

*Ракушев Михайло Юрійович (доктор технічних наук, старший науковий співробітник)
Богун Олексій Іванович*

Національний університет оборони України, Київ, Україна

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ОБРОБКИ КАТАЛОГУ TLE ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ МАНЕВРУ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ БЛИЖЬОГО КОСМОСУ

Метою статті є удосконалення методики виявлення непрогнозованих змін параметрів руху (маневрів) космічних апаратів за аналізом відкритих каталогів космічних об'єктів у форматі дворядкового набору елементів (Two-Line Element Set (TLE)) Командування повітряно-космічної оборони Північної Америки (North American Aerospace Defence Command (NORAD)). Удосконалення спрямоване на підвищення оперативності виявлення маневрів і збільшення кількості космічних апаратів (космічних об'єктів), що аналізуються. У дослідженні використані методи теорії польотів космічних апаратів, а саме щодо зміни елементів орбіти під дією керованої сили та прогнозування їх руху. Для виявлення маневрів космічних апаратів ближнього космосу на навколокругових орбітах, у TLE параметрах виділені інформативні параметри, що дають змогу проводити виявлення маневрів: момент часу, на який надано параметри орбіти, перша похідна середнього руху по часу, приведений балістичний коефіцієнт. Дієвість запропонованого підходу апробовано на космічних апаратах російської федерації «Барс МЗ» та «Канопус ВЗ». Аналіз елементів TLE проводився на ділянках траєкторії за якими, з допомогою існуючого програмного забезпечення, прийнято рішення про здійснення маневру. Проведено поглиблений аналіз значення (змісту) приведенного балістичного коефіцієнту, який використовується в аналітичній моделі NORAD. За результатами аналізу розроблено удосконалену методику обробки каталогу TLE для виявлення маневру космічного апарату ближнього космосу. Використання удосконаленої методики дасть змогу позбутися недоліків в існуючій, а саме скоротити час, необхідний для проведення аналізу, та охопити весь каталог космічних об'єктів. Виявлення маневрування космічного апарату, що належить країні-агресору та державам, які її підтримують, дає змогу визначити зміну режиму застосування космічного апарату (наприклад, зміну району проведення космічної розвідки) та розкрити плани противника. Методика може бути використана під час аналізу та оцінювання космічної обстановки спеціалізованими підрозділами Збройних Сил України.

Ключові слова: космічна ситуаційна обізнаність, підтримка, маневр космічного апарату, TLE параметри, космічний апарат, приведений балістичний коефіцієнт.

Вступ

Сучасний розвиток людської цивілізації, **Постановка проблеми.** Розв'язана широкомасштабна агресія російської федерації проти України підтвердила, що якісна організація заходів космічної підтримки суттєво підвищує ефективність застосування сил оборони з відбиття збройної агресії. Одним із центральних заходів космічної підтримки, є забезпечення високого рівня космічної ситуаційної обізнаності щодо дій та намірів угруповань космічних засобів агресора та держав, що його підтримують. Завдання з космічної ситуаційної обізнаності вирішуються системами контролю космічного простору, що є інформаційними системами подвійного призначення для спостереження за космічними апаратами (далі – КА) та іншими штучними космічними об'єктами (далі – КО).

У рамках візиту Президента України Володимира Зеленського до США на початку вересня 2021 року відбулося підписання

Меморандуму між Державним космічним агентством України та Міністерством оборони США щодо співпраці у сфері безпеки космічних польотів і надання послуг та інформації з космічної ситуаційної обізнаності [1].

Загальними сучасними тенденціями розвитку космічних систем, взагалі, та КА зокрема є: ускладнення побудови космічних систем; збільшення термінів експлуатації КА; збільшення можливостей КА щодо здійснення маневрування та підтримання розрахункової орбіти. Для забезпечення цих тенденцій, активний розвиток отримали наступні напрями:

використання електро-реактивних двигунів, що дозволило значно зменшити вагу рухової установки, і як наслідок, і самого КА [2];

створення орбітальних угруповань з великою кількістю КА та складною структурою, наприклад, космічна система Starlink (станом на 22 лютого 2024 року система складається з 5536 активних КА, які знаходяться на різних висотах та

розташовані в різних орбітальних площинах) [4]; розробка технологій дозаправки КА в космосі [3]; використання в якості двигуна КА рухової установки іншого КА [3].

Підтримання великих угруповань КА з складною орбітальною структурою вимагає значної кількості корекції орбіти кожного КА. Відповідно, загальна кількість КА які мають

можливості проводити активну зміну орбітальних параметрів (маневрування) постійно збільшується. Так, з 1 грудня 2022 року по 21 травня 2023 року, супутники Starlink виконали більше 25000 маневрів на орбіті, для уникнення аварійних ситуацій. За прогнозними розрахунками кількість маневрів з кожним роком буде тільки збільшуватися (рис. 1) [4].

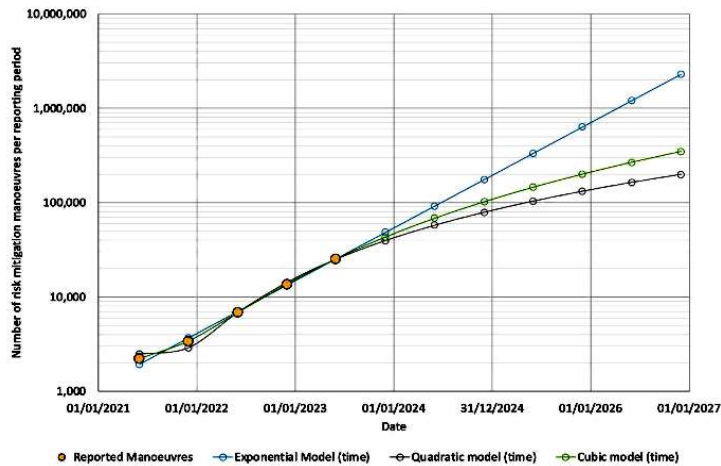


Рисунок 1 – Зміни кількості маневрів космічних апаратів космічної системи Starlink

У низці публікацій представників країни агресора непрогнозована зміна параметрів руху КА (маневр) розглядається як засіб забезпечення раптовості дій і застосування військової хитрощі (введення противника в оману). Так, беручи до уваги можливість визначати за зовнішньо-траєкторними вимірюваннями поточні навігаційні параметри іноземних КА, які не мають рухових установок або рухаються з вимкненим руховими установками, кожна з конкуруючих сторін здатна прогнозувати положення таких КА у просторі на визначений час. Тому забезпечити раптовість бойового застосування таких КА з несподіваного для противника напрямку не представляється можливим. Водночас введення противника в оману в космосі може бути забезпечені тільки, у разі:

несподіваного (для іноземного спостерігача) маневру КА;

раптового виведення КА з оперативного резерву;

маскування військового КА під КА економічного, наукового та подвійного призначення, або під елементи космічного сміття.

