

УДК 629.76

¹ *Михайло Юрійович Ракушев (доктор технічних наук, с.н.с., доцент кафедри)*² *Сергій Валентинович Ковбасюк (доктор технічних наук, с.н.с., п.н.с. наукового центру)*¹ *Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна*² *Житомирський військовий інститут імені С.П.Корольова, Житомир, Україна*

ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАЄКТОРНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ВИДОВОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМІ КОНТРОЛЮ ТА АНАЛІЗУ КОСМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ

Ведення гібридної війни проти України засвідчує, що використання космічних систем суттєво впливає на стан забезпеченості національної безпеки та оборони. Важливим питанням при застосуванні власних та протидії іноземним космічним системам є знання обстановки, що складається у навколосемному космічному просторі. В Україні для вирішення цього питання створено Систему контролю та аналізу космічної обстановки, центральним завданням якої є ведення каталогу космічних об'єктів.

Оснovo каталогу космічних об'єктів складають орбітальні параметри руху космічних об'єктів. За даними з цього каталогу проводиться оповіщення про прольоти іноземних космічних апаратів видового спостереження, що дозволяє звести до мінімуму виток відповідної інформації оборонного та народногосподарського характеру. Для якісного вирішення завдання оповіщення необхідно забезпечити високі характеристики з точності ведення каталогу космічних об'єктів.

На теперішній час, для визначення орбітальних параметрів руху космічних об'єктів використовуються підходи засновані на методі найменших квадратів. Вихідним припущенням при використанні зазначеного підходу є нормальний закон розподілу похибок траєкторних вимірювань. Останні дослідження свідчать, що таке припущення є припустимим для оптико-електронних засобів, і обмежено виконується для радіолокаційних засобів. Зазначене, призводить до незадовільних характеристик точності сумісної обробки траєкторних вимірювань і, відповідно, точності ведення каталогу космічних об'єктів та оповіщення про прольоти іноземних космічних апаратів видового спостереження.

У статті розглядаються шляхи до удосконалення проведення обробки траєкторних вимірювань від різномісних вимірювальних засобів в системі контролю та аналізу космічної обстановки щодо підвищення точності ведення каталогу космічних об'єктів для якісного вирішення завдання оповіщення про прольоти космічних апаратів видового спостереження.

Ключові слова: космічний об'єкт, траєкторні вимірювання, узгоджена обробка, орбітальні параметри, диференціальні перетворення, система контролю та аналізу космічної обстановки.

Вступ

Забезпечення розвитку сучасних космічних технологій в Україні є важливим чинником, що визначає стратегічне місце держави у світі. Таким чином, актуальним є підвищення ефективності використання національного космічного потенціалу для вирішення нагальних завдань які відносяться до сфери національних інтересів. Зазначений аспект, ще більше загострився за умов збройної агресії проти України, так-як використання космічних систем суттєво впливає, на ефективність дій збройних сил зокрема, та на стан забезпечення національної безпеки та оборони у цілому.

Важливим питанням при застосуванні власних та протидії іноземним космічним системам є знання обстановки, що складається у навколосемному космічному просторі.

Постановка проблеми. На сучасному етапі використання космічного простору, повні системи контролю космічного простору (ККП) мають США (на її супроводженні знаходиться більше

40000 КО) та РФ. Розвиває власну систему ККП КНР, створює її елементи Європейське космічне агентство та багато інших країн [1, 2].

В Україні, завдання моніторингу космічного простору виконує система контролю та аналізу космічної обстановки (СКАКО), яка є стратегічною системою держави та призначена для стеження за усіма доступними космічними об'єктами (КО) штучного походження в навколосемному космічному просторі та діями іноземних країн з його використання [1, 3].

Організаційно в більшості країн системи ККП, підпорядковані воєнним відомствам. СКАКО входить до Державного космічного агентства України, яке виконує завдання, у тому числі, в інтересах національної безпеки та оборони.

