

УДК 629.7:001.57.001.63

П.В. Фриз

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова НАУ, Житомир

ТЕОРЕТИКО-МНОЖИННИЙ ПІДХІД ДО ОПИСУ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ В ЗАДАЧАХ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗЕМЛІ

Запропоновано підхід до формалізованого опису специфічних орбіт космічних апаратів (КА) на основі теорії множин з метою їх автоматизованого вибору для оперативного і достовірного вирішення певних цільових завдань вітчизняними користувачами при спостереженнях заданих районів і об'єктів Землі.

Ключові слова: специфічна орбіта космічного апарату, формалізований опис орбіти, просторово-часове положення космічного апарату, множина орбіт.

Вступ

Постановка проблеми. Успішний запуск вітчизняного КА дистанційного зондування Землі "Січ-2" та його функціонування на заданій орбіті свідчить про те, що Україна нарощує темпи космічної діяльності. Цим запуском закладено реальну основу для створення національної космічної системи спостереження (КСС), яка має служити дієвим засобом попередження загроз у сфері національної безпеки і оборони України.

Зрозуміло, що для ефективного використання супутникової інформації нашій державі необхідно створювати орбітальні групування (ОГ) із декількох КА, що і передбачено Національною космічною програмою [1] та Концепцією реалізації державної політики у сфері космічної діяльності [2].

Але в нинішніх умовах, коли можливості України щодо створення ОГ обмежені, одним із перспективних шляхів підвищення ефективності попередження загроз у сфері національної безпеки і оборони може бути використання інформації від **іноземних комерційних КСС**, причому від тих, які здатні забезпечити **оперативний збір** даних з будь-якого району Землі з достатньо високим просторовим і спектральним розрізненням.

Прикладом таких КСС можуть служити американські системи *NOAA, Terra, Aqua, Landsat, Ikonos, Quicbird, Orbview*, канадська *Radarsat*, ізраїльська *Eros*, французька *Spot*, європейська *Envisat*, індійська *Irs*, російські *Ресурс* та ін. [3].

При цьому відомо декілька шляхів отримання цільової інформації від іноземних КСС:

а) система замовлень на зйомку потрібних районів і об'єктів через операторів зазначених КСС або посередників;

б) безпосереднє планування і реалізація зйомки національними користувачами за умови придбання у власників КСС ліцензії та відповідних наземних засобів;

в) придбання готових архівних знімків і т. п.

Зрозуміло, що для забезпечення високої оперативності контролю за наземною обстановкою слід використовувати перші два шляхи. При такому підході постають питання *завчасного вибору* комерційних КА і *планування їх цільового використання*. При цьому завдання вибору придатних КА доцільно вирішувати поетапно за декількома критеріями, одним із яких є просторово-часове положення КА у космічному просторі і відносно наземних об'єктів (НО) спостереження і наземних пунктів (НП) прийому інформації. У зв'язку з цим зосередимо увагу лише на одній задачі – виборі придатних КА за їх **просторово-часовим положенням**, тобто за параметрами їх орбіт і орбітального руху.

Для такого вибору можна скористатись найбільш відомим джерелом даних щодо КА та їх орбіт – міжнародним каталогом *NORAD/NASA* [4], у якому на теперішній час зареєстровано біля 39 000 космічних об'єктів (КО). Дані у каталозі *NORAD/NASA* регулярно оновлюються та вільно поширюються в Інтернеті у формі так званих *TLE-файлів*.

Але, оскільки в теперішній час для вибору будь-яких КА із цього каталогу здебільшого використовується *ручний спосіб* пошуку шляхом прямого перебору тематичних груп та розшифрування *TLE-параметрів* у них, то для знаходження будь-якого КО витрачається значний час. Це зумовлено як неоднозначністю критеріїв класифікації КА, так і розміщенням супутників одного типу в різних рубриках.