Таким чином, виявлення непрогнозованих змін параметрів руху КА (маневру) є необхідним та важливим елементом космічної підтримки сил оборони.

Виявлення маневрування КА, який належить країні агресору та державам, які її підтримують, дає змогу визначити зміну режиму застосування КА (наприклад, зміну району проведення космічної розвідки) та розкрити плани противника,

виявити «сплячий» КА серед космічного сміття, що є одним із завдань космічної ситуаційної обізнаності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для виконання завдання виявлення змін параметрів руху (маневрів) КА використовується два основних підходи, а саме:

Перший – це організація роботи системи контролю космічного простору на основі планування проведення зовнішньо-траєкторних вимірювань орбітального руху КА з подальшим визначенням параметрів руху КА. Основною перевагою цього підходу є його “інформаційна самостійність”. Разом з тим, результативність застосування зазначеного підходу багато в чому залежить від “інформаційних можливостей” системи контролю космічного простору - оперативності, кількості та якості проведених зовнішньо-траєкторних вимірювань орбітального руху КА;

Другий – це робота з даними відкритих каталогів параметрів руху космічних об’єктів [5]. Основним недоліком такого підходу є менша оперативність виявлення маневрів КА у порівнянні з першим підходом та «тотальна інформаційна залежність» від наявності відкритого доступу до іноземних інформаційних ресурсів. Але його значною перевагою є майже повністю відсутні фінансові витрати, так як немає потреби утримувати коштовні наземні вимірювальні засоби для проведення зовнішньо-траєкторних вимірювань орбітального руху КА.

Сьогодні існує велика кількість каталогів КО

(КА), що існують у відкритому доступі в мережі Інтернет. Переважна більшість таких каталогів належить США, що за партнерських відносин з Україною, забезпечує певний ступінь гарантій з їх доступності. Основними каталогами КО є:

NASA Space Science Data Coordinated Archive (NSSDCA). Каталог надає дані про значну кількість космічних місій, запущених NASA. Можливо отримати інформацію про КА, їх місії, наукові інструменти [6];

NASA JPL Horizons System. Каталог надає дані про штучні супутники, їх положення та траєкторію КА, що перебувають в активній експлуатації тощо [7];

Heavens Above. Ресурс надає інформацію про поточне положення та прольоти різних космічних об'єктів, зокрема, штучні супутники та інформацію про конкретні КА [8];

CelesTrak. Каталог надає дані про орбітальні параметри понад 39 000 штучних супутників Землі, зокрема, космічні апарати та космічне сміття, дані про траєкторії КА та їхній стан [9];

Space-Track. Онлайн-платформа, що надається Північноамериканським командуванням космічної оборони (NORAD), що призначена для відстеження об'єктів у космосі, таких як супутники та космічне сміття. Ця система надає доступ до бази даних про КО, зокрема, їх орбітальні параметри, стан та іншу інформацію. Space-Track переважно використовується державними організаціями, а також приватними компаніями та науковими установами, які займаються космічними програмами та потребують точних даних про об'єкти, що перебувають у космосі. Користувачі можуть отримати доступ до інформації про супутники, проводити аналіз та відстежувати переміщення космічних об'єктів [10].

Загальною рисою для всіх каталогів КО, які існують у відкритому доступі є те, що координатна інформація надається у формі дворядкового набору елементів (Two-Line Element Set (TLE)) Командування повітряно-космічної оборони Північної Америки (North American Aerospace Defense Command (NORAD)) (далі – TLE NORAD). TLE NORAD це формат орбітальних параметрів штучного супутника Землі, що використовується в аналітичних моделях прогнозування руху для обчислення траєкторій супутників [10]: ближнього космосу (до 2000 км) - Simplified General Perturbations 4 (далі – SGP4) та дальнього космосу – Simplified Deep Space Perturbation 4 (далі – SDP4).

Моделі SGP4 та SDP4 враховують несферичність гравітаційного поля Землі, атмосферний опір, а також гравітаційні сили від Місяця, Сонця та впливи від інших тіл Сонячної системи, для прогнозування точного положення супутників у космічному просторі на певний момент часу.

Узагальнюючи вищезазначене, можна

стверджувати, що перший підхід, що ґрунтується на проведенні зовнішньо-траєкторних вимірювань руху КА потребує наявності територіально-розосередженої мережі технічних засобів контролю космічного простору різного призначення, розроблення та створення якої є коштовною та потребує значної кількості ресурсів для її утримання. На сучасному етапі для України доцільним є використання другого підходу, що ґрунтується на роботі з відкритими каталогами КО, у зв'язку з відсутністю повнофункціональної мережі технічних засобів проведення зовнішньо-траєкторних вимірювань. Однак, у перспективі, після створення повнофункціональної національної мережі вимірювальних засобів потрібно буде повернутись до першого підходу.

Сьогодні (за другим підходом) існуюча методика виявлення маневру КА ближнього космосу (на орбітах до 2000 км) фахівцями з космічної підтримки реалізований з використанням відповідного спеціального програмного забезпечення (далі – СПЗ), у порядку [12]:

1. Оновлення початкових умов КА та КО з відкритих каталогів у форматі TLE NORAD.

2. Визначення пріоритетних КА військового чи подвійного призначення (за досвідом роботи до 5 КА) країни агресора.

3. Для пріоритетних КА побудова графіків зміни орбітальних параметрів (насамперед: висота апогею та висота перигею, нахил орбіти).