Структурно СКАКО являє собою сукупність вимірювальних засобів, що системно об'єднані єдиним пунктом управління та обробки вимірювань. Центральною задачею СКАКО є ведення каталогу КО, яка передбачає інвентаризацію КО, що знаходяться у навколосемному просторі, у тому числі, селекцію

діючих космічних апаратів (КА): їх ідентифікацію, визначення цільового призначення, національної приналежності та т.і [1].

Основними вимогами, що висуваються до каталогу КО є його повнота, точність та оперативність оновлення.

На теперішній час, одним з першочергових завдань, що виконується на основі даних з каталогу КО для у сфері національної безпеки та оборони є проведення оповіщення про прольоти іноземних КА видового спостереження, що дозволяє зменшити виток інформації закритого характеру. Для проведення оповіщення використовується вся інформація з каталогу КО: орбітальні параметри та класифікаційні ознаки КА, його державна приналежність та характеристики бортової апаратури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для якісного вирішення завдання з оповіщення про прольоти іноземних космічних апаратів видового спостереження, необхідно забезпечити високі характеристики точності ведення каталогу КО. Зазначені характеристики каталогу КО в СКАКО визначаються можливостями наземних вимірювальних засобів з проведення траєкторних вимірювань та порядком їх подальшої сумісної обробки [4, 5].

Особливостями національної СКАКО є [1, 5]: по-перше, до її складу входить обмежена кількість різнотипних (радіолокаційних та оптико-електронних) вимірювальних засобів які є високовартісними та складними системами; по-друге, усі вимірювальні засоби дислоковані на географічно обмеженій державним кордоном території.

Зазначене визначає необхідність проведення складної обробки усіх наявних траєкторних вимірювань які (відповідно особливостей СКАКО): по-перше, отримані на основі різних фізичних принципів з суттєво різними характеристиками точності; по-друге, мають значні часові інтервали рознесення.

Описані особливості СКАКО ще більше ускладнили завдання ведення каталогу КО після тимчасової окупації Криму РФ, де дислоковані біля 40% вимірювальних засобів СКАКО.

На теперішній час, основними в СКАКО, є алгоритми обробки траєкторних вимірювань на основі методу найменших квадратів [5]. Однак, результуюча точність проведення обробки траєкторних вимірювань на їх основі вже не задовольняє високим сучасним вимогам, які висуваються до характеристик каталогу КО з боку споживачів інформації СКАКО, що виконують завдання у сфері національної безпеки та оборони. Все це, суттєво загострюється при веденні проти України агресивної гібридної війни та втрати частини національної території на якій дислокована значна частина вимірювальних засобів СКАКО.

Метою статті є пошук шляхів підвищення точності визначення орбітальних параметрів руху

КО на основі обробки траєкторних вимірювань від різнотипних вимірювальних засобів СКАКО для ведення каталогу КО та якісного вирішення завдання оповіщення про прольоти КА видового спостереження. Зазначена мета є актуальною, за умов збройної агресії проти України та незначних вітчизняних фінансових спроможностях щодо кількісного нарощування наземних вимірювальних засобів СКАКО

Виклад основного матеріалу дослідження.

На теперішній час, для визначення орбітальних параметрів руху КО при обробці траєкторних вимірювань, використовуються підходи засновані на методі найменших квадратів (у більш загальному вигляді методі максимальної правдоподібності), що дозволяє отримувати кінцеві алгоритми траєкторної обробки які характеризуються задовільною точністю при прийнятній обчислювальній складності. При цьому, одним з вихідних припущень, що визначає можливість використання описаного підходу є нормальний закон розподілу похибок траєкторних вимірювань які отримуються вимірювальними засобами спостереження за КО. Останні дослідження визначають, що таке припущення є припустимим для оптико-електронних засобів, і обмежено виконується для радіолокаційних засобів [6]. Зазначене призводить до неможливості підвищення точності сумісної обробки траєкторних вимірювань від різнотипних засобів в СКАКО на існуючих підходах.

Крім вимоги з точності на характеристики алгоритмів обробки траєкторних вимірювань, додатково, накладається обмеження щодо їх прийнятної обчислювальної складності для забезпечення можливості їх реалізації на ЕОМ. Останнє обмеження є суттєвим, так як СКАКО є складною інформаційною системою масового обслуговування високої пропускну здатності, що працює у реальному масштабі часу. Це обумовлює те, що ведення каталогу КО для великої кількості КО вимагає наявності високопродуктивної ЕОМ вартість якої може бути занадто великою [4].

