

Олександр Юрійович Пермяков (доктор технічних наук, професор)¹

Наталія Олександрівна Королюк (кандидат технічних наук, доцент)²

Анастасія Олександрівна Королюк²

Людмила Анатоліївна Коротченко³

¹ Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

² Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

³ Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна

НОВИЙ ПІДХІД ЩОДО ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ ПОЛЬОТУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

У статті пропонується підхід по формалізації знань про процес планування маршруту польоту безпілотного літального апарату на етапі планування повітряної розвідки за допомогою евристичних методів, які є кращими з точки зору врахування практики, досвіду, інтуїції, знань осіб, які приймають рішення, при веденні повітряної розвідки. Застосування безпілотного літального апарату в умовах вимог і обмежень, льотно-технічних можливостей безпілотного літального апарату, наявність засобів ураження противника передбачає множинну варіантність маршруту польоту, що обумовлює складність у прийнятті обґрунтованого рішення з побудови оптимального маршруту польоту. Як показує досвід практичного застосування безпілотного літального апарату, умови, вимоги, обмеження, що пред'являються до розвідувальних завдань, вплив зовнішніх факторів, облік найважливіших об'єктів для обльоту, можуть суперечити один одному, створюючи невизначеність при наданні пріоритету варіанту при плануванні. Розроблений метод формалізації знань про процес планування польоту безпілотного літального апарату на основі інтервальних нечітких множин типу 2 дозволяє формалізувати фактори, які враховують тактичні умови проведення повітряної розвідки, вплив зовнішнього середовища на дальність польоту безпілотного літального апарату у вигляді лінгвістичних і інтервально-оцінюваних параметрів для кожного варіанта. Запропонований підхід дозволяє сформувати область визначення лінгвістичних змінних, які використовуються для опису тактичних умов проведення повітряної розвідки і впливу зовнішнього середовища на дальність польоту безпілотного літального апарату, сформувати з множини найважливіших об'єктів повітряної розвідки найбільш значущих наземних об'єктів на основі оцінки ступеня недомінуемості елементів.

Ключові слова: планування маршруту польоту, інтервальні нечіткі множини типу 2, особа, що приймає рішення, нечітка логічна система, трикутні нечіткі числа, трапецієподібні нечіткі інтервали, знання, формалізація знань

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні загрози українській державності з боку РФ вимагають пошуку адекватної відповіді на щоденні виклики. Це видається неможливим без теоретико-методологічного осмислення сутності сучасних збройних зіткнень, аналізу, вивченню та узагальненню світового досвіду протистояння воєнній загрози [1-3]. Оборонний характер воєнної доктрини Збройних Сил України (ЗСУ) висуває високі вимоги до всіх елементів бойової готовності і підготовки військ. Збройні Сили повинні бути готові відбити агресію шляхом ведення оборонних дій. Найважливішою задачею командування при

оборонному характері воєнної доктрини стає постійне спостереження за противником, яке повинно забезпечити своєчасний і організований перехід військ з мирного на воєнний стан. Основна роль при цьому відводиться розвідці. Повітряна розвідка є однією з найважливіших умов успіху бойових дій авіації та інших родів військ, завданням якої є своєчасне забезпечення командування і штабів повними і достовірними даними про противника.

Знати замисел противника, розташування його засобів ураження та угруповання, відповідно реагувати – значить досягти успіху в бою. Особа, що приймає рішення, не здатна прийняти

правильне рішення або ефективно застосувати вогневі засоби, якщо вона не організує безперервну активну і цілеспрямовану розвідку, не отримує достовірні відомості про противника. Тому саме в теперішній час безпілотні літальні апарати (БПЛА) розглядаються як ефективний та надійний засіб повітряної розвідки. Завдяки оперативній доставці повної, достовірної інформації про противника досягається успішності ведення бойових дій.

Критерії ефективності планування маршруту польоту розвідувального БПЛА тактичної ланки обумовлюються [3-10]: завданням вищого штабу; можливостями противника щодо зриву розвідувального завдання; часовими параметрами планування та (або) виконання місії; параметрами, які визначають технічні можливості БПЛА. Застосування БПЛА в умовах вимог та обмежень, льотно-технічних можливостей БПЛА, наявність засобів ураження противника передбачає велику множину варіантів маршруту польоту, що обумовлює складність у прийнятті обґрунтованого рішення щодо побудови оптимального маршруту польоту БПЛА. Як доводить досвід практичного застосування БПЛА [1,4], умови, вимоги, обмеження, які висуваються до розвідувальних завдань, вплив зовнішніх факторів, врахування найважливіших об'єктів для польоту можуть суперечити один одному, створюючи невизначеність при наданні пріоритету будь-якому з них під час планування.