4. Візуальний аналіз отриманих графіків з метою виявлення не прогнозованих (не монотонних) змін – “стрибків” орбітальних параметрів (маневрів) КА.

5. Прийняття рішення про здійснення маневру КА.

6. Аналіз змін спроможностей та (або) режимів функціонування КА після зміни його орбітальних параметрів.

Основними недоліками існуючої методики є: можливість аналізу тільки обмеженої кількості КА через значні часові витрати на “ручну” обробку та, відповідно, неможливість здійснення аналізу орбітальних параметрів з всього каталогу КА у зв'язку з його великим обсягом;

проведення візуального аналізу графіків зміни орбітальних параметрів КА проводиться, як правило, тільки за: висотою апогею, висотою перигею;

значна залежність помилки оператора з пропуску маневру, при тривалій роботі з каталогом КА;

не передбачена можливість виявлення сплячих КА серед космічного сміття (КО) через відсутність зазначених КА в загальній базі КА та не попадання КО до переліку «пріоритетних».

Можна стверджувати, що головним з наведених недоліків є тривалість етапу “ручного” перебору усіх пріоритетних КА з каталогу та недостатня інформативність аналізованих графіків

зміни орбітальних параметрів КА.

Метою статті є удосконалення методики виявлення непрогнозованих змін параметрів руху (маневрів) КА за аналізом каталогів космічних об'єктів у форматі TLE NORAD. Удосконалення спрямовано на підвищення оперативності виявлення маневрів та збільшення кількості КА, що аналізуються.

Виклад основного матеріалу дослідження

Загальним у процедурі виявлення маневру є дослідження у часі динаміки змін параметрів руху КА, шляхом порівняння попередніх та поточних значень. Технологічно, попередні орбітальні параметри, знаходяться в архівах, доступ до яких є одним з базових сервісів для наведених вище відкритих каталогів параметрів руху КО.

Оскільки потрібно отримувати не лише свіжі дані, а й архівні, для моделювання орбіти супутників у минулому в якості джерела інформації було вибрано портал space-track.org. Суттєве значення має те, що space-track має Representational State Transfer Application Programming Interface (REST API), що є стандартною архітектурною структурою для створення веб-служб та взаємодії між різними

програмними системами. REST API базується на принципах HTTP протоколу і забезпечує можливість обміну даними між клієнтом і сервером через визначені URL-адреси та HTTP методи, такі як GET, POST, PUT, DELETE і PATCH та дає змогу отримувати потрібні дані максимально зручно. Додатково слід відмітити, що для роботи з REST API, що надається сайтом space-track існує відкрита python-бібліотека.

Під час досліджень аналіз змін параметрів TLE NORAD проводився для двох КА, які належать країні агресору, по яким, за допомогою існуючого СПЗ, фахівцями з космічної підтримки було прийнято рішення стосовно виявлення непрогнозованих змін параметрів руху (рис. 2, 3), а саме:

КА «Барс М3», № NORAD 52713, міжнародний номер 2022-054A;

КА «Канопус В3», № NORAD 43180, міжнародний номер 2018-014A.

Аналіз змін параметрів проводився на часовому інтервалі:

КА «Барс М3» з 09.06.2022 року по 02.08.2022 року (маневр №1,4);

КА «Канопус В3» з 19.12.2022 року по 06.04.2023 року (маневр № 2, 3).

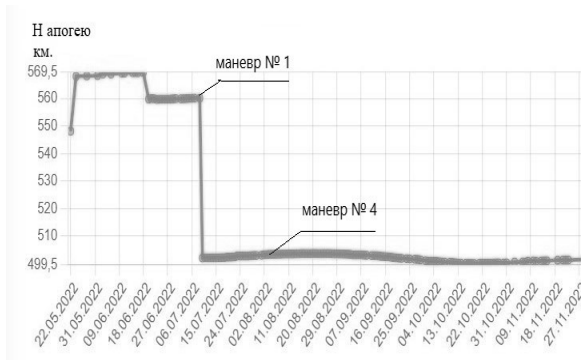


Рисунок 2 – Графік зміни висоти апогею космічного апарату «Барс М3»



Рисунок 3 – Графік зміни висоти апогею космічного апарату «Канопус В3»

Вибірка інформації по КА проводилася з сайту www.space-track.org, використовуючи функцію Retrieve ELSET Data by Satellite Catalog Number,

що дає змогу отримати TLE параметри визначеного КА за визначений період часу (рис. 4).

