

УДК 004.942+623.465

А.О. МОРОЗОВ\*, А.Л. ЯЛОВЕЦЬ\*

## ДО ПОСТАНОВКИ ОДНІЄЇ ЗАДАЧІ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПЕРЕСЛІДУВАННЯ У ТРИВИМІРНОМУ ПРОСТОРИ

\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**Анотація.** У статті виконано постановку задачі мультиагентного переслідування у тривимірному просторі для випадку, коли агенти-утікачі не використовують жодної оптимальної стратегії утікання, а рухаються відповідно до заздалегідь визначеної власної траєкторії. Зазначено, що ця задача є прототипом задачі переслідування, виконуваної з використанням довільної системи протиракетної оборони. Показано, що така система протиракетної оборони містить у своєму складі три компоненти: радіолокаційну систему, завданням якої є виявлення ворожої ракети та супроводження її в реальному масштабі часу; систему автоматичного управління, яка обробляє цю інформацію, активує третій компонент та управляє ним у реальному масштабі часу; ракети-перехоплювачі, завданням яких є знищення ворожих ракет. З точки зору агентного підходу визначено сутність координації дій системи автоматичного управління та ракет-перехоплювачів, радіолокаційної системи й системи автоматичного управління. Зазначено, що в рамках задачі мультиагентного переслідування/утікання у тривимірному просторі існують три категорії агентів: агенти-майстри, агенти-переслідувачі та агенти-утікачі. Описано параметри довільного стану згаданих агентів та визначено, що знають і як діють агенти в кожний момент модельного часу у процесі переслідування/утікання у тривимірному просторі. На основі запропонованої постановки задачі виявлено властивості навколишнього середовища, в якому діють агенти, та визначено перелік методів, що потребують свого розроблення. Зазначено, що на основі таких методів передбачається створити дослідницький прототип моделюючої системи переслідування у тривимірному просторі, який має містити у своєму складі динамічну ГІС як ГІС, що здатна відображати та оброблювати в реальному масштабі часу рухомі об'єкти.

**Ключові слова:** мультиагентне переслідування, тривимірний простір, агент-майстер, агент-переслідувач, агент-утікач, навколишнє середовище, зона спостереження.

**Abstract.** The article presents a multi-agent pursuit problem in a three-dimensional space for the case when fugitive agents do not use any optimal escape strategy but move in accordance with an own predefined trajectory. It is noted that this problem is a prototype of the pursuit problem performed using an arbitrary missile defense system. The paper shows that this missile defense system includes three components: a radar system, whose task is to detect an enemy missile and track it in real time; an automatic control system that processes this information, activates the third component, and controls it in real time; and interceptor missiles, whose task is to destroy enemy missiles. The essence of coordination of the automatic control system and interceptor missiles, radar system and automatic control system is determined from the point of view of the agent approach. It is noted that there are three categories of agents within the framework of the multi-agent pursuit/escape problem in a three-dimensional space: master agents, pursuing agents, and fugitive agents. The parameters of the arbitrary state of these agents are described, and it is determined what the agents know and how they act at each moment of the model time in the process of pursuit/escape in a three-dimensional space. On the basis of the proposed problem statement, the properties of the environment in which the agents operate are identified, and a list of methods that need to be developed is determined. It is noted that on the basis of such methods, it is planned to create a research prototype of a modeling system for pursuit in three-dimensional space, which should include a dynamic geographic information system (GIS) as a GIS capable of displaying and processing moving objects in real time.

**Keywords:** multi-agent pursuit, three-dimensional space, master agent, pursuing agent, fugitive agent, environment, surveillance area.

## 1. Вступ

Задача переслідування у тривимірному просторі належить до задач, що традиційно досліджуються в рамках теорії диференціальних ігор [1–3]. У той же час, як ми показали в [4] для випадку задач переслідування на площині, такі задачі також можуть бути успішно розв'язуватися за допомогою методів і моделей теорії агентів.

*Метою даної статті є постановка однієї задачі переслідування у тривимірному просторі з точки зору агентного підходу.*

## 2. Деякі передумови до постановки задачі

Розглянемо задачу мультиагентного переслідування у тривимірному просторі, виходячи з передумови, що для вирішення завдань переслідування використовується довільна система протиракетної оборони, яка складається із трьох основних компонентів:

- багатоцільової радіолокаційної станції (РЛС), завданням якої є виявлення ворожої ракети та її супроводження в реальному масштабі часу;
- системи автоматичного управління (САУ), яка обробляє цю інформацію, активує третій компонент та управляє ним;
- ракет-перехоплювачів, завданням яких є знищення ворожих ракет.