У цілому, за рахунок задовільної точності при прийнятній обчислювальній складності, що забезпечує можливість їх реалізації на ЕОМ, алгоритми обробки траєкторних вимірювань на основі методу найменших квадратів на теперішній час є основними в СКАКО (описаний підхід є основним і в системі контролю космічного простору РФ) [4]. Можна стверджувати, що зазначений підхід до проведення обробки траєкторних вимірювань на теперішній час досяг своїх максимальних характеристик з точності визначення орбітальних параметрів руху КО. З іншого боку, до точності ведення каталогу КО, з боку споживачів інформації СКАКО (насамперед, які виконують завдання у сфері національної безпеки та оборони) висуваються постійно зростаючі вимоги (наведена тенденція має місце і

в інших країнах які мають системи контролю космічного простору) [6].

В основі підходів до побудови алгоритмів обробки траєкторних вимірювань для визначення орбітальних параметрів руху КО лежить прийнятий критерій якості, який визначає відповідний статистичний метод траєкторної обробки. Вибір такого критерію обумовлюється рядом факторів, основними з яких є умови проведення вимірювань (спосіб комбінування похибок вимірювань та їх характеристики) [7]. Часто, на практиці, при виборі критерію якості, крім вказаних вище припущень, робляться ще сильніші припущення, насамперед, про вигляд кореляційної матриці похибок вимірювань. Як правило вважається, що вона є діагональною, або, квазідіагональною.

Суттєвим недоліком описаних підходів до обробки траєкторних вимірювань є використання сильних, і часто невиправданих припущень про вигляд законів розподілу та кореляційних матриць похибок вимірювань. Тому, ці підходи стають малоефективними при високих вимогах до точності визначення орбітальних параметрів КО.

Зазначена проблемна ситуація, щодо невідповідності між реальними умовами проведення траєкторної обробки та використовуваними при теоретичних побудовах основними припущеннями досліджувалась у працях П.Є.Ельясберга (Інституту космічних досліджень Академії наук СРСР) [8], одним з базових положень яких є те, що для похибок вимірювань задаються тільки області в яких вони знаходяться. В описаній постановці для обробки траєкторних вимірювань використовуються алгоритми на основі мінімаксного критерію якості, а самі оцінки автор називає – гарантованими.

Недоліками мінімаксного підходу є те, що отримані в результаті границі можливих значень похибок визначення величин параметрів, що оцінюються є, занадто розширеними та те, що у ньому погано використовуються інформаційні можливості всіх проведених траєкторних вимірювань, що негативно впливає на точність кінцевих результатів. Зазначені недоліки, призвели до того, що цей підхід не знайшов практичного застосування у системі контролю космічного простору СРСР.

Питанням розвитку мінімаксного підходу та досліджень щодо його практичної реалізації при обробці траєкторної інформації в системі контролю космічного простору РФ, присвячені публікації науковців Інституту прикладної механіки ім. Келдиша та ВАТ “МАК “Вимпел” [6, 9]. Зазначене обумовлене тим, що похибки вимірювань радіолокаційних засобів спостереження за КО значно ближчі до рівномірного закону, ніж до нормального. Запропонований у цих публікаціях підхід є ефективнішим за метод найменших квадратів щодо точності визначення орбітальних параметрів руху КО. Автори називають свій підхід

нестатистичним [6]. Основним недоліком нестатистичного підходу є те, що його результуюча обчислювальна складність, у порівнянні з методом найменших квадратів, є суттєво вищою (до 2-х порядків). Саме цей недолік, через можливості наявних обчислювальних засобів, до теперішнього часу, не дозволяв його впровадження в системі контролю космічного простору РФ.