Тому виробка рекомендацій щодо планування маршрутів польоту розвідувальних БПЛА на етапі планування повітряної розвідки є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Підвищення ефективності повітряної розвідки з БПЛА тактичної ланки є достатньо поширеною науковою проблематикою, яку розглядає ряд вітчизняних та зарубіжних науковців. В [1-3] не враховано факторів впливу зовнішнього середовища, які, у свою чергу, вносять зміни у вихідний результат планування. Наведені фактори впливу враховуються із високим ступенем суб'єктивізму особи, яка планує маршрут польоту. У працях [2-5] розглядаються математичні моделі, які мають за мету підвищення ефективності розвідки з БПЛА шляхом визначення оптимального маршруту польоту за допомогою розрахунку ймовірності виконання завдань розвідки. Проте досвід застосування БПЛА в операції об'єднаних сил на сході України свідчить про необхідність врахування факторів, які впливають на ефективність розвідувальних операцій з БПЛА. Необхідно брати до уваги загрози та обмеження природного та технічного

характеру [6-9], які суттєво впливають на кінцевий результат польотного завдання.

Висока вразливість БПЛА від різних факторів бойової обстановки, низька «інтелектуальність» в автономному режимі через відсутність таких людських якостей, як оперативне ухвалення рішення, можливість перенесення основних зусиль на нові, більш важливі об'єкти, вміння ухилитися від небезпеки і оперативно застосовувати заходи до обману противника, є сьогодні нерозв'язними проблемами, що знижують ефективність бойового застосування сучасних БПЛА та потребують врахування вищеперахованих факторів на етапі планування повітряної розвідки [11-15].

Відомі методи планування маршруту польоту БПЛА можна розділити на дві категорії: детерміновані і евристичні. Детерміновані методи засновані на точних математичних моделях, строго певній послідовності обчислень. Евристичні методи шукають рішення усередині деякого підпростору можливих прийнятних рішень, при чому знайдене ними рішення формально може не бути оптимальним (глобальним екстремумом), воно є найкращим з точки зору повсякденної практики щодо вирішення завдань повітряної розвідки, оснований на досвіді, інтуїції, знаннях особи, що приймає рішення (ОПР).

В рамках досліджуваної предметної області, як правило, фактори, що впливають на планування маршруту, мають нечіткі (розмиті) границі, а для деяких елементів інтервалу не можна з повною впевненістю стверджувати належність цих елементів однозначно до інтервалу. У той же час, деякі параметри району особливої уваги, ширини смуги розвідки, зовнішні фактори традиційно задаються у вигляді лінгвістичних, а не числових значень [17,18]. Представлені подібним чином дані формалізуються, як правило, з використанням математичного апарату нечітких множин [15-20].

Отже, як показав аналіз публікацій за темою дослідження, описана вище задача, має важливість для науки і практики, залишається актуальною та потребує свого вирішення.

Мета статті. Розробка методу формалізації знань про процес планування польоту БПЛА на основі інтервальних нечітких множин типу 2 (ІНМТ2) на етапі підготовки до ведення повітряної розвідки в умовах невизначеності з врахуванням факторів, що характеризують тактичні умови проведення розвідувального завдання.

Виклад основного матеріалу дослідження

З математичної точки зору задача формалізації знань про процес планування маршруту польоту БПЛА в ході підготовки до ведення повітряної розвідки можна представити як формалізоване

представлення окремих прогнозованих факторів, що враховують тактичні умови проведення розвідки (границі ділянки фронту для проведення розвідки, розміри глибини оперативної побудови, ширину смуги розвідки, кількість засобів ППО), і вплив зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА (висота польоту, швидкість попутного, зустрічного вітру, швидкість БПЛА, температура повітря). В цих умовах прийнятним підходом є використання методів експертного оцінювання [20]. Значення окремих прогнозованих факторів знаходяться в деяких межах [13-19]. Це пов'язано з тим, що можна вказати діапазон (інтервал) можливих значень даних, але не можна точно визначити (спрогнозувати) їх конкретні значення. Заміна інтервальних величин середніми значеннями істотно знижує вірогідність результатів прогнозування, так як підвищення деталізації припущень про оперативну побудову противника, без достатніх на те підстав, збільшує ймовірність того, що результат прогнозування буде відрізнятися від дійсної обстановки в ході ведення повітряної розвідки.

Виходячи з математичної постановки задачі доцільно використовувати для представлення знань ІНМТ2, які забезпечують формалізацію більшої кількості додаткових ступенів невизначеності, в порівнянні з нечіткими множинами типу 1 (НМТ1), мають меншу обчислювальну складність, в порівнянні з загальними НМТ2. Для ІНМТ2 значення функції приналежності другого порядку незмінні, функція приналежності уніфікована (однорідна), на відміну від загальних НМТ2. ІНМТ2 дозволяють використовувати весь інструментарій інтервальних обчислень, мають значні практичні напрацювання ІНМТ2 і виражаються за допомогою ступеня істинності невизначеності, яка відображає розпливчастість і неточність приналежності елемента до даної множини. ІНМТ2 (\tilde{A}) характеризуються функцією приналежності другого типу (порядку) $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$, де $x \in X$ і $u \in J_x^u \subseteq [0, 1]$, $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$, що виражається

$$\tilde{A} = \{(x, u, \mu_{\tilde{A}}(x, u)) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x^u \subseteq [0, 1]\}. \quad (1)$$

Дискретне \tilde{A} можливо представити

$$\tilde{A} = \left\{ \sum_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) / x \right\} = \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\sum_{k=1}^M f_{x_i}(u_{ik}) / u_{ik} \right] / x_i \right\}, \quad (2)$$

де $\sum \sum$ об'єднання x і u .