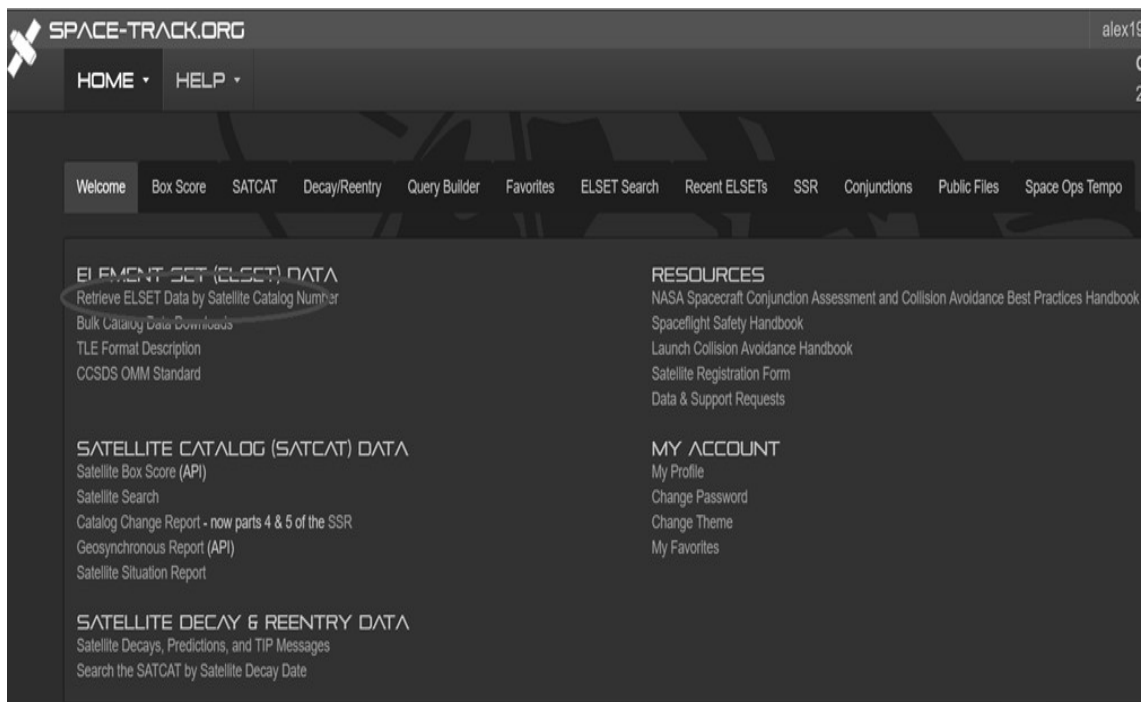


Рисунок 4 – Робоче середовище офіційного сайту www.space-track.org

Під час дослідження проаналізовано зміни величин таких параметрів, наданих у форматі TLE NORAD:

- момент часу, на який надано параметри орбіти;
- перша похідна середнього руху по часу;
- друга похідна середнього руху по часу;
- приведений балістичний коефіцієнт;
- нахил орбіти;
- довгота висхідного вузла;
- ексцентриситет;
- аргумент перигею;
- середня аномалія;
- середній рух (обертів в день).

Результати аналізу свідчать, що оновлення початкових умов (далі – ПУ) КА під час та після проведення маневру здійснюється через значно менший інтервал часу ніж під час некерованого руху КА і може сягати від 2 до 4 годин для активної ділянки руху (маневру) КА та досягати 1,5 доби для некерованого руху КА (рис. 5–7).

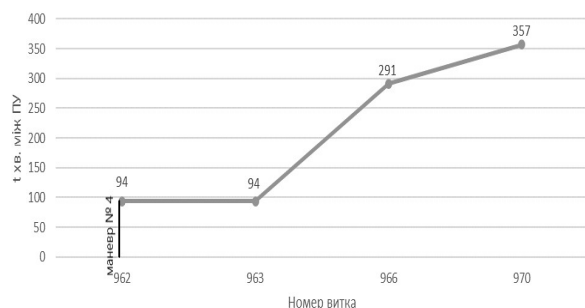


Рисунок 5 – Графік періодичності оновлення початкових умов для космічного апарату «Барс М3»

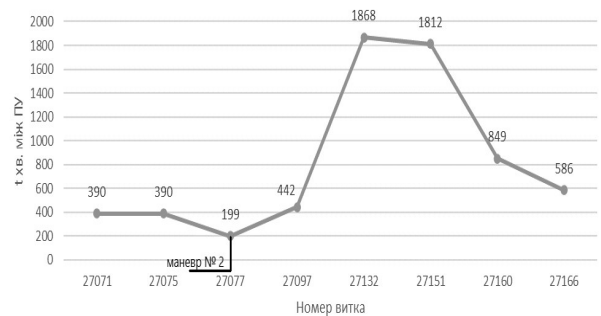


Рисунок 6 – Графік періодичності оновлення початкових умов для космічного апарату «Канопус В3»

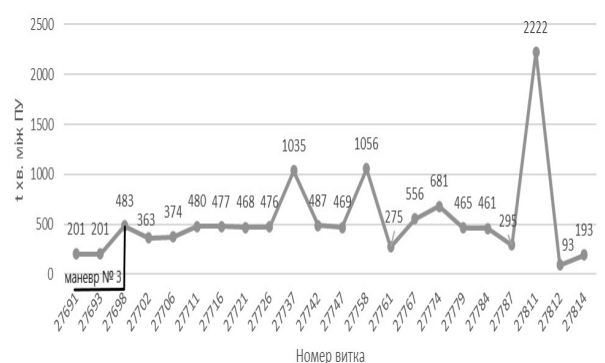


Рисунок 7 – Графік періодичності оновлення ПУ для космічного апарату «Канопус В3»

Зміна часового інтервалу між оновленням (публікацією на сайті) ПУ пов'язано з тим, що оскільки модель руху SGP4 є аналітичною та описує некерований рух КА, то у випадку маневру стає неможливим точний прогноз руху КА з її використанням без змін TLE параметрів руху КА.

Проведене дослідження стосовно виявлення маневру для КА на навколокругових орбітах свідчить, що TLE параметри можна розділити на інформативні (перша похідна середнього руху по часу, приведений балістичний коефіцієнт) та неінформативні (довгота висхідного вузла, ексцентриситет, аргумент перигею, середня аномалія). Зміни «неінформативних» TLE параметрів: довготи висхідного вузла, ексцентриситету, аргументу перигею, середньої аномалія та середнього руху (обертів за день) під час маневру визначених КА наведені на рис. 8–11.

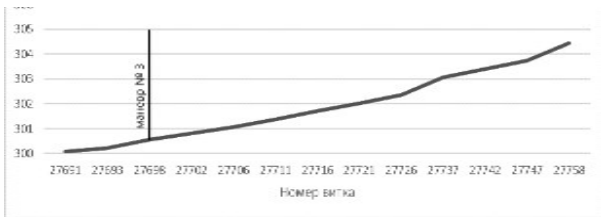


Рисунок 8 – Графік зміни аргументу перигею космічного апарату «Канопус Б3»

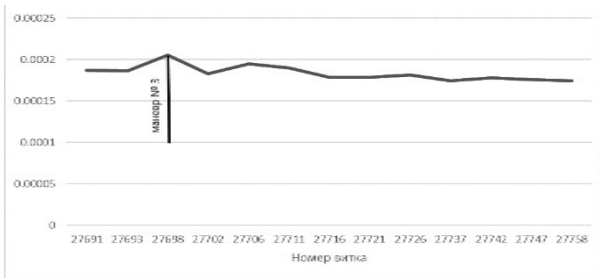


Рисунок 9 – Графік зміни ексцентриситету космічного апарату «Канопус Б3»