Вважатимемо, що САУ буде здатна в реальному масштабі часу одночасно керувати множиною ракет-перехоплювачів (які ми будемо розглядати як агентів-переслідувачів), кількість яких дорівнюватиме кількості виявлених засобами РЛС ворожих ракет (що розглядатимуться як агенти-утікачі), з метою перехоплення та знищення агентів-утікачів, виявлених у поточний момент часу.

Уточнимо сутність координації дій САУ та ракет-перехоплювачів із точки зору агентного підходу. Як зазначено в [4], одним із способів координації агентів є їх централізована взаємодія через єдиного агента. Цей спосіб взаємодії корисний у випадках, коли агенти потребують використання централізованих знань для розв'язання задач планування та контролю за виконанням їх дій. При цьому єдиний центральний агент (агент-майстер), через якого здійснюється взаємодія між іншими (підпорядкованими) агентами, планує дії підпорядкованих агентів та керує ними. Очевидно, що в нашому випадку як агент-майстер виступає САУ, а як його підпорядковані агенти (мобільні агенти-переслідувачі) виступають ракети-перехоплювачі.

Крім того, в рамках постановки задачі переслідування у тривимірному просторі необхідно вирішити питання координації дій РЛС та САУ. Будемо говорити, що агент-майстер у кожний момент модельованого часу знає координати кожного спостережуваного агента-утікача (як і координати відповідних агентів-переслідувачів), розуміючи під цим те, що САУ з визначеним часовим інтервалом отримує дану інформацію від РЛС. Під спостережуваними агентами будемо розуміти агентів, що перебувають у зоні видимості РЛС [5] (значення якої залежить від класу РЛС та природних впливів), або, як буде зазначено далі, в зоні спостереження відповідного агента-майстра.

Будемо також вважати, що траєкторія руху кожної ворожої ракети (агента-утікача) програмується заздалегідь, і, як наслідок, кожна з них рухається у тривимірному просторі за наперед визначеним власним маршрутом. Тобто агенти-утікачі не використовують які-небудь методи ухилення від зіткнення. Як наслідок, агенти-утікачі знають про всі свої подальші дії до моменту завершення їх руху (внаслідок їх збиття або влучання в запрограмовану ціль), але їх дії в наступний момент часу спостереження невідомі для агента-майстра.

Отже, відмітною особливістю даної задачі переслідування є те, що будь-який агент-утікач, що розглядається, в кожний момент часу не формує деяку оптимальну стратегію

утікання, а рухається відповідно до заздалегідь визначеної власної траєкторії.

Виходячи з зазначених передумов, виконаємо постановку цієї задачі.

### 3. Постановка задачі

Нехай задано тривимірний простір  $\mathbb{R}^3$ , який відповідає динамічному середовищу, в межах якого діють агенти.

У загальному випадку можна виділити три категорії агентів:

- 1) агенти-майстри, що формують множину  $AM = \{AM_1, AM_2, \dots, AM_k\}$ ;
- 2) агенти-переслідувачі, що формують множину  $P = \{P_1^j, P_2^j, \dots, P_n^j\}$ , де  $j$  пробігає значення від 1 до  $k$  (де  $k = \text{card}(AM)$ );

- 3) агенти-утікачі, що формують множину  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ .

Загальна кількість агентів-переслідувачів на початку процесу моделювання дорівнює числу  $n \times k$ , де  $n$  дорівнює кількості агентів-переслідувачів, підпорядкованих окремому агенту-майстру множини  $AM$  (будемо вважати, що вона однакова для будь-якого  $AM_j \in AM$ ), а  $k$  – кількості агентів-майстрів. Зауважимо, що задача переслідування у тривимірному просторі передбачає виконання умови, що  $n \times k \geq m$ , де  $m = \text{card}(E)$ .

Будь-який  $i$ -й агент множин  $P, E$  починає рух у момент часу  $t_i$ , має поточні координати у тривимірній системі координат і переміщується в  $\mathbb{R}^3$  у будь-який момент часу  $t > t_i$ , який передує його можливій зупинці (внаслідок знищення або влучання в ціль). При цьому існує єдиний агент-утікач  $E_0 \in E$ , який починає рух у момент часу  $t = 0$ .