У зв'язку з цим виникає **актуальне завдання** автоматизації процесу пошуку в каталозі *NORAD/NASA* придатних КА за конкретними критеріями. Це забезпечить як скорочення часу на пошук (підвищення оперативності), так і зниження суб'єктивних похибок оператора (підвищення достовірності інформації).

Серед іноземних комерційних КА, інформація з яких придатна для використання в інтересах національної безпеки і оборони України, у першу чергу, необхідно виділити ті, які функціонують на так званих **специфічних орбітах** [5]: стаціонарних (СтО),

високоеліптичних (ВЕО) та сонячно-синхронних (ССО), що формально можна описати множиною

$$O_{\text{сп}} = \{ \text{СтО, ВЕО, ССО} \}. \quad (1)$$

КА на таких орбітах забезпечують якісне вирішення завдань дистанційного зондування Землі, спостереження за окремими НО, а також навігації, метеорології, зв'язку, причому їх часто застосовують у складі ОГ.

У зв'язку з цим необхідно *сформулювати критерії вибору КА на специфічних орбітах* незалежно від тематичних груп каталогу *NORAD/NASA*, що забезпечить можливість автоматизувати процес пошуку придатних супутників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням формалізованого опису і моделювання процесів у КСС присвячено низку наукових робіт, зокрема монографії [6 – 8] та статтю [9]. Але в роботі [6] розглядаються питання лише балістичного проектування національних КСС, а в монографіях [7] та [8] досліджено в основному моделювання процесів спостереження Землі, причому здебільшого у загальному вигляді. Найближчою за змістом і отриманими результатами до проблем, що підняті в запропонованій статті, є робота [9]. Але вона присвячена формалізації процесів тільки раціонального планування роботи вітчизняних КА в умовах обмежених бортових ресурсів.

Виходячи з цього, **метою статті** є розробка математичного апарату, придатного для формалізованого опису специфічних видів орбіт КА з використанням каталогу *NORAD/NASA* з метою їх автоматизованого вибору для оперативного і достовірного вирішення цільових завдань вітчизняними користувачами при спостереженнях заданих районів і об'єктів Землі.

Викладення основного матеріалу

У загальному випадку для опису *положення* КА використовують вектор (множину) орбітальних параметрів або *вектор кеплерових елементів* еліптичної орбіти виду [5]:

$$\mathbf{R}_0 = \{ a, e, \omega, i, \Omega, t_{\Pi} \}, \quad (2)$$

де a і e – велика піввісь і ексцентриситет орбіти; ω , i , Ω – аргумент перигею, нахилення та інерціальна довгота висхідного вузла (ВВ) орбіти; t_{Π} або t_{Ω} – момент знаходження КА в перигеї або у ВВ орбіти.

Поряд з вектором орбітальних параметрів (2) використовують й інший вектор, який комплексно характеризує параметри орбіти і параметри руху КА:

$$\mathbf{R}(t) = \{ r(t), V(t), \theta(t), u(t), \Omega, i \}, \quad (3)$$

де $r(t)$ і $V(t)$ – поточний модуль радіуса-вектора КА та його лінійна швидкість;

$\theta(t)$ і $u(t)$ – кут місцевого горизонту та аргумент широти КА;

t – польотний час КА, відлік якого ведеться від точки перигею або ВВ орбіти.

Крім того, як показує аналіз структури і складу *TLE-файлів*, на основі інформації в них просторово-часове положення будь-якого КА можна описати ще одним вектором

$$\mathbf{R}_{\text{TLE}} = \{ i, \Omega, e, \omega, M, N, D.d, \Delta \}, \quad (4)$$

де M – середня аномалія КА на момент t_{Ω} ;

N – середньодобовий рух КА (кількість витків орбіти за добу);

$D.d$ – епохальний час для конкретного КА (рік, місяць, число, години, хвилини, секунди і доли секунди на момент t_{Ω});

Δ – решта даних (значення першої $G = dN/dt$ та другої $P = d^2N/dt^2$ похідних від середньодобового руху, величина деяких збурювальних факторів Q і т. п.).