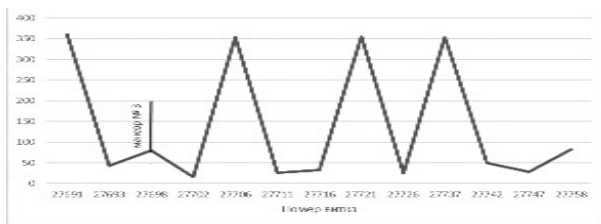


Рисунок 10 – Графік зміни довготи висхідного вузла космічного апарату «Канопус Б3»

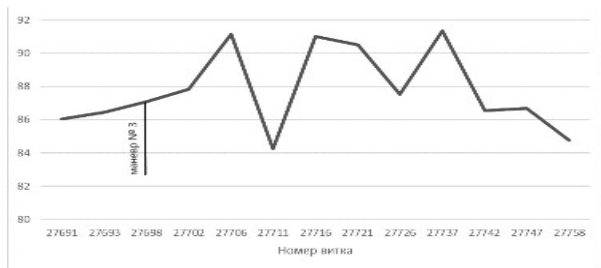


Рисунок 11 – Графік зміни середньої аномалії космічного апарату «Канопус Б3»

Водночас аналіз зміни величини першої похідної

середнього руху по часу виявив «стрибки», що не можливі під час незбуреного орбітального руху, а саме: величина першої похідної середнього руху по часу має від'ємне значення, що свідчить про збільшення періоду обертання КА навколо Землі (рис. 12–14).

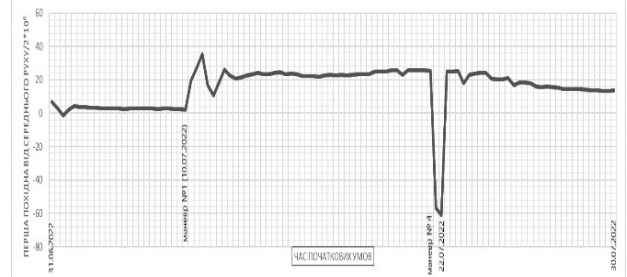


Рисунок 12 – Графік зміни першої похідної середнього руху космічного апарату «Барс М3»

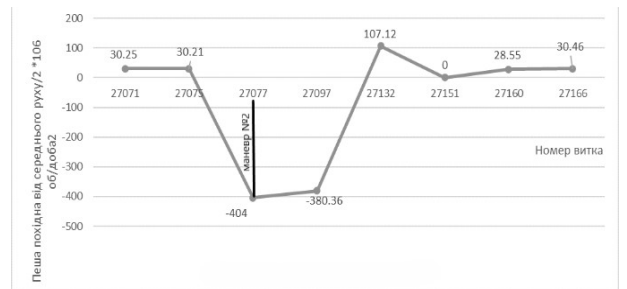


Рисунок 13 – Графік зміни першої похідної середнього руху космічного апарату «Канопус В3»

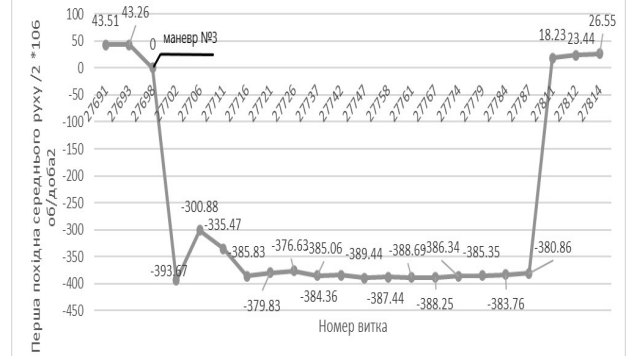


Рисунок 14 – Графік зміни величини першої похідної середнього руху космічного апарату «Канопус В3»

Другим елементом TLE NORAD, який показав «інформативні» зміни під час проведення маневру КА є приведений балістичний коефіцієнт Bstar. Графік зміни цього коефіцієнту має характерний «стрибок» при маневрі (рис. 15-17).

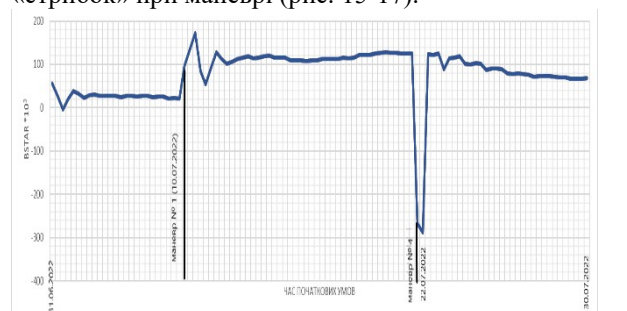


Рисунок 15 – Графік зміни величини Bstar космічного апарату «Барс М3»

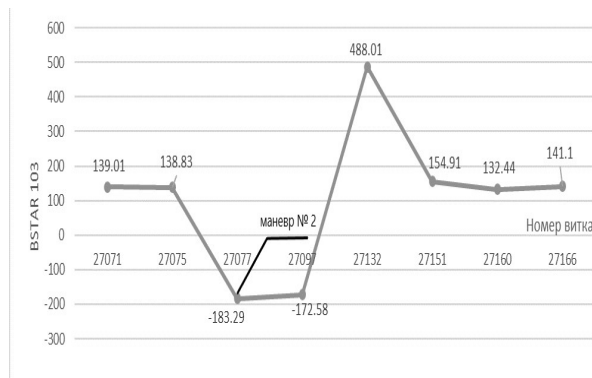


Рисунок 16 – Графік зміни величини Bstar космічного апарату «Канопус В3»

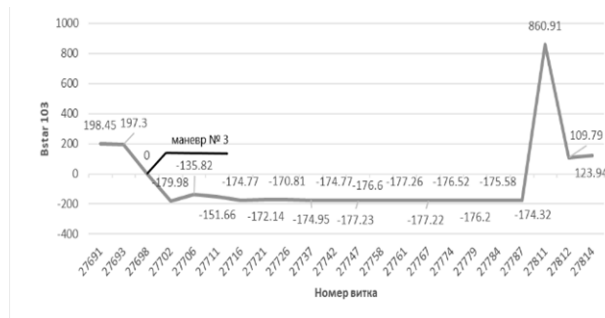


Рисунок 17 – Графік зміни величини Bstar космічного апарату «Канопус В3»

Для аналізу можливих змін значень Bstar, розглянемо його фізичний сенс. Так у вітчизняних джерелах балістичний коефіцієнт характеризує гальмування від опору атмосферного повітря у формі (1) [15]:

$$B_{ка} = \frac{\rho_{атм} C A}{2m}, \quad (1)$$

де $\rho_{атм}$ – густина повітря, C – коефіцієнт опору (визначається формою КА), A – площа Міделя (поперечного перетину) КА, m – маса КА.