Параметри стану  $i$ -го агента множин  $P, E$  в момент часу  $t \geq t_i$  однозначно описуються кортежем

$$\langle id_i, Cl_i, Bn_i, (x_i, y_i, z_i), (v_i, v_i^{\max}), \alpha_i^{XOY}, \beta_i^{XOZ} \rangle,$$

де  $id_i$  – унікальний ідентифікатор  $i$ -го агента;

$Cl_i$  – клас об'єкта, що відповідає  $i$ -му агенту (домен допустимих значень відповідає заданим типам ракет);

$Bn_i$  – приналежність об'єкта, що відповідає  $i$ -му агенту (домен допустимих значень: «свій», «чужий»);

$(x_i, y_i, z_i)$  – поточні координати  $i$ -го агента;

$(v_i, v_i^{\max})$  – поточна і максимально можлива швидкість руху  $i$ -го агента;

$\alpha_i^{XOY}$  – поточний кут руху  $i$ -го агента у площині XOY;

$\beta_i^{XOZ}$  – поточний кут руху  $i$ -го агента у площині XOZ.

Параметри стану  $j$ -го агента множини  $AM_j \in AM$  у момент часу  $t > 0$  однозначно описуються кортежем

$$\langle id_j, P_j, PE_j, ZS_j \rangle,$$

де  $id_j$  – унікальний ідентифікатор  $j$ -го агента-майстра;

$P_j$  – множина нерухомих агентів-переслідувачів  $P_j \subseteq P$ , підпорядкованих агенту-майстру  $AM_j \in AM$ ;

$PE_j$  – множина пар ідентифікаторів рухомих агентів  $(P_i^j, E_s)$ , що знаходяться в зоні

спостереження агента-майстра  $AM_j \in AM$ , де агент  $P_i^j$  підпорядкований  $AM_j$  та керується ним, а  $E_s \in E$  є агентом-утікачем, що переслідується агентом  $P_i^j$ ;

$ZS_j$  – зона спостереження  $j$ -го агента-майстра.

При першому потраплянні будь-якого агента-утікача  $E_s \in E$  в межі зон спостережень одного або декількох агентів-майстрів  $AM_j \in AM$  відбуваються автоматичний вибір та запуск агента-переслідувача  $P_i^j \in P$ , підпорядкованого окремому  $AM_j \in AM$ . Тут автоматичний вибір передбачає використання методів оптимізації для визначення агента-переслідувача  $P_i^j \in P$ , відстань від якого до агента-утікача  $E_s \in E$  буде мінімальною.

При виході агента-утікача  $E_s \in E$  за межі зони спостереження агента-майстра  $AM_j \in AM$  та вході в межі зони спостереження іншого агента-майстра  $AM_u \in AM$  відбуваються переговори між агентами-майстрами  $AM_j$  та  $AM_u$  з метою передачі управління переслідуванням агента-утікача  $E_s \in E$ . При цьому агент  $P_i^j \in P$ , що переслідує агента-утікача  $E_s$ , підпорядковується  $AM_u$  і далі позначається як  $P_i^u \in P$ .

Будемо вважати, що в кожний момент часу  $t \geq t_s$  агенту-утікачу  $E_s \in E$  відомо як його поточне положення, так і всі його майбутні положення до моменту припинення існування внаслідок його знищення (влучання в нього агента-переслідувача або його влучання в ціль), але він не знає положення інших агентів-утікачів, положення жодного агента-переслідувача. Тобто кожний утікач  $E_s \in E$  є агентом із наперед заданою поведінкою, яка не змінюється у процесі його руху.

Кожний агент-майстер  $AM_j \in AM$  в момент часу  $t \geq t_j$  у межах його зони спостереження знає положення всіх агентів-переслідувачів  $P_i^j \in P$ , положення всіх агентів-утікачів  $E_s \in E$ , швидкість та напрям їх руху в цей же момент часу  $t$ , однак йому невідомі майбутні маневри утікачів і переслідувачів.

Кожний агент-майстер  $AM_j \in AM$  має використовувати деяку оптимальну стратегію для управління підпорядкованими агентами-переслідувачами  $P_i^j \in P$  із метою наздогнати за мінімальний час утікачів  $E_s \in E$ , що знаходяться в його зоні спостереження.