Між векторами (2)...(4) існує певний взаємозв'язок, що дозволяє однозначно переходити від відомих компонентів вектора (4) до шуканих компонентів векторів (2) або (3):

$$\mathbf{R}_{\text{TLE}} \rightarrow \mathbf{R}_0; \mathbf{R}_{\text{TLE}} \rightarrow \mathbf{R}(t),$$

а далі вирішувати завдання вибору необхідних КА за класичними параметрами їх орбіт.

Однак у цьому разі виникають труднощі в пошуку і виборі самих компонентів вектора (4) із каталогу *NORAD/NASA* через його велику розмірність. Щоправда, розробники цього каталогу дещо полегшили задачу пошуку, заздалегідь розділивши всю множину КО на тематичні рубрики.

Але аналіз цих рубрик показує, що в їх основу покладено *різні* критерії класифікації КА. Через такий підхід існуючі рубрики каталогу *NORAD/NASA* виявились *малопродатними* для вибору із них множини специфічних орбіт (1). Враховуючи це, “відмовимось” від зазначених рубрик, об'єднаємо всі КО в одну загальну сукупність O_{Σ} та переформатуємо її за іншими, придатними для нас, рубриками.

Зокрема, сукупність КО O_{Σ} у каталозі *NORAD/NASA* за їх просторово-часовим положенням розділимо на три множини:

- а) КО на специфічних орбітах $O_{\text{сп}}$;
- б) КО на інших орбітах $O_{\text{ін}}$;
- в) КО на невідомих орбітах $O_{\text{нв}}$.

При цьому до невідомих віднесемо ті орбіти, стосовно яких у каталозі на даний момент відсутня інформація щодо орбітальних параметрів КО або відсутні самі *TLE-файли*. У зв'язку з цим для зручності введемо бінарну ознаку наявності або відсутності *TLE-файлів* для конкретного КО у загальній їх сукупності у вигляді

$$\text{TLE} = \begin{cases} 1, & \text{якщо є дані про КО;} \\ 0, & \text{якщо дані відсутні.} \end{cases} \quad (5)$$

У такому разі незалежно від значення ознаки TLE має виконуватися умова

$$\mathbf{O}_{\text{сп}} \cup \mathbf{O}_{\text{ін}} \cup \mathbf{O}_{\text{нв}} = \mathbf{O}_{\Sigma} \quad \text{при } TLE = 0 \vee 1. \quad (6)$$

При цьому з урахуванням ознаки (5) множину специфічних орбіт (1) представимо як

$$\mathbf{O}_{\text{сп}} = \{\text{СтО}, \text{ВЕО}, \text{ССО}\} \quad \text{при } TLE = 1, \quad (7)$$

а множина інших (неспецифічних) орбіт буде доповненням до множини (7):

$$\mathbf{O}_{\text{ін}} = \overline{\mathbf{O}_{\text{сп}}} \quad \text{при } TLE = 1. \quad (8)$$

Множина невідомих орбіт визначиться як доповнення до множин специфічних і неспецифічних орбіт:

$$\mathbf{O}_{\text{нв}} = \overline{\mathbf{O}_{\text{сп}} \cup \mathbf{O}_{\text{ін}}} = \overline{\mathbf{O}_{\text{сп}}} \cap \overline{\mathbf{O}_{\text{ін}}} \quad \text{при } TLE = 0. \quad (9)$$

Далі основну увагу приділимо специфічним орбітам. У загальному випадку будь-який вид орбіт, виходячи із їх визначення, можна описати через сукупність поодиноких орбітальних параметрів.

Наприклад, виходячи із визначення [5, 6, 8], що СтО – це кругова ($e = 0$) екваторіальна ($i = 0$) орбіта, на якій період обертання КА дорівнює зоряній добі ($T = T_{\text{зд}} \approx 23^{\text{h}}56^{\text{m}}04^{\text{s}}$), можна формально це визначення записати через операцію кон'юнкції як

$$\text{СтО} = (e = 0) \wedge (i = 0) \wedge (T = T_{\text{зд}}) = 1. \quad (10)$$

У реальних ситуаціях умову (10) виконати практично неможливо, тому при роботі з будь-яким каталогом КО слід задавати менш жорсткі (наближені) вимоги.