У процесі використання даної формули значення балістичного коефіцієнту для КА ближнього космосу не може дорівнювати нулю, тим більше приймати від’ємне значення або збільшувати значення на порядок при наступному вимірі.

У науковій статті David A. Vallado [13] під час розгляду процесу формування значення балістичного коефіцієнту Bstar в моделі SGP4 приходить до висновку, що балістичний коефіцієнт крім раніше зазначених факторів діючих на КА використовується для врахування (апроксимації) впливу немодельованих (неврахованих в аналітичній моделі руху) сил на КА. Отже, за значенням величини Bstar під час маневру визначених КА можливо зробити висновок, що значення величини Bstar безпосередньо відображає (враховує) вплив на параметри орбіти КА роботу його рухової установки.

З врахуванням наведених вище графіків (рис. 8-17), TLE параметрами, які доцільно аналізувати для визначення маневру КА ближнього

космосу, окрім тих, що використовуються у штатному СПЗ, є:

- перша похідна середнього руху;
- приведений балістичний коефіцієнт;
- часовий інтервал між моментами часу, на які надаються (оновлюються) TLE параметри.

З врахуванням зазначеного, удосконалена

методика виявлення маневру КА має такі складові:

назва методики: удосконалена методика обробки каталогу TLE для виявлення маневру космічного апарату ближнього космосу;

передумови створення методики: низька ефективність старої методики;

об’єкт дослідження методики: процес аналізу космічної обстановки для виявлення маневру КА;

коротка сутність методики: проведення попереднього аналізу величини приведенного балістичного коефіцієнту повного каталогу космічних об’єктів NORAD, з метою виявлення аномальних значень балістичного коефіцієнту, для визначення об’єктів потребуючих додаткового аналізу;

призначення методики: виявлення КА які здійснили маневр;

відмінності методики від відомих: удосконалена методика передбачає безпосередній аналіз параметрів величин які надаються в форматі TLE NORAD;

обмеження та припущення: методика призначена для не може бути використана для КА середнього та дальнього космосу, розрахунок по

яким проводиться з використанням моделі SDP4;
 ввідні дані: повний каталог КО якій надається
 NORAD, в форматі TLE;

математичний апарат: методи теорії польотів
 космічних апаратів;
 алгоритм реалізації методики (рис. 18):