В Україні, проблематиці щодо відмови від припущення про нормальний закон розподілу похибок траєкторних вимірювань присвячені публікації Жечева М.М. (Інститут технічної механіки НАН України та ДКА України) та Шептуна А.Д. (ДКБ “Південне”). Автори, називають розроблений підхід – метод узгоджених вимірювань [10]. Відмінною особливістю цього підходу є використання в алгоритмі обробки траєкторних вимірювань матриці Якобі часткових похідних від вимірювальних функцій за шуканими параметрами орбіти КО, що дозволяє провести оцінку характеристик точності визначення орбітальних параметрів руху КО. Узгоджений підхід підвищує точність визначення орбітальних параметрів руху КО у порівнянні з методом найменших квадратів. Однак, його основним недоліком є занадто висока обчислювальна складність (яка додатково підвищується при визначенні матриці Якобі), що значно ускладнює його реалізацію в СКАКО. Окремо слід зазначити, що узгоджений підхід не застосовувався для обробки траєкторних вимірювань від різнотипних вимірювальних засобів.

Однією з основних складових алгоритму траєкторної обробки, яка напряду визначає його результуючу обчислювальну складність, є процедура прогнозування руху КО [7]. Прогнозування руху КО проводиться на основі інтегрування диференціального рівняння, що описує його орбітальний рух. На теперішній час у вітчизняній практиці, для високоточного прогнозування руху КО, використовуються числові кінцево-різницеві методи (а саме, 7-ми етапний метод Адамса, що використовується за екстраполяційно-інтерполяційною схемою, розгін якого проводиться методом Рунге-Кутта 4-го порядку). Основним недоліком числових методів є їх висока обчислювальна складність, який ще більше підсилюється при розрахунку матриці Якобі.

Якщо розглянути останні дослідження щодо впровадження інших методів інтегрування звичайних диференціальних рівнянь у практику рішення завдання прогнозування руху КО, то можна зазначити, що одними з перспективних є методи на основі диференціальних перетворень академіка НАН України Г.Є. Пухова [11]. Використання диференціальних перетворень для прогнозування руху КО, у порівнянні з традиційними числовими методами, дозволяє досягти скорочення обчислювальних витрат на прогнозування. Але, відомі методи на їх основі, не

враховують всіх особливостей диференціальних рівнянь руху КО ближнього космосу, що у підсумку, знижує їх обчислювальну ефективність.

У цілому, віддаючи перевагу вітчизняним науковим напрацюванням, можна зазначити, що дослідження з удосконалення описаного вище узгодженого підходу щодо обробки траєкторних вимірювань від різнотипних вимірювальних засобів в СКАКО та зменшення його обчислювальної складності на основі використання математичного апарата диференціальних перетворень є пріоритетними.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Таким чином, визначені шляхи підвищення точності визначення орбітальних параметрів руху КО на основі обробки траєкторних вимірювань від різнотипних вимірювальних засобів СКАКО для ведення каталогу КО та якісного вирішення завдання оповіщення про прольоти КА видового

спостереження. Впровадження зазначених шляхів дозволить реалізувати:

обробку траєкторних вимірювань від різнотипних за фізичними принципами функціонування засобів, а саме: оптико-електронних та радіолокаційних;

обробку траєкторних вимірювань які мають різні характеристики похибок вимірювань та не вимагають прийняття нормального закону їх розподілу;

можливість розробки алгоритмів траєкторної обробки які мають прийнятну для реалізації на ЕОМ обчислювальну складність.

Перспективними напрямками подальших досліджень є безпосередня розробка методів та кінцевих алгоритмів узгодженої траєкторної обробки з використанням диференціальних перетворень. Та подальша оцінка їх ефективності для вирішення завдання оповіщення про прольоти КА видового спостереження.

Література

1. Основи побудови системи контролю та аналізу космічної обстановки / **І.Д. Варламов, В.В. Зуйко та ін.** – К.: НУОУ, 2015. – 221 с. 2. **С.С. Вениаминов**. Космический мусор - угроза человечеству/ **Вениаминов С.С.** – М.: Механика управление и информатика, 2013. – 208 с. 3. Розпорядження № 238 КМ України від 30.03.2011 р. Про затвердження Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року. 4. **Хуторовский З.Н.** Методы обработки измерений при каталогизации КО в ЦККП / **З.Н. Хуторовский.** – М., 2009. – 36 с. 5. **Каневский Л.Б., Ковбасюк С.В.** Анализ особенностей ведения каталога космических объектов за информацией от отечественных оптических средств / **Л.Б. Каневский, С.В. Ковбасюк** // Вісник ЖДТУ. – Ж: ЖДТУ, №1 (56). 2011. С. 50-55. 6. **Режим доступу** <http://fvn.astronomer.ru/report/0000076/Vimpel.pdf>.

