

УДК 629.783:355.40

П. В. ФРИЗ,кандидат технічних наук, доцент
(Житомирський військовий інститут
ім. С. П. Корольова)

До проблеми управління процесом космічних спостережень заданих районів Землі при вирішенні оперативних завдань

Узагальнено авторські результати розробки методологічних основ управління процесом космічних спостережень заданих районів Землі при вирішенні оперативних завдань в умовах обмежених бортових ресурсів. При цьому запропоновано ряд методів та моделей, що певною мірою сприяють розв'язанню протиріччя між штатними можливостями космічних засобів та зростаючими потребами замовників цільової інформації від них.

Обобщены авторские результаты разработки методологических основ управления процессом космических наблюдений заданных районов Земли при решении оперативных задач в условиях ограниченных бортовых ресурсов. При этом предложен ряд методов и моделей, которые в определенной степени способствуют разрешению противоречия между штатными возможностями космических средств и растущими потребностями заказчиков целевой информации от них.

Серед завдань, поставлених у Загальнодержавній цільовій науково-технічній космічній програмі України на 2013–2017 роки та Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року [1, 2], основні пріоритети надано забезпеченню розвитку космічних технологій та їх інтеграції до сектору національної економіки і сфери національної безпеки та оборони з таких напрямів, як дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) з космосу, вдосконалення космічних систем (КС) телекомунікації, навігації та інших космічних інформаційних систем (КІС).

Характерною ознакою будь-якої КС є наявність в її структурі космічного сегмента – орбітальних засобів у складі одного або декількох космічних апаратів (КА). Щодо КІС КА виконує роль носія технічних засобів *інформаційної системи* – бортової цільової апаратури (БЦА), яка безпосередньо забезпечує збір та формування цільової інформації (ЦІ). Це можуть бути оптико-електронні прилади, радіолокатори, сканери, датчики, фотознімальна та телевізійна апаратура, ретранслятори, передавачі, приймачі, антенні системи і т. п. Крім того, принципово необхідним елементом будь-якої КІС є *телекомунікаційна система* (ТКС), яка забезпечує обмін інформацією між орбітальними та наземними засобами. Її основу становлять антенні системи, радіоприймальні та радіопередавальні пристрої.

Виходячи із розмаїття КІС та виконуваних ними завдань (спостереження, моніторинг, виявлення, розпізнавання, збір і передача даних, зйомка, зв'язок), для стислості, де це допустимо, використовуватимемо об'єднуючий термін “обслуговування” наземних об'єктів (НО).

У рамках даної статті для визначеності обмежимося класом космічних систем спостереження (КСС), цільова інформація яких має державне і міжнародне значення. Для КСС термін “обслуговування” НО означатиме, перш за все, збір інформації від заданих наземних районів і об'єктів спостереження та її передачу на наземні засоби.

Первинним джерелом інформації для будь-якої КСС служить електромагнітне випромінювання (ЕМВ), що утворюється або відбивається від НО в оптичному та/або в радіодіапазоні. Залежно від типу джерела інформації та способу її одержання розрізняють КСС: оптико-електронного (ОЕСп), радіолокаційного (РЛСп) спостереження, фотоспостереження (ФСп) та ін.

Специфічними елементами таких КСС є *орбітальні засоби*, які віддалені від наземних засобів, *розосереджені* у просторі і часі, здійснюють *безперервний рух*, мають *обмежений бортовий ресурс*, функціонують у *складних умовах* космічного простору.

КА є *носіями* бортової цифрової апаратури (БЦА) оптичного та/або радіодіапазону, основна функція якої – огляд заданих районів та/або об'єктів спостереження, збір ЕМВ з них, формування і передача на Землю цифрової інформації (ЦІ). Використання КА в цій ролі забезпечує глобальність і безперервність спостережень, охоплення великих територій, високу оперативність, невразливість засобів і т. п. У той же час, використання

КА ускладнює КСС, вимагає значних фінансових витрат на її створення і експлуатацію, а космічний простір як зовнішнє середовище потребує спеціальних заходів для забезпечення високої надійності, живучості і перешкодостійкості космічних засобів.