Якщо $f_x(u) = 1, \forall u \in [J_x^u, \bar{J}_x^u] \subseteq [0, 1]$, то функція приналежності другого типу $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ виражена нижньою функцією приналежності

першого типу $J_x^u \equiv \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ і верхньою функцією приналежності першого типу $\bar{J}_x^u \equiv \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$, тоді ІНМТ2 можливо представити (3)

$$\tilde{A} = \{(x, u, 1) \mid \forall x \in X, \forall u \in [\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x), \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)] \subseteq [0, 1]\}. \quad (3)$$

Пропонується для формалізації знань про процес планування маршруту польоту використання трикутних нечітких чисел і трапецієподібних нечітких інтервалів, доцільність використання яких обумовлюється, по-перше, простотою виконання операцій над ними, по-друге, можливістю їх наочної графічної інтерпретації.

У загальному випадку нечітким інтервалом ІНМТ2 будемо називати ІНМТ2 \tilde{A}_{Π} з випуклими верхньою і нижньою функціями приналежності, що обмежують площу невизначеності даного ІНМТ2, а нечітким числом ІНМТ2 будемо називати ІНМТ2 \tilde{A}_{Δ} з випуклими і унімодальними верхньою і нижньою функціями приналежності, що обмежують площу невизначеності даного ІНМТ2.

Особливістю представлення трикутного нечіткого числа (ТНЧ) або трапецієподібного нечіткого інтервалу (ТНІ) в термінах ІНМТ2 є те, що по-перше, ліві і праві межі нечітких величин в термінах ІНМТ2 являють собою не точки, а інтервали невизначеності; по-друге, крайні значення інтервалів невизначеності є границями двох НМТ1, визначених верхньою функцією приналежності $\bar{\mu}_{\tilde{A}}$ і нижньою функцією приналежності $\underline{\mu}_{\tilde{A}}$, які обмежують займану площу невизначеності (FOU) ТНЧ ІНМТ2 або ТНІ ІНМТ2 зверху і знизу відповідно; по-третє, верхня $\bar{\mu}_{\tilde{A}}$, и нижня $\underline{\mu}_{\tilde{A}}$ функції приналежності визначають нормальні випуклі НМТ1 на непустому носії, причому в разі ТНЧ ІНМТ2 це будуть унімодальні нормальні випуклі НМТ1.

Таким чином, пропонується формально FOU ТНЧ ІНМТ2 \tilde{A}_{Δ} представлення у вигляді кортежу з параметрами

$$FOU(\tilde{A}_{\Delta}) = \langle \alpha_{\underline{\mu}}, \alpha_{\bar{\mu}}, a_{\underline{\mu}}, a_{\bar{\mu}}, \beta_{\underline{\mu}}, \beta_{\bar{\mu}} \rangle \quad (4)$$

де $\alpha_{\underline{\mu}}$ – лівий коефіцієнт нечіткості $\bar{\mu}_{\tilde{A}\Delta}$;

$\alpha_{\bar{\mu}}$ – лівий коефіцієнт нечіткості $\underline{\mu}_{\tilde{A}\Delta}$;

$a_{\underline{\mu}}$ – центр (модальне значення) $\bar{\mu}_{\tilde{A}\Delta}$;

$a_{\bar{\mu}}$ – центр (модальне значення) $\underline{\mu}_{\tilde{A}\Delta}$;

$\beta_{\underline{\mu}}$ – правий коефіцієнт нечіткості $\bar{\mu}_{\tilde{A}\Delta}$;

$\beta_{\bar{\mu}}$ – правий коефіцієнт нечіткості $\underline{\mu}_{\tilde{A}\Delta}$.

При цьому, трикутна верхня функція приналежності $\bar{\mu}_{\tilde{A}_\Delta}$ FOU(\tilde{A}_Δ) породжує нормальне унімодальне випукле НМТ1 на непустому носії - відкритому інтервалі

$$\left[a_{\mu}^- - \alpha_{\mu}^-, a_{\mu}^- + \beta_{\mu}^- \right],$$

а трикутна нижня функція приналежності $\underline{\mu}_{\tilde{A}_\Delta}$ FOU(\tilde{A}_Δ) породжує нормальне унімодальне випукле НМТ1 на непустому носії- відкритому інтервалі

$$\left[a_{\mu} - \alpha_{\mu}, a_{\mu} + \beta_{\mu} \right].$$

У загальному випадку, базу правил розрізняють за типом нечітких продукційних правил (в залежності від того, як формально подається висновок правила):

- нечіткі висловлювання;
- чіткі висловлювання;
- функції;

і за структурою нечітких продукційних правил:

- SISO структура реалізує один вхід і один вихід;
- MISO структура реалізує багато входів і один вихід;

MIMO структура реалізує багато входів і багато виходів.

