УДК 004.8:623.746

А. Ф. Волков, А. С. Убий-Вовк

АДАПТИВНИЙ МЕТОД ФОРМУВАННЯ ПРІОРИТЕТІВ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Анотація: *Розглянуто проблему визначення пріоритетів повітряних цілей за умов зміни тактичної ситуації та неповної визначеності вхідної інформації. Удосконалено метод на основі нечіткого логічного виведення шляхом введення дворівневого механізму адаптації, який поєднує оперативне контекстне коригування коефіцієнтів відносної важливості правил і довгострокову оптимізацію параметрів нечіткої моделі. Запропоновано автоматичне визначення глибини адаптаційного впливу за середньоквадратичною похибкою. Розглянуто функціонування основного та адаптаційного контурів, а також механізм диференційованого врахування контексту. Експериментально підтверджено підвищення адаптивності запропонованого методу та внесок обох рівнів адаптації у підвищення точності визначення пріоритетів.*

Ключові слова: *адаптація, контекстна релевантність, нечітка логіка, оптимізація, повітряні цілі, пріоритет.*

Abstract: *The problem of assigning priorities to aerial targets under changing tactical conditions and incomplete input information is considered. A fuzzy logic-based method is improved by introducing a two-level adaptation mechanism that combines operational contextual adjustment of rule importance coefficients with long-term optimization of fuzzy model parameters. The depth of adaptation is automatically determined using root mean square error. The operation of the main and adaptation loops, as well as the mechanism for differentiated context handling, is described. Experimental results confirmed the improved adaptability of the proposed method and the contribution of both adaptation levels to the accuracy of target prioritization.*

Keywords: *aerial targets, adaptation, contextual relevance, fuzzy logic, optimization, priority assignment.*

У процесі функціонування систем підтримки прийняття рішень протиповітряної оборони важливим завданням є визначення пріоритетності повітряних цілей з урахуванням їхніх характеристик, тактичних обмежень та поточної обстановки. Застосування нечіткої логіки дає змогу формалізувати експертні знання у вигляді системи продукційних правил та виконувати оцінювання за умов неповноти і невизначеності вхідної інформації. При цьому використання статичної нечіткої моделі обмежує можливості врахування змін тактичної ситуації, оскільки встановлені коефіцієнти важливості правил не завжди відповідають умовам поточного сценарію.

Для усунення цього обмеження удосконалено метод визначення пріоритету повітряних цілей, внутрішню структуру якого сформовано як сукупність функціонально взаємопов’язаних компонентів, що забезпечують перетворення інформації про повітряну обстановку у впорядковану множину пріоритетів. Метод поєднує алгоритмічні етапи визначення пріоритету з механізмами формалізації експертних знань у вигляді нечітких продукційних правил та адаптації параметрів моделі до умов її функціонування.

Структура удосконаленого методу охоплює два взаємопов’язані контури: основний та адаптаційний. Основний контур забезпечує безпосереднє визначення пріоритетів та містить блоки формалізації вхідних даних, нечіткого логічного виведення, формування числового значення пріоритету та формування множини пріоритетів [1]. Адаптаційний контур призначений для коригування параметрів нечіткої моделі та охоплює контекстний модуль, блок оцінювання похибки, блок формування еталонних пріоритетів і блок оптимізації. Взаємодія контурів здійснюється через базові параметри моделі та ефективні коефіцієнти відносної важливості правил.

Основною особливістю запропонованого підходу є дворівнева адаптація, яка враховує зміни тактичної ситуації у коротко- та довгостроковій перспективах. Оперативний рівень здійснює контекстне коригування ефективних коефіцієнтів правил без зміни базового параметричного вектора. Довгостроковий рівень уточнює сам параметричний опис нечіткої моделі на основі накопичених результатів її функціонування. Такий розподіл дає змогу

враховувати швидкі зміни обстановки без необхідності постійної перебудови всієї нечіткої системи.

Вхідна інформація методу охоплює параметри повітряних цілей, тактичні обмеження та контекстні умови функціонування системи. На основі цих даних нечітка модель Мамдані визначає числовий пріоритет цілей із використанням відповідних операторів агрегування та дефазифікації [2].

У процесі нечіткого виведення вхідні параметри проходять фазифікацію, після чого на основі сформованих ступенів належності визначається активація продукційних правил. Важливість правил враховується під час агрегування їхнього впливу на вихідну оцінку. При цьому базові коефіцієнти задають початковий внесок кожного правила, а його оперативне коригування здійснюється контекстним модулем відповідно до поточного сценарію. У результаті основний контур зберігає загальний механізм нечіткого виведення, але використовує актуалізовані параметри оцінювання.

Для врахування змін тактичної обстановки передбачено контекстний модуль, який визначає поточний сценарій і коригує важливість окремих правил бази знань. Вибір сценарію здійснюється за еталонними описами з урахуванням попереднього стану, що запобігає частому перемиканню [3]. Вплив контекстних змінних на правила визначається матрицею контекстної релевантності. Сформовані ситуативні коефіцієнти дають змогу підсилювати або послаблювати вплив релевантних правил, не змінюючи базових налаштувань інших правил.

Другий рівень адаптації забезпечує довгострокове налаштування нечіткої моделі за накопиченими даними. Необхідність і глибина оптимізації визначаються за середньоквадратичною похибкою (RMSE) між модельними та еталонними пріоритетами. Залежно від її величини застосовується штатний режим, локальна параметрична або структурно-параметрична оптимізація, що може охоплювати налаштування функцій належності та методу дефазифікації [4].

