – Pp. 11-14.
5. Livadas C. High-Level Modeling and Analysis of TCAS [internet-resource] / Livadas C., Lygeros J., Lynch N. – Режим доступу: <http://people.csail.mit.edu/clivadas/pubs/RTSS99.pdf>.
6. Powell J.D Use of ADS-B and perspective displays to enhance airport capacity [internet-resource] / Powell J.D, Jennings Ch., Holforty W.- Режим доступу: <http://waas.stanford.edu/~wwu/papers/gps/PDF/PowellDASC05.pdf>
7. Kumkov S.I. Informational Sets in a Problem of Observation of Aircraft Trajectory / Kumkov S.I., Patsko V.S., Pyatko S.G., Fedotov A.A. // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics.- 2000. - № 2

**Квстний Роман Наумович** – д. т. н., професор, завідувач кафедру АІВТ.

**Борцова Ірина Петрівна** – студентка кафедри АІВТ.

Вінницький національний технічний університет.