Наприклад, як показав аналіз каталогу NORAD/NASA, **множину СтО** у загальній множині орбіт існуючих КО зручно описувати через *підмножини* орбітальних параметрів:

$$\text{СтО} = (\mathbf{e}_{\text{к}} \cup \mathbf{e}_{\text{мк}} \cup \mathbf{e}_{\text{св}}) \cap (\mathbf{i}_{\text{зпр}} \cup \mathbf{i}_{\text{пзп}}) \cap \cap (\mathbf{T}_{\text{д}} \cup \mathbf{T}_{\text{кд}}), \quad (11)$$

де $\mathbf{e}_{\text{к}} = \{0 \leq e \leq 0,001\}$, $\mathbf{e}_{\text{мк}} = \{0,001 < e \leq 0,01\}$, $\mathbf{e}_{\text{св}} = \{0,01 < e \leq 0,1\}$ – підмножини *кругових, майже кругових* та еліптичних *слабко витягнутих* орбіт;

$\mathbf{i}_{\text{зпр}} \subset \mathbf{i}_{\text{пр}} = \{0^\circ \leq i \leq 3^\circ\}$, $\mathbf{i}_{\text{пзп}} \subset \mathbf{i}_{\text{пр}} = \{3^\circ < i \leq 6^\circ\}$ – підмножини *екваторіальних прямих та приекваторіальних прямих* орбіт;

\subset – символ, що означає "є підмножиною";

$\mathbf{T}_{\text{д}} = \{T_{\text{зд}} \pm \Delta T\}$, $\mathbf{T}_{\text{кд}} = \{T_{\text{зд}} \pm 2\Delta T\}$ – підмножини *добових* та *квазидобових* орбіт;

ΔT – допустимі (наприклад, $\Delta T \approx 0,01 T_{\text{зд}}$) еволюції періоду обертання КА на СтО.

Конкретні числові значення у виразі (11) можна змінювати залежно від реальних ситуацій та практичних потреб.

Із виразу (11) можна виділити ряд використуваних на практиці підмножин СтО:

$$\text{СтО}_* = \begin{cases} \text{СтО}_0 = \mathbf{e}_{\text{к}} \cap \mathbf{i}_{\text{з}} \cap \mathbf{T}_{\text{д}}; \\ \text{СтО}_1 = \mathbf{e}_{\text{мк}} \cap \mathbf{i}_{\text{пз}} \cap \mathbf{T}_{\text{кд}}; \\ \text{СтО}_2 = \mathbf{e}_{\text{св}} \cap \mathbf{i}_{\text{пз}} \cap \mathbf{T}_{\text{кд}}. \end{cases} \quad (12)$$

де СтО_0 – підмножина стаціонарних орбіт;

СтО_1 – підмножина квазістаціонарних орбіт;

СтО_2 – підмножина хитних орбіт.

За таким же принципом можна описати **множину ВЕО** у загальній сукупності орбіт існуючих КО. Для цього слід скористатись поняттям ВЕО [5, 6] як півдобової за періодом обертання КА ($T \approx 0,5 T_{\text{зд}}$) з висотою апогею $H_{\text{А}} \approx 40000$ км, висотою перигею $H_{\text{П}} \approx 700$ км, витягнутої еліптичної за формою орбіти з ексцентриситетом $e \approx 0,7$ та нахиленням $i \approx 63^\circ$. З урахуванням цього множину ВЕО доцільно описати як

$$\text{ВЕО} = (\mathbf{e}_{\text{в}} \cup \mathbf{e}_{\text{дв}}) \cap \mathbf{i}_{\text{рп}} \cap (\mathbf{T}_{\text{пд}} \cup \mathbf{T}_{\text{кпд}}), \quad (13)$$