При розробці методу формалізації знань про процес планування польоту БПЛА як нечіткого продукційного правила, що описує наперед заданий варіант маршруту БПЛА, будемо використовувати правила з MISO-структурою, де в якості умов використовуються фактори, що враховують тактичні умови проведення повітряної розвідки, вплив зовнішнього середовища, а в якості висновків використовуються рекомендації відносно доцільної стратегії польоту БПЛА в

конкретних умовах ведення повітряної розвідки (номера варіанта маршруту БПЛА), які формалізовані з використанням ІНМТ2.

Таким чином, метод формалізації знань про процес планування польоту БПЛА на основі ІНМТ2 включає наступні основні етапи (рис. 1):

представлення факторів, що враховують тактичні умови проведення повітряної розвідки, вплив зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА у вигляді визначення лінгвістичної змінної (ЛЗ) для кожного варіанту, що прогнозується;

формування області ЛЗ, що використовують для опису тактичних умов проведення повітряної розвідки та впливу зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА;

формування для кожної ЛЗ терм-множини, в якості елементів якої використовують найменування нечіткої змінної (НЗ), що описують лінгвістичні значення тактичних умов проведення повітряної розвідки, впливу зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА;

опис стратегій польоту БПЛА для кожного можливого варіанту оперативної побудови, впливу зовнішнього середовища;

формування з множини найважливіших об'єктів повітряної розвідки найбільш значимих наземних об'єктів на основі оцінки міри недомінуєності елементів;

представлення варіантів оперативної побудови, впливу зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА, доцільної стратегії польоту БПЛА у вигляді нечітких продукційних правил, де в якості антецедента, консеквента використовують нечіткі лінгвістичні висловлювання.

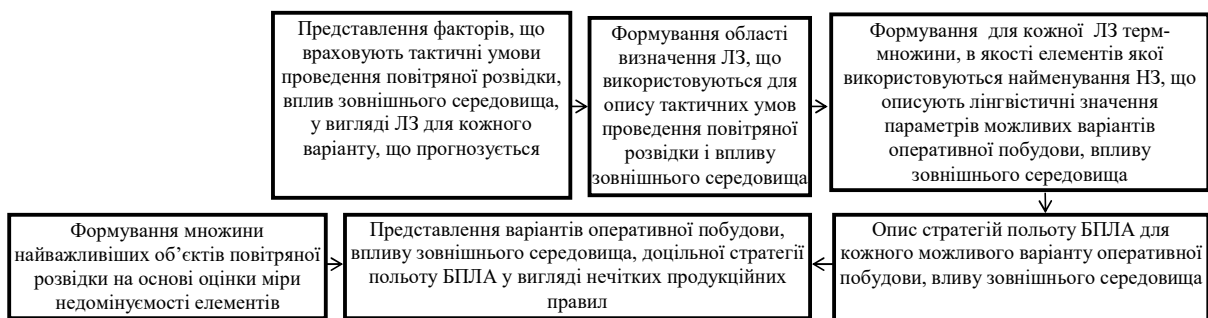


Рис. 1. Структура метода формалізації знань про процес планування польоту БПЛА на основі ІНМТ2 в ході підготовки до ведення повітряної розвідки

Опис факторів, що характеризують тактичну обстановку та вплив зовнішнього середовища, згідно виразу (4), є формальним представленням з точки зору подальшого використання методів нечіткого логічного висновку в рамках нечітких логічних систем інтервального типу 2.

Формальне представлення прогнозованих

факторів, як сукупності нечітких продукційних правил R, для подальшого формування бази правил в рамках розробленого методу здійснюється у вигляді

$$R : \text{IF } \beta_1 \text{ is } \alpha_1 \text{ AND } \dots \text{ AND } \beta_n \text{ is } \alpha_n \text{ THEN } \beta_{n+1} = \alpha_j^p, \quad (5)$$

де β_i – найменування вхідних ЛЗ, що задаються кортежем $\langle \beta_i, T_i, X_i, M_i \rangle$, $i = 1, \dots, n$ і n – кількість вхідних ЛЗ;

$T_i = \{ \alpha_i \}$ – множина значень (термів) вхідної

ЛЗ правила R , що задається кортежем $\langle \alpha_i, X_i, \tilde{A} \rangle$, $i = 1, \dots, n$, де $\tilde{A} \subseteq X_i$, $\tilde{A} = \{ x, \mu_{\tilde{A}}(x) \}$

або $\tilde{A} = \{ ((x, u), 1) \mid \forall x \in X_i, \forall u \in J_x \subseteq U = [0, 1] \}$ – ІНМТ2 на множині X_i , описує можливі значення, які може приймати НЗ $\alpha_i \in T_i$;

M_i – семантична процедура, яка ставить у відповідність значенням ЛЗ нечітку множину.