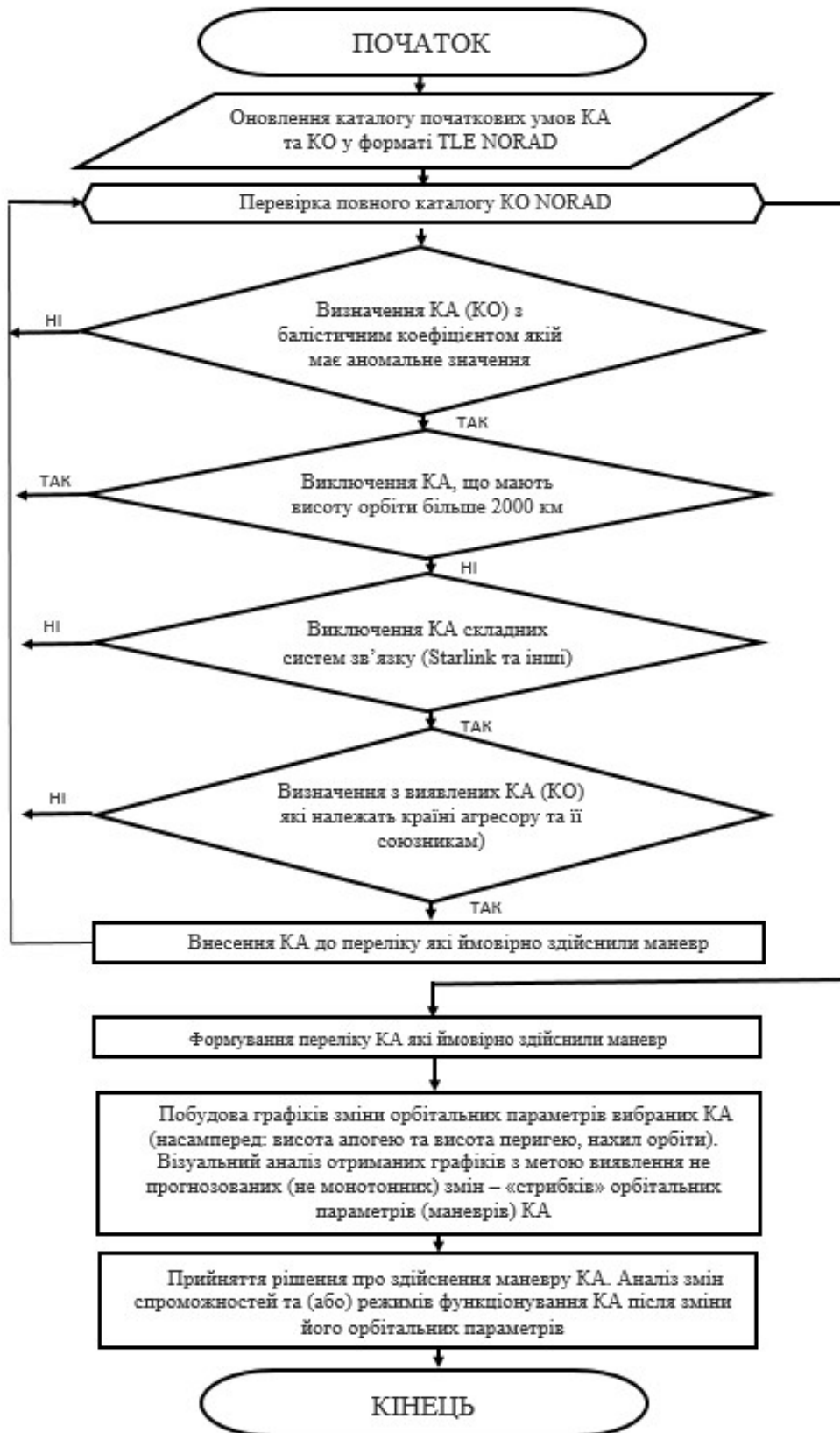


Рисунок 18 – Алгоритм удосконаленої методики обробки каталогу TLE для виявлення маневру космічного апарату ближнього космосу

область застосування методики: КА ближнього(до 2000 км.) космосу;

область застосування результатів методики: методика може бути використана під час аналізу космічної обстановки, з метою виявлення маневру КА розвідки;

приклад використання методики: виявлення факту маневру КА «Барс МЗ» та «Канопус ВЗ»;

виграш від використання методики: дасть змогу позбутися недоліків існуючої методики, а саме скоротити час потрібний для проведення аналізу та наддасть можливість охопити весь каталог космічних об'єктів.

Апробація удосконаленої методики була проведена на повних каталогах (Full Catalog) NORAD на протязі 18-22.03.2024 року та показала свою ефективність при роботі з КА ближнього космосу.

Висновки й перспективи подальших досліджень

На даний час оператор, використовуючи наявне спеціальне програмне забезпечення для проведення аналізу космічної обстановки з метою виявлення космічних апаратів, що здійснили маневр, змушений витрачати багато часу на проведення аналізу графіків зміни параметрів орбіти. Водночас, перевірка проводиться для обмеженої кількості об'єктів, а саме перевіряються космічні апарати

розвідки та дистанційного зондування Землі. Космічні апарати іншого призначення та які приховуються під виглядом інших об'єктів, залишаються поза увагою.

Створення програмного забезпечення, що шляхом перебору параметрів у форматі дворядкового набору елементів (TLE) з метою визначення нульового або від'ємного значення приведенного балістичного коефіцієнта чи зі значенням балістичного коефіцієнту, який на порядок перевищує попереднє значення, дасть змогу виявити об'єкти, що потребують особливої уваги. Водночас, процедура займатиме небагато часу та дасть змогу оператору протягом незначного терміну часу проаналізувати всі об'єкти каталогу, який надається Командуванням повітряно-космічної оборони Північної Америки (NORAD).

Запропоноване удосконалення методики можливо використати для космічних апаратів ближнього космосу та не може бути використана для космічних апаратів середнього і дальнього космосу. Розрахунок по ним проводиться з використанням моделі Simplified General Perturbations 4 (SGP4). Розробка удосконалення методики для космічних апаратів середнього та дальнього космосу потребує подальшого дослідження.

Список бібліографічних посилань

1. Підписано Меморандум про взаєморозуміння між ДКА та Міноборони США щодо співпраці у сфері безпеки космічних польотів, 02 вересня 2021 року, URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/pidpisano-memorandum-pro-vzayemorozuminnya-mizh-dka-ta-minobor>. (дата звернення: 10.06.2024).
2. Kovalenko N. E., Vnukov A. A., Application of electric thrusters in a spacecraft propulsion system. URL: https://www.researchgate.net/publication/361513096_Application_of_electric_thrusters_in_a_spacecraft_propulsion_system (Accessed: 10 June 2024).
3. On-orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing 1 (OSAM-1). URL: <https://www.nasa.gov/mission/on-orbit-servicing-assembly-and-manufacturing-1/> (Accessed: 10 June 2024).
4. SpaceX Starlink satellites had to make 25,000 collision-avoidance maneuvers in just 6 months — and it will only get worse. URL: <https://www.space.com/starlink-satellite-conjunction-increase-threatens-space-sustainability>. (Accessed: 10 June 2024).
5. Козелков С. В., Махонин Е.И., Моргун А. А., Козелкова Е. С., Ямницький В. А. Метод «третьичной» обработки каталогов координатной информации космических объектов. Системы обработки информации. 2012. Вып. 3 (101). Т. 2.
6. Nasa space Science Data

Coordinated Archive. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/> (Accessed: 10 June 2024).
7. NASA JPL Horizons System. URL: <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/> (Accessed: 10 June 2024).
8. Heavens Above. URL: <https://www.heavens-above.com/> (Accessed: 10 June 2024).
9. Celestrak. URL: <https://celestrak.org/> (Accessed: 10 June 2024).
10. SpaceTrack. URL: <https://www.space-track.org> (Accessed: 10 June 2024).
11. Захаров О. Б., Гуменюк В. О., Залужний Р. М. Організація балістико-навігаційного забезпечення управління космічними апаратами : підручник / Під ред. М. С. Сівова. Київ : НАОУ, 2007. 508 с.
12. Богун О. І. Аналіз можливостей програмного забезпечення оцінки космічної обстановки для виявлення маневрів космічних апаратів. Труды Университету. 2023. №6. С. 179–187.
13. Vallado D. A. SGP4 Orbit Determination Center for Space Standards and Innovation, Colorado Springs, Colorado. URL: <https://celestrak.org/publications/AIAA/2008-6770/AIAA-2008-6770.pdf> (Accessed: 10 June 2024).
14. Hoots F. R., Roehrich R. L. Spacetrack Report No 3. Models for Propagation of NORAD Element Sets. 31 December 1988. URL: <https://celestrak.org/NORAD/documentation/spacetrk.pdf> (Accessed: 10 June 2024).

