УДК 519.25:681.5 https://doi.org/10.15407/itm2022.02.025

О. П. САРИЧЕВ

ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІН ХАРАКТЕРУ РУХУ ОБ'ЄКТІВ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ ЗА АВТОРЕГРЕСІЙНИМИ МОДЕЛЯМИ В УМОВАХ НЕРІВНОВІДДАЛЕНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, Дніпро, Україна,49005; e-mail: alexsar2021@gmail.com

Проблема підвищення точності прогнозування та виявлення змін характеру руху об'єктів ракетно-космічної техніки (РКТ) є актуальною для завдань визначення часу їх існування, каталогізації космічного сміття, навігації. Тому задача виявлення змін у динамічних системах, що характеризуються нерівновіддаленими спостереженнями, актуальна. Мета роботи – розробка авторегресійних моделей з нерівновіддаленими за часом спостереженнями для виявлення змін характеру руху об'єктів РКТ.

Методи досліджень – багатовимірний статистичний аналіз та прогнозування часових рядів, моделювання складних систем в умовах структурної невизначеності. Як вихідні спостереження для опису руху об'єктів РКТ використано дані, що формуються службою NORAD (США). Вони актуальні, постійно оновляються та вільно поширюються для використання в Інтернеті. Ці дані подаються у форматі TLE (Two-Line Element – формат даних, що кодує список елементів орбіти об'єкта, який знаходиться на орбіті Землі, для заданого часу). Запропоновано метод побудови авторегресійних моделей для опису динаміки об'єктів РКТ, що представлені часовими рядами TLE-елементів з нерівновіддаленими за часом значеннями. На його основі побудовано авторегресійні моделі динаміки космічного апарата «Січ-2». Проведено аналіз середньоквадратичних помилок моделей на екзаменаційних вибірках, знайдено значні відхилення середньоквадратичних помилок для основних змінних (апогею, перигею, ексцентриситету, довготи висхідного вузла, аргументу перигею, середньої аномалії), тим самим виявлено зміни руху космічного апарата «Січ-2» від основного режиму.

Новизна – раніше завдання виявлення зміни характеристик руху об'єктів РКТ на основі запропонованого виду авторегресійних моделей не розглядалося. Практична цінність – моделювання руху космічного апарата «Січ-2» за тимчасовими рядами TLE-елементів дозволяє виявити зміни режимів; метод може бути використаний для виявлення змін властивостей об'єктів РКТ у процесі їх експлуатації.

Ключові слова: *часові ряди TLE-елементів, нерівновіддалені спостереження, авторегресійні моделі, космічний апарат «Січ-2».*

1. *D. Gondelach, A. Lidtke, R. Armellin, C. Colombo, H. Lewis, Q. Funke, T. Flohrer*. Re-entry prediction of spent rocket bodies in GTO. URL: https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/astro-2020-0006/pdf
2. *T. Kelecy, D. Hall, K. Hamada, D. Stocker.* Satellite Maneuver Detection Using Two-line Element (TLE) Data. URL: https://amostech.com/TechnicalPapers/2007/Modeling_Analysis_Simulation/Kelecy.pdf
3. *Назаренко А. И.* Погрешности прогнозирования движения спутников в гравитационном поле Земли. М.: ИКИ РАН. – 2010. –226 с. URL: http://www.iki.rssi.ru/books/2010nazarenko.pdf
4. *C. Levit and W. Marshall*. Improved orbit predictions using two-line elements. Advances in Space Research, V. 47, 2011, pp. 1107–1115. https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.10.017
5. A hybrid AR-EMD-SVR model for the short-term prediction of nonlinear and non-stationary ship motion / Wen-yang Duan et al. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 2015, Vol. 16(7), pp. 562-576. https://doi.org/10.1631/jzus.A1500040
6. *Nazarenko A. I.* Space debris modeling. M.: IKI RAN, 2013. 216 pp.
7. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем: пер. с англ. / М. Бассвиль, А. Вилски, А. Банвенист и др.; под. ред. М. Бассвиль, А. Банвениста. М. : Мир, 1989. 278 с.
8. *S. Lemmens and H. Krag.* Two-Line-Elements-Based Maneuver Detection Methods for Satellites in Low Earth Orbit. Journal of Guidance Control Dynamics. 2014. Vol. 37. May. P. 860–868. https://doi.org/10.2514/1.61300
9. *A. I. Nazarenko.* Application of the Method for Optimum Filtering of Measurements for Determination and Prediction of Spacecraft Orbits. Solar System Research. 2013. Vol. 47, No. 7. P. 564–568. https://doi.org/10.1134/S0038094613070113
10. *Бородкин Л. И.* Алгоритм обнаружения моментов изменения параметров уравнения случайного процесса. Автоматика и телемеханика. 1976. № 6. С. 23–31.
11. *Карташов В. Я.*, Новосельцева М. А. Обнаружение структурно-параметрических изменений в стохастических системах в реальном масштабе времени алгоритмами непрерывных дробей и структурного анализа. Управление большими системами. 2011. Вып. 34. С. 62–91.
12. Blasques *F., Koopman J., Lucas A.* Nonlinear autoregressive models with optimality properties. URL: https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/07474938.2019.1701807
13. *Ding1 X. and Zhou Z.* Auto-regressive approximations to non-stationary time series, with inference and applications. URL: https://arxiv.org/pdf/2112.00693.pdf

14. *Миргород В. Ф.* Математические модели процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок : дисс. … д-ра техн. наук : утв. 01.05.02 / Миргород Владимир Фёдорович. Днепропетровск, 2012. 344 с.
15. *Сарычев А. П.* Идентификация параметров систем авторегрессионных уравнений при известных ковариационных матрицах. А. П. Сарычев. Международный научно-технический журнал “Проблемы управления и информатики”. 2012. № 3. С. 14–30.
16. *Сарычев А. П.* Исследование методом статистических испытаний итерационной процедуры для идентификации параметров системы авторегрессионных. Системні технології. 2014. Випуск 3 (92). С. 77–89.
17. *Сарычев А. П.* Линейная авторегрессия на основе метода группового учёта аргументов в условиях квазиповторных наблюдений. Искусственный интеллект. 2015. № 3–4 (69–70). С. 105–123.
18. *Сарычев А. П.* Моделирование в классе систем авторегрессионных уравнений в условиях структурной неопределенности. Международный научно-технический журнал “Проблемы управления и информатики”. 2015. № 4. С. 79–103.
19. *Сарычев Александр.* Моделирование сложных систем в условиях структурной неопределённости: регрессионные и авторегрессионные модели. LAP LAMBERT Academic Publishing RU, Saarbrücken, Deutschland, 2016. 74 с.
20. *Sarychev O. P.*, *Perviy B. A.* Optimal regressors search subjected to vector autoregression of unevenly spaced TLE series. Системні технології. Випуск 2 (121). 2019. С. 95–110.
21. *Саричев О. П.*, *Первій Б. А.* Моделі руху космічних об’єктів на основі часових рядів TLE-елементів. Технічна механіка. 2021. –№ 1. С. 16–24. https://doi.org/10.15407/itm2021.01.051
22. NORAD Two-Line Element Set Format. URL: http://celestrak.com/NORAD/documentation/tle-fmt.asp
23. SICH 2 Satellite details 2011-044G NORAD 37794. URL: https://www.n2yo.com/satellite/?s=37794
24. *Себер Дж.* Линейный регрессионный анализ : пер. с англ. М.: Мир, 1980. 456 с.

Отримано 24.05.2022,
в остаточному варіанті 15.06.2022