Відзначимо, що синтаксична процедура генерування нових значень для ЛЗ G_i не використовується, так як всі значення ЛЗ в рамках запропонованого підходу визначаються на етапі формування бази правил, а β_{n+1} – найменування вихідної ЛЗ «Доцільна стратегія польоту», що задається кортежем

$$\langle \beta_{n+1}, T_{n+1}, Y, M_{n+1} \rangle, \quad (6)$$

де $T_{n+1} = A_p = \{ \alpha_j^p \}$ – множина значень (термів)

вихідної ЛЗ правила R , кожне з яких представляє собою рекомендацію по використанню доцільної стратегії польоту БПЛА з урахуванням виду операції;

Y – область значень термів, найменування яких входять в T_{n+1} , що представляють номер стратегії;

M_{n+1} – семантична процедура, яка має у відповідність значенням ЛЗ одноточечну нечітку множину;

α_j^p – значення терма вихідної ЛЗ у вигляді

найменування з множини $A_p = \{ \alpha_j^p \}$, $j = 1, \dots, m$,

m – кількість стратегій.

Мінімальна кількість сформованих нечітких продукційних правил відповідає потужності множини можливих варіантів комбінацій можливих факторів, що характеризують тактичну обстановку і вплив зовнішнього середовища, спрогнозованих, в ході підготовки до ведення повітряної розвідки.

Отже, з точки зору математичної формалізації, нечітке продукційне правило щодо формування стратегії польоту БПЛА розглядається як нечітка імплікація виду

$$\tilde{A} \rightarrow \tilde{B} \quad (7)$$

де $\tilde{A} \subseteq X$ і $\tilde{B} \subseteq Y$ – ІНМТ2, що представляють відповідно умови і висновок (що описують можливі значення НЗ), причому \tilde{B} є одноточечне

ІНМТ2 для якого $\mu_{\tilde{B}}(y) = \frac{1}{1}$ (при поданні ІНМТ2

способом вертикального зрізу), X – область визначення умови (в загальному випадку $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ і відповідно $\tilde{A} = \tilde{A}_1 \times \tilde{A}_2 \times \dots \times \tilde{A}_n$), Y – область визначення висновку (номера доцільних стратегій польоту).

При цьому забезпечення несуперечності бази правил полягає в тому, щоб не допустити в процесі формування нечітких продукційних правил випадків, коли одна і та ж комбінація термів ЛЗ призводить до визначення різних стратегій польоту БПЛА. Сукупність нечітких продукційних правил у вигляді виразів (5-7) являє собою базу правил.

Таким чином, нечіткі продукційні правила формуються для кожної комбінації факторів, що характеризують тактичну обстановку та вплив зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА, і використовуються в подальшому в якості вхідних даних методу формалізації знань про процес визначення доцільної стратегії польоту БПЛА в ході підготовки до ведення повітряної розвідки на основі НЛС ІТ2.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Таким чином, досліджено, що для задачі планування маршруту польоту БПЛА на етапі планування повітряної розвідки доцільно використовувати евристичні методи, які шукають рішення усередині деякого підпростору можливих прийнятних рішень і вони є найкращими з точки зору врахування практики, досвіду, інтуїції, знань ОПР при веденні повітряної розвідки. Значення окремих прогнозованих факторів доцільно представляти з використанням математичного апарату нечітких множин. Розроблений метод формалізації знань про процес планування польоту БПЛА на основі ІНМТ2 дозволяє формалізувати фактори, що враховують тактичні умови проведення повітряної розвідки, вплив зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА у вигляді лінгвістичних і інтервально-оцінюваних параметрів для кожного варіанту, які дозволяють врахувати невизначеність; формувати область визначення лінгвістичних змінних, що використовують для опису тактичних умов проведення повітряної розвідки та впливу зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА; формувати з множини найважливіших об'єктів повітряної розвідки найбільш значимих наземних об'єктів на основі оцінки міри невідомості елементів; формалізувати стратегії польоту БПЛА для кожного можливого варіанту оперативної побудови, впливу зовнішнього середовища у вигляді нечітких продукційних правил, де в якості антецедента, консеквента використовують нечіткі лінгвістичні висловлювання.