Будемо вважати, що агент-переслідувач  $P_i^j \in P$  здійснив зустріч з агентом-утікачем  $E_s \in E$ , якщо положення  $P_i^j$  та  $E_s$  збігаються, при цьому сам агент-утікач вважається знищеним, а процес переслідування/утікання для  $P_i^j$  та  $E_s$  – завершеним.

З викладеного можна зробити висновки щодо властивостей навколишнього середовища, в якому перебувають агенти, та визначити перелік методів, які необхідно розробити.

Отже, навколишнє середовище, в якому перебувають агенти, є *складним* і має такі властивості: є частково спостережуваним (жодний агент не має інформації про дії, які планують здійснити інші агенти), стохастичним (жодний агент не може передбачити поведінку інших агентів), послідовним (поточне рішення будь-якого агента-майстра впливає на всі його майбутні дії), динамічним (агенти множин  $P, E$  є мобільними і в кожний момент свого руху змінюють стан навколишнього середовища, що впливає на процес прийняття рішень агентами-майстрами щодо їх наступних дій), неперервним (у процесі руху будь-якого агента множин  $P, E$  безперервно змінюються як стан навколишнього середовища, так і акти сприйняття агентом-майстром у середовищі та його дії в ньому), мультиагентним (задача переслідування/утікання за визначенням передбачає наявність принаймні двох мобіль-

них агентів множин  $P, E$  в навколишньому середовищі).

Крім того, можна визначити такий перелік методів, які необхідно розробити:

- метод формування оптимальної стратегії переслідування у тривимірному просторі;
- метод апроксимації траєкторій агентів-утікачів до згладжених кривих;
- методи моделювання поведінки агентів-утікачів;
- методи обміну інформацією між агентом-майстром та підпорядкованими йому агентами-переслідувачами;
- метод оптимального розподілу агентів-переслідувачів для переслідування наявних агентів-утікачів;
- методи оптимального розміщення агентів-майстрів на території з метою максимального її покриття з урахуванням їх зон спостереження;
- методи ведення переговорів між агентами-майстрами при зміні їх зон спостереження у процесі переслідування агентів-утікачів.

На основі цих методів передбачається створити дослідницький прототип моделюючої системи переслідування у тривимірному просторі. При цьому, оскільки в загальному випадку розглядається задача переслідування з прив'язкою до географічних об'єктів, однією з вимог до її моделювання є включення ГІС до складу створюваної моделюючої системи. Це передбачає необхідність проведення окремих досліджень зі створення нового класу ГІС – динамічних ГІС, які спроможні відображати та обробляти в реальному масштабі часу рухомі об'єкти.

#### 4. Висновки

У статті запропоновано постановку задачі мультиагентного переслідування у тривимірному просторі для випадку, коли агенти-утікачі рухаються за заздалегідь визначеними власними траєкторіями. В рамках виконаної постановки задачі визначено категорії агентів, що розглядаються, наведено основні властивості агентів та надано характеристику їх можливих дій у тривимірному просторі. На основі цього виявлено властивості навколишнього середовища, в якому перебувають агенти, та визначено перелік методів, які необхідно розробити. Зазначено, що прототип моделюючої системи, яку необхідно створити на основі таких методів, має містити у своєму складі динамічну ГІС.

#### СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Alias I.A., Jaman K., Ibragimov G. Pursuit differential game of many pursuers and one evader in a convex hyperspace. *Mathematical Modeling and Computing*. 2022. Vol. 9, N 1. P. 9–17. URL: <https://doi.org/0.23939/mmc2022.01.009>.
2. De Villiers R., Miloh T., Yavin Y. Stochastic pursuit-evasion differential games in 3D: The case of variable speed. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 1988. N 59. P. 25–38. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00939864>.
3. Li S., Wang C., Xie G. Pursuit-evasion differential games of players with different speeds in spaces of different dimensions. *American Control Conference (ACC)*. Atlanta, GA, USA, 2022. P. 1299–1304. DOI: <https://doi.org/10.23919/ACC53348.2022.9867329>.
4. Яловець А.Л. Мультиагентне моделювання переслідування на площині: від теорії до програмної реалізації: монографія. К.: Наукова думка, 2019. 165 с.
5. Васюта К.С., Тесленко О.В., Купрій В.М., Малишев О.А. Основи побудови радіолокаційних засобів розвідки повітряного простору. Харків: ХУПС, 2013. 212 с.

*Стаття надійшла до редакції 30.01.2024*