Крім БЦА на КА встановлюють *систему управління*, забезпечувальні та допоміжні системи, що зазвичай об'єднують у бортові комплекси: інформаційний, управління, енергетичний, забезпечувальний та ін. Подібні комплекси виділяють й у складі наземних засобів КСС. Взаємодія зазначених бортових і наземних комплексів між собою здійснюється через супутникову ТКС, елементи якої конструктивно можуть бути розосереджені у виділених комплексах.

У таких ТКС крім основного виду інформації – цільової циркулює *допоміжна інформація*, яка передається з КА на наземні засоби через *радіолінію* “борт – Земля”. Вона містить відомості щодо просторово-часового положення КА, їх технічного стану, режимів роботи, бортових ресурсів, а також забезпечує синхронізацію бортових і наземних засобів.

Крім того, на основі результатів обробки цієї інформації формується *командна інформація*, яка видається на КА через *радіолінію* “Земля – борт” у вигляді програм і команд *управління*. В остаточному підсумку потоки допоміжної і командної інформації мають забезпечити одержання ЦІ *заданого складу, обсягу та якості*.

Традиційно КСС використовуються здебільшого для виконання *планових завдань*, коли користувачі ЦІ завчасно подають заявки на спостереження певних районів Землі, а орган *управління* системою (ОУС) планує роботу орбітальних і наземних засобів, формує відповідну бортову програму *управління* (БПУ) та планомірно реалізує її в заданий час [4]. При цьому ОУС враховує передбачуване просторово-часове положення КА на моменти зйомки, але майже не може на нього впливати через об'єктивні закономірності орбітального руху. Іншими словами, ОУС при плануванні космічних спостережень вимушений значною мірою *приспосовуватись* до взаємного поточного розташування КА і

спостережуваних НО. А це призводить здебільшого до епізодичних, а не регулярних сеансів спостережень одного і того ж НО.

У сучасних і перспективних КС детальних спостережень цей недолік дещо компенсується за рахунок передбачених кутових маневрів КА [5, 6]. Але при цьому виникає потреба в плануванні раціональних маршрутів космічних спостережень [7, 8].

У той же час, як свідчить досвід останніх подій у світі, КСС може бути одним з основних джерел інформації для виконання *оперативних завдань* – завдань, що необхідно виконувати терміново або за обмежений час у будь-який час року та доби в інтересах оборони, безпеки, попередження техногенних катастроф, кризових та надзвичайних ситуацій [7, 9].

Наведений вище аналіз показує, що існує принципове *протиріччя* між *штатними можливостями* КСС і *нештатними потребами* замовників оперативних спостережень заданих НО.

У такому разі виникає *науково-прикладна проблема управління* процесом космічних спостережень для *оперативного отримання* ЦІ при обмежених бортових ресурсах.

У нинішніх умовах для України джерелами ЦІ можуть виступати як вітчизняні, так і зарубіжні, а також об'єднані (вітчизняні та зарубіжні) КСС. Створення таких “об'єднаних” (у значенні *комплексного використання інформації*) систем доцільне з огляду на обмежені фінансово-економічні та технічні можливості України [1, 2].

У цих умовах з огляду на вимогу *оперативності* проблема управління процесом космічних спостережень поділяється на декілька складових [9]:

- а) *ефективного управління* вітчизняними орбітальними засобами;
- б) *раціонального вибору* придатних зарубіжних КСС;
- в) *спільного використання* ЦІ від вітчизняних та зарубіжних КСС і т. п.