Література

- 1. Камінський В.В.** Аналіз застосування безпілотних літальних апаратів в сучасних збройних конфліктах та АТО на Сході України / В.В. Камінський, В.В. Тюрін, О.А. Корщець, Н.О. Королук // Наука і оборона. – 2017. – № 3(4). – С.4-8. **2. Степанов Г.С.** Погляди щодо проблемних питань застосування Повітряних Сил в протиповітряній обороні / Г.С. Степанов, В.В. Камінський, М.А. Павленко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2018. – №1(30). – С. 18-23. **3. Камінський В.В.** Боротьба з повітряним тероризмом має починатися з землі / В.В. Камінський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1(14). – С. 16-23. **4. Олизаренко С.А.** Нечеткие множества типа 2. Терминология и представление / С.А. Олизаренко, Е.В. Брежнев, А.В. Перепелица // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2010. – Вып. 8(89). – С. 131–140. **5. Олизаренко С.А.** Интервальные нечеткие множества типа 2. Терминология, представление, операции / С.А. Олизаренко, А.В. Перепелица, В.А. Капранов // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2011. – Вып. 2(92). – С. 39 – 45. **6. Королук Н.О.** Обґрунтування сучасного підходу щодо автоматизації процесів прийняття рішень по управлінню авіацією / Н.О. Королук, О.В.Першин, Т.О. Грідньова, С.О. Шевченко // Збірник наукових праць. - 2019. - №1(59). – С.32-39. **7. Saaty, T.** “Structures in decision making: On the subjective geometry of hierarchies and networks [on line]”. European Journal of Operational Research, vol. 199, is. 3, 2009, p. 867–872. **8. Королук Н.О.** Процедура формалізації даних, які використовуються при описі процесу управління рухом повітряних об’єктів / Н.О. Королук, Р.В. Корольов, О.А. Корщець // Збірник наукових праць ХНУПС. – 2017. – № 4(53). – С.103-106. **9. Korolyuk, N.** “An approach to prediction of the telecommunication network quality parameters under the conditions of non-stochastic uncertainty”, Telecommunications and Radio Engineering, Issue 11. Volume 76, 2017. Pages 1027-1032. **10. Королук Н.О.** Удосконалення програмного забезпечення комплексів засобів автоматизації при розпізнаванні типу повітряного об’єкта / Н.О.Королук, В.В. Синявський, Д.О. Хаустов // Системи озброєння і військової техніки. – 2017. – № 1(49). – С. 67-80. **11. Тимочко О.І.** Метод оцінки ступеня небезпеки нештатних ситуацій у повітряному просторі / О.І. Тимочко, П.П. Зусь // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 1(26). – С. 49-53. Теоретические основы автоматизации процессов выработки решений в системах управления / В.Е. Ярушек, В.П. Прохоров, А.В. Мишин, Б.Н. Судаков. – Х.: ХУВС, 2011. – 355 с. **12. Ротштейн О.П.** Діагностика на базі нечітких відношень в умовах невизначеності: моногр. / О.П. Ротштейн, Г. Б. Ракитянська. – Вінниця: Універсум, 2006 – 275 с. **13. Korolyuk, N.** (2014), “Hybrid model of knowledge for situation recognition in airspace”, Automatic Control and Computer Sciences, Vol. 49, pp.16-25. **14. Alimpiev, A.** (2017), “Selecting a model of unmanned aerial vehicle to accept it for military purposes with regard to expert data” P.Berdnik, N.Korolyuk, O.Korshets, M. Pavlenko, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774. - №1/ 9 (85 pp 53-60. **15. Hnagras, H.** Introduction to Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers – Towards Better Uncertainty Handling in Real World Applications / Hani Hnagras, Christian Wagner // IEEE eNewsletter. Systems, Man and Cybernetics Society. – Issue 27. –June 2009. **16. Mendel, J.** Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple / J.M. Mendel, R.I. John, Feilong Liu // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – December 2006. – Vol. 14, no. 6. – P. 808-821. **17. Пермяков О.Ю.** Інформаційно – телекомунікаційні технології і сучасна збройна боротьба / О.Ю. Пермяков, Н.О. Королук // Науково-технічна конференція молодих учених «Актуальні проблеми інформаційних технологій» (20-21 листопада 2018 року). - Київ: НУОУ, 2018. - С. 5-6. **18. Mendel, J.** Standard Background Material About Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems / J.M. Mendel, H. Hnagras, R.I. John // IEEE CIS Standards Committee [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://ieee-cis.org/technical/standards/>. **19. Wu, H.** Uncertainty Bounds and Their Use in the Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems / H. Wu, J.M. Mendel // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – October 2002. – Vol. 10, no. 5. – P. 622-639. **20. Wu, D.** Enhanced Karnik-Mendel Algorithms / D. Wu, J.M. Mendel // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – August 2009. – Vol. 17, no. 4. – P. 923-934. **21. Mendel, J.** On centroid calculations for Type-2 Fuzzy Sets / J.M. Mendel // Appl. Comput. Math. – 2011. – V.10, no.1, Special Issue. – P. 88-96.

