

УДК 629.78

Эффективность ансамблевой сети ТабМ при прогнозировании стоимости траектории перелета с малой тягой по различным показателям

Ли Чжоцзинь¹

ljz114065264@outlook.com

Корянов Всеволод Владимирович^{2(*)}

vkoryanov@mail.ru

¹ МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено прогнозирование ключевых показателей стоимости траектории перелета с малой тягой (время перелета, расход топлива и др.) с использованием ансамблевой сети ТабМ. Оценка стоимости перелетов является важным элементом инженерного обеспечения миссий и представляет собой многомерную нелинейную регрессионную задачу с орбитальными элементами на входе и стоимостью на выходе. Совместное использование весов между составляющими ансамбля повышает устойчивость к переобучению и обобщающую способность модели. Показано, что ТабМ и ее облегченная версия ТабМ_{мини} эффективно применимы для оценки стоимости траекторий с малой тягой, обеспечивая надежный инструмент для межпланетного проектирования.

Ключевые слова: траектория перелета с малой тягой, принцип максимума Понтрягина, астероид, глубокое обучение, ТабМ и ТабМ_{мини}

Введение. Межпланетные миссии все чаще используют электроракетные двигатели малой тяги (ЭРД) для прямых перелетов между небесными телами благодаря высокому удельному импульсу и эффективности 0, что особенно важно для многоастероидных миссий 0. Прогнозирование характеристик траекторий с малой тягой является многомерной нелинейной регрессионной задачей с орбитальными элементами на входе и показателями стоимости на выходе.

Методы и материалы; результаты. С развитием искусственного интеллекта многослойные перцептроны (МСП) использовались для аппроксимации показателей оптимальности 0, включая минимальное время перелета 0, расход топлива и Δv , однако традиционные МСП чувствительны к распределению входных данных и склонны к переобучению. Ансамблевые подходы улучшают устойчивость и обобщающую способность, но требуют большого числа параметров и не обеспечивают обмен информацией между отдельными моделями.

Модель ТабМ решает эти ограничения, рассматривая ансамбль из нескольких МСП как единый блок с совместным использованием большинства весов 0. Такая архитектура сохраняет преимущества глубоких ансамблей, снижает вычислительные и памятьные затраты, а механизм совместного использования весов выступает как неявный регуляризатор, повышающий устойчивость и обобщающую способность при решении задач регрессии.

Для оценки производительности использованы два набора данных: топливно- и временно-оптимальные траектории. После оптимизации гиперпараметров и 15 повторных экспериментов установлено, что ансамблевая сеть сохраняет меньшую среднюю относительную ошибку (MRE), чем одиночные МСП, что подтверждает повышение точности.

Заключение. Для топливно-оптимальных траекторий модель ТабМ_{мини} превосходит одиночные МСП и полную архитектуру ТабМ по точности и обобщающей способности, демонстрируя наилучшую интегральную производительность. Для временно-оптимальных траекторий ТабМ показывает более высокие результаты, чем ТабМ_{мини}. Полученные данные подтверждают эффективность модели для точного и устойчивого прогнозирования ключевых параметров траекторий с малой тягой, что делает ее надежным инструментом в проектировании межпланетных миссий.

Список источников

- [1] Ивашкин В.В., Крылов И.В. Оптимизация траекторий космического аппарата с электроракетным двигателем малой тяги. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, 2020, № 94, с. 1–32. <https://doi.org/10.20948/prepr-2020-94>
- [2] Wang Y., Koryanov V.V., Toporkov A.G. Hazardous asteroid deflection based on “space billiard” mode: mission analysis and trajectory design. *Astrodynamics*, 2025, vol. 9, pp. 465–479. <https://doi.org/10.1007/s42064-024-0221-9>
- [3] Сорокин А.В., Широбоков М.Г. Разработка нейронных сетей для управления орбитальным движением космического аппарата с двигателем малой тяги. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, 2018, № 269, с. 1–31. <https://doi.org/10.20948/prepr-2018-269>
- [4] Ли Ч., Корянов В.В., Зубко В.А. Оценка времени перелета к астероидам с малой тягой с использованием нейронных сетей. *Космические исследования*, 2025, т. 63, № 5, с. 501–514. <https://doi.org/10.31857/S0023420625050047>
- [5] Gorishniy Y., Kotelnikov A., Babenko A. TabM: advancing tabular deep learning with parameter-efficient ensembling. *The Thirteenth International Conference on Learning Representations*. URL: <https://openreview.net/forum?id=Sd4wYY0hmY> (accessed 01.11.2025).