AN IMPROVED METHODOLOGY FOR PROCESSING THE TLE CATALOGUE FOR DETECTING THE MANOEUVRE OF A NEAR-SPACE VEHICLE

*Rakushev Mykhailo (Doctor of Technical Sciences, Senior researcher)
Bohun Oleksii*

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Formulation of the problem in general. The unleashed large-scale aggression of the russian federation against Ukraine has confirmed that the high-quality organization of space support measures significantly increases the effectiveness of the use of defense forces to repel armed aggression. One of the central activities of space support is to ensure a high level of space situational awareness of the actions and intentions of the

aggressor's space assets and supporting states. The tasks of space situational awareness are solved by space control systems, which are dual-purpose information systems for monitoring spacecraft (hereinafter referred to as "spacecraft") and other artificial space objects. Detecting the maneuvering of a spacecraft belonging to the aggressor country and its supporting states allows determining changes in the mode of spacecraft use (for example, changing the area of space reconnaissance) and makes it possible to reveal the enemy's plans, detect a "sleeping" spacecraft among space debris and is one of the tasks of space situational awareness.

The aim of the article is to improve the methodology for detecting unpredictable changes in spacecraft movement (manoeuvres) parameters by analysing space object catalogues in the TLE NORAD format. The improvement is aimed at increasing the efficiency of manoeuvre detection and increasing the number of analysed spacecraft.

Analysis of recent researches and publications. In a number of scientific papers by representatives of the aggressor country, an unpredictable change in the parameters of spacecraft movement (maneuver) is considered as a means of ensuring the suddenness of actions and the use of military trickery (misleading the enemy). Thus, taking into account the ability to determine the current navigation parameters of foreign spacecraft that do not have propulsion systems or move with propulsion systems turned off, each of the competing parties is able to predict the position of such spacecraft in space for a certain time. Therefore, it is impossible to ensure the sudden combat use of such spacecraft from an unexpected direction for the enemy. These scientific works conclude that the suddenness of actions and misleading the enemy in space can be ensured only in the case of:

unexpected (for a foreign observer) maneuver of the spacecraft;

sudden withdrawal of the spacecraft from the operational reserve;

disguising a military spacecraft as an economic, scientific, or dual-use spacecraft, or as elements of space debris.

Presenting the main material. An improved methodology and algorithm for detecting the manoeuvre of a spacecraft was developed by conducting a preliminary analysis of the value of the reduced ballistic coefficient of the complete NORAD catalogue of space objects in order to detect its anomalous values, followed by an analysis of the parameters of the orbits of the detected objects.

Elements of scientific novelty. The article develops an improved methodology for processing the TLE catalogue for detecting the manoeuvre of the near spacecraft. The use of the improved methodology will eliminate the disadvantages of the existing methodology, namely, reduce the time required for analysis and provide an opportunity to cover the entire catalog of space objects. The improved methodology was tested on NORAD Full Catalogs during 18-22.03.2024 and proved to be effective when working with near-space satellites.

Practical significance of the article. The methodology can be used to analysis the space situation in order to detect the maneuver of reconnaissance satellites, which will eliminate the shortcomings of the existing methodology, namely, reduce the time required for analysis and provide an opportunity to cover the entire catalogue of space objects.

Conclusion and the perspectives of future researches. The proposed improvement of the methodology can be used for near-space satellites and cannot be used for middle and deep space satellites, which are calculated using the SDP4 model. The development of the methodology improvement for middle and deep spacecraft requires further research.

Keywords: space situational awareness, support, spacecraft maneuver, TLE parameters, spacecraft, reduced ballistic coefficient.

References

1. Memorandum of Understanding signed between SSA and the US Department of Defence on cooperation in the field of space flight safety [online]. 02 veresnia 2021 roku, Available at: <https://www.kmu.gov.ua/news/pidpisano-memorandum-pro-vzayemorozuminnya-mizh-dka-ta-taminobor> [Accessed: 10 June 2024].
2. Kovalenko, N. E., Vnukov, A. A. Application of electric thrusters in a spacecraft propulsion system [online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/361513096_Application_of_electric_thrusters_in_a_spacecraft_propulsion_system [Accessed: 10 June 2024].
3. On-orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing 1 (OSAM-1). [online]. Available at: <https://www.nasa.gov/mission/on-orbit-servicing-assembly-and-manufacturing-1/> [Accessed: 10 June 2024].
4. SpaceX Starlink satellites had to make 25,000 collision-avoidance maneuvers in just 6 months – and it will only get worse. [online]. Available at: <https://www.space.com/starlink-satellite-conjunction-increase-threatens-space-sustainability> [Accessed: 10 June 2024].
5. Kozelkov, S. V., Makhonyn E. Y., Morhun A. A., Kozelkova E. S., Yamnytskyi V. A., (2012). Method of «tertiary» processing of catalogues of coordinate information of space objects. *Systemy obrobky informatsii*, 3 (101), 2.
6. Nasa space Science Data Coordinated Archive [online]. Available at: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/> [Accessed: 10 June 2024].
7. NASA JPL Horizons System [online]. Available at: <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/> [Accessed: 10 June 2024].
8. Heavens Above [online]. Available at: <https://www.heavens-above.com/> [Accessed: 10 June 2024].
9. CelesTrak [online]. Available at: <https://celestrak.org/> [Accessed: 10 June 2024].
10. Space-Track [online]. Available at: <https://www.space-track.org> [Accessed: 10 June 2024].
11. Zakharov, O. B., Humeniuk, V. O., Zaluzhnyi, R. M., (2007). Organisation of ballistic and navigational support of spacecraft control : textbook / Pid red. M. S. Sivova, Kyiv : NAOU.
12. Bohun, O. I., (2023). Analysis of space situational awareness software capabilities for detecting spacecraft manoeuvres. *Trudy Universytetu*, 6.
13. Vallado, D. A., (2008). SGP4 Orbit Determination Center for Space Standards and Innovation, Colorado Springs, Colorado [online]. Available at: <https://celestrak.org/publications/AIAA/2008-6770/AIAA-2008-6770.pdf> [Accessed: 10 June 2024].
14. Hoots, F. R., Roehrich, R. L., (31 December 1988). Spacetrack report No. 3. Models for Propagation of NORAD Element Sets, [online]. Available at: <https://celestrak.org/NORAD/documentation/spacetrk.pdf> [Accessed: 10 June 2024].