НОВЫЙ ПОДХОД ПРО ПЛАНИРОВАНИЮ МАРШРУТА ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Александр Юрьевич Пермяков (доктор технических наук, профессор)¹
Наталья Александровна Королук (кандидат технических наук, доцент)²
Анастасия Александровна Королук²
Людмила Анатольевна Коротченко²

¹ *Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина*

² *Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени И. Кожедуба, Харьков*

³ *Военный институт телекоммуникаций и информатизации имени Героев Крут, Киев, Украина*

В статье предлагается подход по формализации знаний о процессе планирования маршрута полета беспилотного летательного аппарата на этапе планирования воздушной разведки с помощью эвристических методов, которые являются лучшими с точки зрения учета практики, опыта, интуиции, знаний лиц, принимающих решения, при ведении воздушной разведки. Применение беспилотного летательного аппарата в условиях требований и ограничений, летно-технических возможностей беспилотного летательного аппарата, наличие средств поражения противника предполагает большое множество вариантов маршрута полета, что обуславливает сложность в принятии обоснованного решения по построению оптимального маршрута полета беспилотного летательного аппарата. Как показывает опыт практического применения БПЛА, условия, требования, ограничения, предъявляемые к разведывательным задачам, влияние внешних факторов, учет важнейших объектов для облета, могут противоречить друг другу, создавая неопределенность при предоставлении приоритета любому из них при планировании. Разработанный метод формализации знаний о процессе планирования полета БПЛА на основе ИНМТ2 позволяет формализовать факторы, учитывающие тактические условия проведения воздушной разведки, влияние внешней среды на дальность полета беспилотного летательного аппарата в виде лингвистических и интервально-оцениваемых параметров для каждого варианта, которые позволяют учесть неопределенность; формировать область определения лингвистических переменных, используемых для описания тактических условий проведения воздушной разведки и влияния внешней среды на дальность полета беспилотного летательного аппарата; формировать из множества важнейших объектов воздушной разведки наиболее значимых наземных объектов на основе оценки степени недоминантности элементов; формализовать стратегии полета беспилотного летательного аппарата для каждого возможного варианта оперативного построения, влияния внешней среды в виде нечетких продукционных правил, где в качестве антецедента, консеквента используют нечеткие лингвистические выражения.

Ключевые слова: планирование маршрута полета, интервальные нечеткие множества типа 2, лицо, принимающее решение, нечеткая логическая система, треугольные нечеткие числа, трапециевидные нечеткие интервалы, знания, формализация знаний

A NEW APPROACH TO PLANNING THE FLIGHT ROUTE OF UNMANNED AIRCRAFT BASED ON FUZZY SETS

Oleksandr Permiakov (Doctor of technical sciences, professor)¹
Natalia Korolyuk (Candidate of Technical Sciences, associate professor)²
Anastasiia Korolyuk²
Liudmyla Korotchenko³

¹ *National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine*

² *Kharkiv national Air Forces University named after I. Kozhedub, Kharkiv, Ukraine*

³ *Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes Krut, Kiev, Ukraine*

The article proposes an approach to formalize knowledge about the process of planning the flight route of an unmanned aerial vehicle at the stage of planning aerial reconnaissance using heuristic methods that are the best in terms of taking into account the practice, experience, intuition, knowledge of decision-makers when conducting aerial reconnaissance. The use of an unmanned aerial vehicle in the conditions of requirements and restrictions, the flight technical capabilities of an unmanned aerial vehicle, the availability of means of destruction of the enemy suggests a large variety of flight route options, which makes it difficult to make an informed decision on building the optimal flight route for an unmanned aerial vehicle. As the experience of the practical application of submarines shows, the conditions, requirements, restrictions imposed on reconnaissance tasks, the influence of external factors, the account of the most important objects for overflight, can contradict each other, creating uncertainty when giving priority to any of them in planning. The developed method of formalizing knowledge about the process of flight planning of an unmanned aerial vehicle based on INMT2 allows one to formalize factors that take into account the tactical conditions for conducting aerial reconnaissance, the influence of the external environment on the flight range of an unmanned aerial vehicle in the form of linguistic and interval-estimated parameters for each option, which allow taking into account uncertainty; to form the domain of definition of linguistic variables used to describe the tactical conditions for conducting aerial reconnaissance and the influence of the external environment on the flight range of an unmanned aerial vehicle; to form the most significant ground objects from the set of the most important objects of aerial reconnaissance on the basis of an assessment of the degree of non-dominance of elements; to formalize the flight strategies of an unmanned aerial vehicle for each possible variant of operational construction, the

influence of the external environment in the form of fuzzy production rules, where fuzzy linguistic expressions are used as an antecedent, consequent.

Keywords: *flight route planning, interval fuzzy sets of type 2, decision maker, fuzzy logical system, triangular fuzzy numbers, trapezoidal fuzzy intervals, knowledge, knowledge formalization*