де $\mathbf{e}_{\text{в}} = \{0,1 < e \leq 0,7\}$, $\mathbf{e}_{\text{дв}} = \{0,7 < e \leq 1\}$ – підмножини еліптичних *витягнутих* та *дуже витягнутих* орбіт;

$\mathbf{i}_{\text{рп}} \subset \mathbf{i}_{\text{пр}} = \{60^\circ \leq i \leq 65^\circ\}$ – підмножина *раціональних прямих* орбіт;

$\mathbf{T}_{\text{пд}} = \{0,5(T_{\text{зд}} - \Delta T) \leq T \leq 0,5(T_{\text{зд}} + \Delta T)\}$ – підмножина *півдобових* орбіт;

$$\mathbf{T}_{\text{кпд}} = [0,5(T_{\text{зд}} - 2\Delta T) \leq T < 0,5(T_{\text{зд}} - \Delta T)] \cup [0,5(T_{\text{зд}} + \Delta T) < T \leq 0,5(T_{\text{зд}} + 2\Delta T)]$$

підмножина *квазіпівдобових* орбіт.

Для формалізованого опису **ССО** скористаємось їх визначенням із [5, 6] як орбіт, площина яких "відслідковує" річний рух Сонця, а їх параметри забезпечують проходження КА над заданим районом Землі в один і той же місцевий час. Виходячи з цього, **множину ССО** у загальній сукупності орбіт існуючих КО можна задати у вигляді

$$\text{ССО} = \mathbf{e}_{\text{ссо}} \cap \mathbf{i}_{\text{ссо}} \cap \mathbf{T}_{\text{ссо}}, \quad (14)$$

де $\mathbf{e}_{\text{ссо}} = \mathbf{e}_{\text{ссе}} \cup \mathbf{e}_{\text{сск}} = \{0 \leq e \leq 0,55\}$ – множина ССО *будь-якої форми*; $\mathbf{e}_{\text{ссе}} = \{0,01 < e \leq 0,55\}$ – множина *еліптичних* ССО; $\mathbf{e}_{\text{сск}} = \mathbf{e}_{\text{к}} \cup \mathbf{e}_{\text{мк}} = \{0 \leq e \leq 0,01\}$ – множина *кругових* ССО; $\mathbf{i}_{\text{ссо}} \subset \mathbf{i}_{\text{зв}} = \mathbf{i}_{\text{ссе}} \cup \mathbf{i}_{\text{сск}} =$

$= \{95^\circ \leq i \leq 155^\circ\}$ – множина *будь-яких за нахиленням* ССО; $\mathbf{i}_{\text{ссе}} \subset \mathbf{i}_{\text{зв}} = \{95^\circ \leq i \leq 155^\circ\}$ – множина *еліптичних* ССО; $\mathbf{i}_{\text{сск}} \subset \mathbf{i}_{\text{зв}} = \{95^\circ \leq i \leq 145^\circ\}$ – множина *кругових* ССО; $\mathbf{i}_{\text{зв}} = \{90^\circ < i \leq 180^\circ\}$ – множина *зворотних* орбіт; $\mathbf{T}_{\text{ссо}} = \mathbf{T}_{\text{ссе}} \cup \mathbf{T}_{\text{сск}} = \{5700^{\text{s}} \leq T \leq 17300^{\text{s}}\}$

– множина періодів обертання КА на ССО будь-якої форми; $T_{cse} = \{5700^s \leq T \leq 17300^s\}$ – множина періодів обертання КА на еліптичних ССО; $T_{cck} = \{5700^s \leq T \leq 12400^s\}$ – множина періодів обертання КА на кругових ССО.