Таким чином, оперативне коригування та довгострокова оптимізація виконують різні функції. Контекстний модуль реагує на зміну поточного сценарію та забезпечує швидке коригування впливу правил. Натомість оптимізаційний блок аналізує накопичені відхилення й визначає, чи потребує модель глибшого налаштування. Це дає змогу не запускати обчислювально складні процедури за кожної зміни обстановки, а застосовувати їх лише тоді, коли поточних механізмів адаптації недостатньо.

Глибина адаптаційного впливу визначається за ступенем відхилення модельних оцінок від еталонних. Останні формуються незалежною процедурою на основі узгоджених експертних оцінок та результатів аналізу бойового застосування й використовуються як опорні значення для обчислення похибки, а не як безпосередній результат роботи нечіткої моделі.

Для реалізації довгострокової адаптації передбачено параметричну, структурну та структурно-параметричну оптимізацію. Параметрична оптимізація змінює числові параметри функцій належності та коефіцієнти відносної важливості правил за незмінної структури моделі. Структурна оптимізація передбачає зміну типів функцій належності або методу дефазифікації. Структурно-параметрична оптимізація поєднує обидва типи змін.

Для локального уточнення неперервних параметрів використовується метод роєвої оптимізації частинок [5]. У разі необхідності структурно-параметричної перебудови застосовується гібридний підхід, що поєднує генетичний алгоритм та метод роєвої оптимізації частинок, оскільки простір оптимізації містить неперервні й дискретні складові [6]. Генетичний алгоритм забезпечує глобальний пошук рішень, включно зі структурними змінами, тоді як метод роєвої оптимізації частинок виконує локальне уточнення неперервних параметрів. Взаємодія алгоритмів реалізується через періодичний обмін найкращими рішеннями.

Важливою властивістю запропонованого методу є розмежування часових масштабів основного й адаптаційного контурів. Формування пріоритетів виконується на кожному такті надходження інформації про повітряну обстановку, тоді як оптимізаційні процедури запускаються лише за необхідності. У режимах локальної та структурно-параметричної оптимізації відповідні процедури виконуються асинхронно, у фоновому режимі. Основний контур продовжує визначати пріоритети з поточним параметричним вектором і не очікує завершення оптимізації. Оновлені параметри застосовуються після завершення процедури, що забезпечує безперервність роботи методу.

Для оцінювання ефективності методу проведено імітаційні експерименти з порівнянням удосконаленого, базового статичного та відомого адаптивного методів [7]. Результати підтвердили вищу адаптивність запропонованого підходу за змін повітряної обстановки та внесок обох рівнів адаптації у підвищення точності визначення пріоритетів.

Таким чином, запропонований метод поєднує оперативне контекстне коригування та довгострокову оптимізацію параметрів нечіткої моделі. Це забезпечує адаптацію до змін тактичної обстановки без блокування основного контуру та зі збереженням точності й оперативності формування пріоритетів.

Список використаних джерел

1. Volkov A., Bazilo S., Tokar O., Horbachov K., Lutsyshyn A., Zaitsev I., Iasechko M. Automated assessment of the air situation during the preparation and conduct of combat operations using a decision support system based on fuzzy networks of target installations. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2022. Vol. 22, No. 11. P. 184–188. DOI: 10.22937/IJCSNS.2022.22.11.26.
2. Волков А. Ф., Стадніченко В. Г., Ярощук Р. В., Ясинський О. М., Слободенюк Ю. В. Розробка моделі визначення важливості повітряних цілей на основі нечіткої логіки. *Системи озброєння і військова техніка*. 2025. № 4(80). С. 39–47. DOI: 10.30748/soivt.2024.80.05.
3. Deaecto G. S., Souza M., Geromel J. C. Chattering free control of continuous-time switched linear systems. *IET Control Theory & Applications*. 2014. Vol. 8, No. 5. P. 348–354. DOI: 10.1049/iet-cta.2013.0065.
4. Gudwin R. R., Gomide F. A. C., Pedrycz W. Context adaptation in fuzzy processing and genetic algorithms. *International Journal of Intelligent Systems*. 1998. Vol. 13, No. 10–11. P. 929–948. DOI: 10.1002/(SICI)1098-111X(199810/11)13:10/11<929::AID-INT4>3.0.CO;2-0.
5. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN 1995. International Conference on Neural Networks*. 1995. Vol. 4. P. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
6. Martínez-Soto R., Castillo O., Aguilar L. T. Type-1 and Type-2 fuzzy logic controller design using a Hybrid PSO–GA optimization method. *Information Sciences*. 2014. Vol. 285. P. 35–49. DOI: 10.1016/j.ins.2014.07.012.
7. Tuncer O., Cirpan H. A. Adaptive fuzzy based threat evaluation method for air and missile defense systems. *Information Sciences*. 2023. Vol. 643. Art. 119191. DOI: 10.1016/j.ins.2023.08.004.

Волков Андрій Федорович *– начальник кафедри, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: vaf75takt@gmail.com, ORCID https//orcid.org/0000-0003-1566-9893.*

Убий-Вовк Анна Сергіївна *– курсантка, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: vee74@protonmail.com, ORCID https://orcid.org/0009-0002-5118-4447.*

Volkov Andrii Fedorovich *– head of department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: vaf75takt@gmail.com, ORCID https//orcid.org/0000-0003-1566-9893.*

Ubyi-Vovk Anna Serhiivna *– cadet, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: vee74@protonmail.com, ORCID https://orcid.org/0009-0002-5118-4447.*