References

1. **Kaminskiy, V.V.**, Analysis of application of UAF in modern armed conflicts on East of Ukraine / V.V. Kaminskiy, V.V. Turin, // Science and defensive. - 2017. - № 3 (4). - P.4-8.
2. **Stepanov, G.S.**, Kaminskiy, V.V., Pavlenko, M.A. (2018), "Take a look at the problematic power supply of the Reconciled Forces in the prototype defense", [Pohlyady odnosytel'no problemnykh voprosam! Zastosuvannya Povitryanykh Syl v protipovitryaniy oboronii], Science and Technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine, No. 1(30), pp.18-23.
3. **Kaminskiy, V.V.**, (2014), "The fight against air terrorism must begin with land", [Borotba z povitryanim terorizmom mac pochynatisya z zemli], Science and technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine, No. 1(14), pp. 16-23.
4. **Olizarenko, S.A.**, Brezhnev, Ye.V., Perepelitsa, A.V. (2010), "Nechetkiye mnozhestva tipa 2. Terminologiya i predstavleniye" [Nechitki mnozhyny typu 2. Terminolohiya i uyavleniya], Systems for processing information, VIP. 8(89). pp. 131–140.
5. **Olizarenko, S.A.**, Perepelitsa, A.V., Kapranov, V.A. (2011), "Interval fuzzy sets of type 2. Terminology, representation, operations" [Interval'nyye nechetkiye mnozhestva tipa 2. Terminologiya, predstavleniye, operatsii], Systems for processing information, VIP. 2 (92), pp. 39 - 45.
6. **Korolyuk, N.**, Pershin, A. (2019), "Ground of modern method in relation to the avtomatic processes of making decision for by the aviation's" [Osnova suchasnoho metodu shchodo avtomatychnykh protsesiv pryynyattya rishennya aviatsiyeyu], Collection of scientific works, №1 (59), pp. 32-39.
7. **Saaty, T.**, (2009), "Structures in decision making: On the subjective geometry of hierarchies and networks [on line]", European Journal of Operational Research, vol. 199, is. 3, pp. 867–872.
8. **Korolyuk, N.O.**, Korolov, R.V. and Korshets, O.A., (2017), "Procedura formalizacii danih, yaki vikoristovuyut'sya pri opisi procesu upravlinnya ruhom povitryanih ob'ektiv", [Procedure for formalizing data used in describing the process of controlling the movement of air objects], Communication, radio engineering, acoustics and navigation. pp. 103-106.
9. **Korolyuk, N.**, (2017), "An approach to prediction of the telecommunication network quality parameters under the conditions of non-stochastic uncertainty", Telecommunications and Radio Engineering, Issue 11. Volume 76, pp. 1027-1032.
10. **Korolyuk, N.O.**, Sinyavsky, V.V. and Haustov, D.O. (2017), "Udoskonalennya programnogo zabezpechennya kompleksiv zasobiv avtomatizacii pri rozpiznavanni tipu povitryanogo ob'ekta", [Improvement of software of complexes of automation means when recognizing the type of air object], Systems of armament and military equipment, No. 1(49), pp. 67-80.
11. **Timochko, O.I.**, and Zuyev, P.P. (2017), "Metod ocinki stupenya nebezpeki neshtatnih situacij u povitryanomu prostori", [Method of estimation of the degree of danger of abnormal situations in the air space], Science and technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine, No. 1(26), pp. 49-53.
12. **Yarushek, V.E.**, Prokhorov, V.P., Mishin, A.V. and Sudacov, B.N. (2011), "Teoreticheskie osnovy avtomatizacii processov vyrabotki reshenij v sistemah upravleniya", [Theoretion bases of automation of decision-making processes in control systems], KNAFU, 355 p.
13. **Rotshtein O. P.**, (2006) "Diahnostyka na bazi nechitkikh vidnoshen' v uslovyakh nevizna-chenosti", [Diagnosis based on fuzzy relationships in conditions of uncertainty], Vinnica, MD, 275 p.
14. **Korolyuk, N.**, (2014) , "Hybrid model of knowledge for situation recognition in airspace", Automatic Control and Computer Sciences, Vol. 49, pp.16-25.
15. **Alimpiev, A.**, (2017), "Selecting a model of unmanned aerial vehicle to accept it for military purposes with regard to expert data" P.Berdnik, N.Korolyuk, O.Korshets, M. Pavlenko, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774. - №1/ 9 (85 pp 53-60.
16. **Hagras, H.**, Introduction to Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers – Towards Better Uncertainty Handling in Real World Applications / Hani Hagras, Christian Wagner // IEEE eNewsletter. Systems, Man and Cybernetics Society. – Issue 27. –June 2009.
17. **Mendel, J.M.**, Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple / J.M. Mendel, R.I. John, Feilong Liu // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – December 2006. – Vol. 14, no. 6. – P. 808-821.
18. **Permiakov, O.**, Korolyuk, N. (2018), "Informatsiyno – telekomunikatsiyni tekhnolohiyi i suchasna zbroyna borot'ba" [Information and telecommunication technologies and modern armed struggle], Scientific and technical conference of young scientists "Actual problems of information technologies", Kiev, MD, pp. 5-6.
19. **Mendel, J.M.**, Standard Background Material About Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems / J.M. Mendel, H. Hagras, R.I. John // IEEE CIS Standards Committee [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://iee-cis.org/technical/standards/>.
20. **Wu, H.**, Uncertainty Bounds and Their Use in the Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems / H. Wu, J.M. Mendel // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – October 2002. – Vol. 10, no. 5. – P. 622-639.
21. **Wu, D.**, Enhanced Karnik-Mendel Algorithms / D. Wu, J.M. Mendel // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – August 2009. – Vol. 17, no. 4. – P. 923-934.