Якщо необхідно розрізнити ССО на еліптичних та кругових орбітах на будь-яких висотах із діапазону допустимих, то можна скористатись залежністю

$$CCO = \begin{cases} CCO_e = e_{cse} \cap i_{cse} \cap T_{cse}; \\ CCO_k = e_{cck} \cap i_{cck} \cap T_{cck}, \end{cases} \quad (15)$$

де CCO_e – множина еліптичних ССО на низьких і середніх орбітах; CCO_k – множина кругових ССО на низьких і середніх орбітах.

У разі потреби додатково розрізнити ССО за висотою орбіт отримаємо

$$CCO_e = \begin{cases} CCO_{eh} = CCO_e \cap H_h; \\ CCO_{ec} = CCO_e \cap H_{cl}, \end{cases} \quad (16)$$

де CCO_{eh} – множина еліптичних ССО на низьких висотах; CCO_{ec} – множина еліптичних ССО на середніх висотах;

$H_h = \{300 \text{ км} < H \leq 1000 \text{ км}\}$ – множина низьких орбіт;

$H_{cl} \subset H_c = \{1000 \text{ км} < H \leq 10000 \text{ км}\}$ – підмножина середніх орбіт I;

$H_c = \{1000 \text{ км} < H \leq 20000 \text{ км}\}$ – множина середніх орбіт;

$$CCO_k = \begin{cases} CCO_{kh} = CCO_k \cap H_h; \\ CCO_{kc} = CCO_k \cap H_{cl}, \end{cases} \quad (17)$$

де CCO_{kh} – множина кругових ССО на низьких висотах; CCO_{kc} – множина кругових ССО на середніх висотах.

Висновки

Запропонований теоретико-множинний підхід до формалізованого опису специфічних видів орбіт КА дозволяє розробляти відповідне програмно-алгоритмічне забезпечення для автоматизованого вибору КА, придатних для певного цільового застосування.

Список літератури

1. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2008–2012 роки, затверджена Законом України від 30 вересня 2008 року N 608-VI. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua>.
2. Концепція реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua>.
3. Компания “Совзонд” – точный взгляд на мир: сб. статей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.sovzond.ru.
4. NORAD Two-Line Element Sets Current Data. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://celestrac.com/NORAD/documentation/tle-fmy.htm>.
5. Фриз П. В. Основы орбитального руху космічних апаратів: підручник / П. В. Фриз. – Житомир: ЖВІ НАУ, 2012. – 348 с. : іл.
6. Попович П.Р. Баллистическое проектирование космических систем / П.Р. Попович, Б.С. Скребушевский. – М.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
7. Ханцеверов Ф. Р. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли / Ф. Р. Ханцеверов, В. В. Остроухов. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
8. Лебедев А. А. Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование / А. А. Лебедев, О. П. Нестеренко. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
9. Мироненко В. М. Можливий підхід до формалізації процесів у космічних системах спостереження / В. М. Мироненко, П. В. Фриз, С. П. Фриз // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. праць. – Житомир: ЖВІРЕ, 2006. – Вип. 10. – С. 99 – 106.

Надійшла до редколегії 24.01.2013

Рецензент: д-р техн. наук проф. І.Г. Грабар, Житомирський національний агроекологічний університет, Житомир.

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ЗАДАЧАХ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

П.В. Фриз

Предложен подход к формализованному описанию специфических орбит космических аппаратов на основе теории множеств с целью их автоматизированного выбора для оперативного и достоверного решения определенных целевых задач отечественными пользователями при наблюдениях заданных районов и объектов Земли.

Ключевые слова: специфическая орбита космического аппарата, формализованное описание орбиты, пространственно-временное положение космического аппарата, множество орбит.

SET-THEORETIC APPROACH TO DESCRIBE THE SPATIAL-TEMPORAL POSITION SPACECRAFT IN PROBLEMS OF EARTH OBSERVATION

P.V. Fryz

An approach to formalized description of the specific orbits of space vehicles based on set theory for their automated selection for prompt and fair resolution of certain targets domestic users in the observations given areas and objects of the Earth.

Keywords: specific orbit of the spacecraft, a formalized description of the orbit, the space-time position of the spacecraft, a set of orbits.