УДК 004.8:629.735

ІНКРЕМЕНТАЛЬНЕ НАВЧАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ДЛЯ КОРЕКЦІЇ ТРАЄКТОРІЙ БПЛА

Магльованний В. А.[1]; Онищенко В. Ф., к.ф.-м.н.[2]
[1,2] Національний університет «Запорізька політехніка»
[1,2] Україна, Запоріжжя
[1] kvet1519@gmail.com; [2] https://orcid.org/0000-0002-4213-7131

Анотація. *Розглянуто застосування інкрементального навчання нейронних мереж для корекції траєкторій БПЛА у реальному часі. Наведено огляд сучасних архітектур і методів поступового оновлення параметрів без повного перенавчання. Визначено переваги підходу — підвищення точності навігації та зниження обчислювальних витрат, а також окреслено виклики, пов'язані з апаратними обмеженнями й стабільністю навчання. Показано перспективи використання інкрементального навчання у системах донаведення та багатосенсорних платформах.*
Ключові слова: *БПЛА; нейронні мережі; інкрементальне навчання; корекція траєкторій; адаптивні системи управління.*

Вступна частина

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) сьогодні стали важливим інструментом у багатьох сферах – від екологічного моніторингу та сільського господарства до транспортної логістики, картографування та виконання оборонних завдань. Висока ефективність їх застосування значною мірою залежить від точності навігації, а також від здатності систем керування своєчасно реагувати на зміни зовнішнього середовища. У реальних умовах польоту БПЛА стикаються з такими факторами, як атмосферні збурення, радіоелектронні перешкоди, непередбачувані маневри об'єктів спостереження чи навіть навмисне спотворення даних [1, 2].

Традиційні алгоритми управління, що базуються на попередньо навчених моделях, мають обмежену гнучкість. Вони не враховують непередбачуваних змін у середовищі під час польоту, а тому можуть втрачати ефективність у динамічних сценаріях [3]. У цьому контексті особливої актуальності набуває використання методів інкрементального навчання нейронних мереж, які здатні поступово оновлювати параметри моделей у процесі експлуатації, не потребуючи повного перенавчання.

Мета роботи

Метою цієї роботи є огляд сучасних підходів до інкрементального навчання нейронних мереж і визначення їхнього потенціалу для корекції траєкторій безпілотних літальних апаратів. Основна увага зосереджена на перспективах застосування цього підходу в адаптивних системах донаведення, де важливо забезпечити поєднання накопиченого досвіду з можливістю реагування на нові умови в реальному часі.

Основна частина

Інкрементальне навчання полягає в оновленні параметрів нейронної мережі у міру надходження нових даних. Такий підхід дозволяє моделі адаптуватися до змін середовища у реальному часі та поступово накопичувати «досвід» експлуатації. Для БПЛА це критично важливо, адже польоти часто відбуваються у непередбачуваних умовах, де класична офлайн-підготовка моделі втрачає актуальність.

Основними перевагами є економія обчислювальних ресурсів (оскільки не потрібне повне перенавчання), можливість реагування на зміни середовища в режимі реального часу та збереження вже набутого досвіду [4]. У системах донаведення це означає підвищення точності навігації та скорочення часу реакції на нові умови.

Незважаючи на переваги, існують і труднощі. По-перше, апаратні обмеження бортових систем БПЛА унеможливлюють використання надто складних нейромережевих архітектур. По-друге, швидке оновлення параметрів може призвести до дестабілізації роботи мережі або втрати раніше здобутих знань (так званий ефект «катастрофічного забування»). По-третє, необхідно враховувати багатосенсорний характер даних (радіотехнічні, візуальні, інерціальні сигнали), що вимагає узгодження різнорідних потоків у єдиному процесі навчання. Додаткову складність становить обробка некоректних чи навмисно спотворених сигналів у зашумленому середовищі.

У наукових дослідженнях останніх років розглядаються різні варіанти інкрементального навчання. Архітектури на основі рекурентних нейронних мереж (LSTM, GRU) демонструють високу ефективність у прогнозуванні відхилень траєкторії. Згорткові нейронні мережі (CNN) виявилися придатними для виявлення перешкод за візуальними даними з камер БПЛА. Все більшої уваги набувають моделі з механізмами уваги (attention), які дозволяють виділяти найбільш інформативні ознаки у потоках даних і знижувати вплив другорядних. Перспективним напрямом є також федеративне навчання, що дозволяє кільком БПЛА обмінюватися оновленими параметрами моделей без пересилання «сирих» даних, що знижує навантаження на канали зв’язку та підвищує безпеку.

Особливий інтерес становить поєднання локального інкрементального навчання на борту апарата з періодичним перенавчанням у наземних центрах. Такий гібридний підхід дозволяє досягти компромісу між швидкодією у реальному часі та узагальнюючою здатністю моделей.

Висновки

Інкрементальне навчання нейронних мереж відкриває нові можливості для створення адаптивних систем донаведення БПЛА. Воно забезпечує підвищення точності навігації, можливість швидкого реагування на непередбачувані зміни та накопичення досвіду у процесі виконання завдань. Водночас практична реалізація потребує розв’язання проблем, пов’язаних з обмеженими обчислювальними ресурсами, стабільністю оновлення параметрів та інтеграцією різнорідних сенсорних даних.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію алгоритмів для енергообмежених платформ, впровадження протоколів колективного навчання у багатодронових системах, а також випробування запропонованих підходів у реальних умовах експлуатації. Це дозволить створити нове покоління інтелектуальних навігаційних систем, здатних забезпечити стійке функціонування БПЛА навіть у складному та динамічному середовищі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Jaiton, V., Rothomphiwat, K., Ebeid, E., & Manoonpong, P. (2022). Neural Control and Online Learning for Speed Adaptation of Unmanned Aerial Vehicles. *Frontiers in neural circuits*, *16*, 839361. https://doi.org/10.3389/fncir.2022.839361

[2] Silvestrini, S., & Lavagna, M. (2022). Deep Learning and Artificial Neural Networks for Spacecraft Dynamics, Navigation and Control. *Drones*, *6*(10), 270. https://doi.org/10.3390/drones6100270

[3] Zhou, Y., Shu, J., Zheng, X., Hao, H., & Song, H. (2022). Real-time route planning of unmanned aerial vehicles based on improved soft actor-critic algorithm. *Frontiers in neurorobotics*, *16*, 1025817. https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.1025817
[4] Su Wang, Hosseinalipour, S., Gorlatova, M., Brinton, C. G., & Chiang, M. (2021). *UAV-assisted Online Machine Learning over Multi-Tiered Networks: A Hierarchical Nested Personalized Federated Learning Approach*. arXiv. https://arxiv.org/abs/2106.15734

Mahlovannyi V.A., Onyshchenko V.F.

Incremental learning of neural networks in real time for UAV trajectory correction

Abstract. *The paper considers the application of incremental learning of neural networks for real-time correction of UAV trajectories. An overview of modern architectures and methods for gradual parameter updating without full retraining is presented. The advantages of the approach are identified, including improved navigation accuracy and reduced computational costs, as well as the challenges related to hardware limitations and training stability. The prospects of using incremental learning in guidance systems and multisensor platforms are outlined.*

Keywords: *UAV; neural networks; incremental learning; trajectory correction; adaptive control systems.*