7. **В.Н. Брандин, А.А. Васильев, А.А. Куницкий.** Экспериментальная баллистика космических аппаратов / **Брандин В.Н., Васильев А.А., Куницкий А.А.** – М.: Машиностроение, 1984. – 262 с. 8. **Эльясберг П.Е.** Определение движения по результатам измерений / **П.Е. Эльясберг.** – М.: Наука, 1976. – 416 с. 9. **Режим доступу** <http://www.vimpel.ru/nauchnie-trudi-i-publikatsii/>. 10. **М.М. Жечев, А.Д. Шептун.** Метод согласованных измерений определения движения космических летательных аппаратов / **Жечев М.М., Шептун А.Д.** // Техническая механика. – Днепропетровск: ИТМ НАНУ НКАУ, №2. 2002. С. 36-44. 11. **Ракушев М.Ю.** Прогнозирование руху космічних апаратів на основі диференціально-тейлорівських перетворень: монографія / **М. Ю. Ракушев.** – Ж. Видавець О.О.Євенюк, 2015. – 324 с.

ПУТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ВИДОВОГО НАБЛЮДЕНИЯ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ И АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

¹*Михаил Юрьевич Ракушев (доктор техн. наук, с.н.с., доцент кафедры)*

²*Сергей Валентинович Ковбасюк (доктор техн. наук, с.н.с., п.н.с. научного центра)*

¹*Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина*

²*Житомирский военный институт имени С.П.Королева, Житомир, Украина*

Ведение гибридной войны против Украины показывает, что использование космических систем существенно влияет на состояние обеспеченности национальной безопасности и обороны. Важным вопросом при применении собственных и противодействия иностранным космическим системам является знание обстановки, которая складывается в околоземном космическом пространстве. В Украине для решения этого вопроса создана Система контроля и анализа космической обстановки, центральной задачей которой является ведение каталога космических объектов.

Основу каталога космических объектов составляют орбитальные параметры движения космических аппаратов. По данным из этого каталога производится оповещение о пролетах иностранных космических аппаратов видового наблюдения, что позволяет свести к минимуму утечку соответствующей информации оборонного и народнохозяйственного характера. Для качественного решения задачи оповещения необходимо обеспечить высокие характеристики по точности ведения каталога космических объектов.

В настоящее время, для определения орбитальных параметров движения космических объектов, используются подходы основанные на методе наименьших квадратов. Исходным предположением при

использовании указанного подхода является нормальный закон распределения погрешностей траекторных измерений. Последние исследования показывают, что такое предположение допустимо для оптико-электронных средств, и ограничено выполняется для радиолокационных средств. Указанное, приводит к неудовлетворительным характеристикам точности совместной обработки траекторных измерений и, соответственно, точности ведения каталога космических объектов и оповещения о пролетах иностранных космических аппаратов видового наблюдения.

В статье рассматриваются пути к совершенствованию проведения обработки траекторных измерений от разнотипных средств измерений в системе контроля и анализа космической обстановки по повышению точности ведения каталога космических объектов для качественного решения задачи оповещения о пролетах космических аппаратов видового наблюдения.

Ключевые слова: космический объект, траекторные измерения, согласованная обработка, орбитальные параметры, дифференциальные преобразования, система контроля и анализа космической обстановки.

Ways of improvement of trajectory processing for space observation devices in the Space environment control system

¹**Mikhailo Yu. Rakushev** (Doctor of Technical Science, Senior researcher, Associate professor of chair)

²**Sergei V. Kovbasjuk** (Doctor of Technical Science, Senior researcher, Leading researcher of research centre)

¹*National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovsky, Kyiv, Ukraine*

²*Zhitomir Military Institute named after S.P.Korolev, Zhitomir, Ukraine*

Driving a hybrid war against Ukraine shows that the use of space systems has a significant impact on the state of national security and defense. An important issue when using own and countering foreign space systems is the knowledge of the near-earth space environment. In Ukraine, the Space Environment Control System (SECS) was created to address the issue.

The main task of the SECS is to maintain a space object directory based on orbital parameters of the movement of space objects (SO). According to the data from this catalog, alerts are made of spans of foreign satellite vehicles of species observation, which minimizes the turn of relevant information of defense and national economic nature. For qualitative solution of the problem of notification it is necessary to ensure high characteristics of the accuracy of the catalog of SO.

At present, approaches for determining the orbital parameters of the SO are based on the least squares method. The basic assumption for using this approach is the normal law of errors in trajectory measurements. Recent studies indicate that this assumption is acceptable for optoelectronic devices, and is limitedly used for radar equipment. The said, leads to unsatisfactory characteristics of the accuracy of the coherent processing of trajectory measurements and, accordingly, the accuracy of the catalog of SO and the notification of the flight of foreign spacecraft of species surveillance.

The article considers ways to improve the processing of trajectory measurements from different types of measuring instruments in SECS in order to improve the accuracy of the catalog of space objects for the qualitative solution of the problem of alert of spatial objects of satellite observation devices.

Keywords: Space object, trajectory measurements, coherent processing, orbital parameters, differential transformations, the Space Environment Control System

References

- Varlamov I.D., Zuiko V.V., etc.** (2015), Fundamentals of the system of control and analysis of the space environment. [Osnovy pobudovy systemy kontrolyu ta analizu kosmichnoyi obstanovky], K.: NUOU, 221 p.
- Veniaminov S.S.** (2013), Space debris is a threat to humanity [Kosmicheskyy musor - ugroza chelovechestvu]. - Moscow: Mechanics of Control and Informatics, - 208 p.
- Decree № 238** of the Cabinet of Ministers of Ukraine as of March 30, 2011 the Concept of state space policy realization for the period to 2032.
- Khutorsky Z.N.** (2009), Methods of processing measurements in the cataloging of SO in the SESC. [Metody obrabotki izmereniy pri katalogizatsii KO v TSKKP]. - M. - 36 p.
- Kanevsky L. B., Kovbasyuk S.V.** (2011). Analysis of the peculiarities of cataloging space objects according to information from domestic optical means. [Analiz osoblyvostey vedennyya katalogu kosmichnykh ob'ektiv za informatsiyeyu vid vitchyznyanykh optychnykh zasobiv]. Bulletin of ZhDTU. ZhDTU, No. 1 (56). S. 50-55.
- Access mode** <http://fvn.astronomer.ru/report/0000076/Vimpel.pdf>.
- Brandin V.N., Vasiliev A.A., Kunitsky A.A.** (1984). Experimental ballistics of space vehicles. [Eksperimental'naya ballistika kosmicheskikh apparatov]. Moscow: Mechanical Engineering, - 262 p.
- Elyasberg P.E.** (1976). Determination of motion based on measurement results. [Opredeleniye dvizheniya po rezul'tatam izmereniy]. - M.: Nauka, - 416 p.
- Access mode** <http://www.vimpel.ru/nauchnie-trudi-i-publikatsii/>.
- Zhechev M.M., Sheptune A.D.** (2002). Method of consistent measurements of the motion of spacecraft. [Metod soglasovannykh izmereniy opredeleniya dvizheniya kosmicheskikh letatel'nykh apparatov]. Technical mechanics. - Dnipropetrovsk: ITM NASU, N2. P. 36-44.
- Rakushev M.Yu** (2015). Spacecraft motion prediction on the basis of the Taylor differential transformations: monograph. [Prohnozuvannya rukhu kosmichnykh apparativ na osnovi dyferentsial'no-Taylorivskiykh kykh peretvoren: monohrafiya] - Zh. Publisher O.O.Yevenok, - 324p.