Для вирішення зазначених проблем пропонується такий підхід (рис. 1):

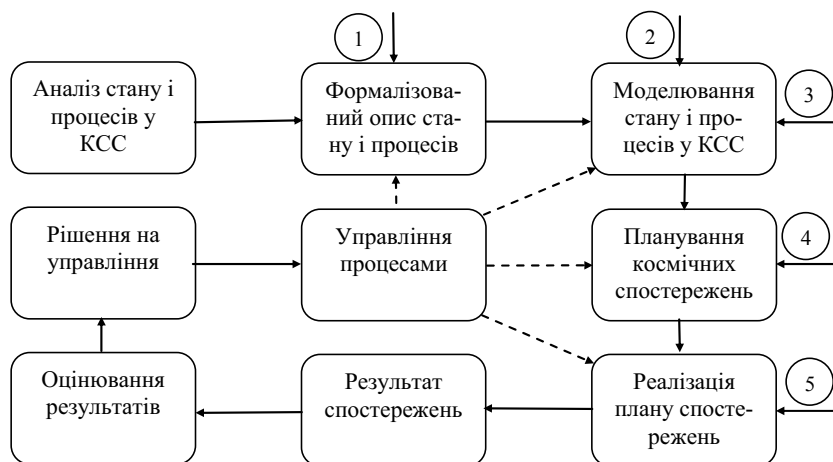


Рис. 1. Управління процесом космічних спостережень:

1 – науково-методичний апарат; 2 – програмне забезпечення; 3 – замовлення; 4 – обмеження; 5 – зовнішні та внутрішні фактори

1. Провести аналіз існуючої технології, стану теорії і практики управління процесами в КСС і на основі цього вибрати раціональні варіанти.

2. Розробити універсальний алфавіт для формалізованого опису стану орбітальних і наземних засобів КСС та процесів у них і на цій основі синтезувати ряд відповідних моделей з їх програмною реалізацією.

3. На основі замовлень користувачів ЦІ змодельовати процес космічних спостережень за заданими районами та/або об'єктами вітчизняними та зарубіжними КСС.

4. Використовуючи результати моделювання та враховуючи організаційні, технічні, фінансові та інші обмеження для конкретної ситуації, скласти план космічних спостережень.

5. Реалізувати розроблений план з урахуванням передбачуваних і непередбачуваних зовнішніх та внутрішніх факторів, оцінити якість отриманих результатів.

6. У разі необхідності прийняти та реалізувати необхідні рішення на управління засобами та процесами в них, включаючи корекцію формалізованого опису, синтезованих моделей та їх програмної реалізації, методичних основ планування та умов реалізації розроблених планів.

Метою статті є узагальнення та оприлюднення окремих результатів (методів, моделей, математичного апарату) авторських досліджень щодо проблеми управління процесом космічних спостережень при вирішенні оперативних завдань в умовах обмежених бортових ресурсів.

Питанням управління процесами в КС присвячено низку робіт останнього часу [10–12], але вони здебільшого розкривають тільки окремі складові процесу космічних спостережень. Так, у роботі [10] детально досліджується проблема управління тільки орбітальним рухом КА, включаючи етап виведення їх на орбіти. Стаття [11] присвячена вибору оптимальних варіантів маршрутів зйомки для КС ДЗЗ, а стаття [12] висвітлює проблему одного з видів управління в технічних системах – термінального. Таким чином, у зазначених джерелах та в ряді інших недостатньо досліджено складові процесу космічних спостережень та управління ним.

У контексті сказаного автором статті запропоновано ряд підходів до управління процесами в КСС при виконанні оперативних завдань.

Зокрема, як показав аналіз, при організації управління слід виходити із основної вимоги до КСС – оперативного отримання максимальних об'ємів корисної ЦІ потрібної якості у заданий час доби і року із заданих районів Землі при мінімальних витратах ресурсу і прийнятній вартості.

Виходячи з цього, доцільно перейти від традиційного *управління засобами* КСС до *управління процесами* в ній (процесний підхід [13, 14]). Це означає, що головна мета управління полягає не стільки в забезпеченні правильного функціонування орбітальних та наземних засобів при виконанні цільових завдань, скільки в отриманні ЦІ заданого складу та якості. З огляду на такий підхід можна допускати певні відхилення окремих параметрів технічних засобів КСС від заданих вимог, а

просторово-часового положення КА – від штатних параметрів орбіт і т.п.

У такому разі для *оперативного* виконання завдань можна [9]:

здіяяти не тільки свої, а й доступні іноземні КА;

перенацілювати КА на задані НО за рахунок кутових маневрів;

залучати ЦІ, отриману при нештатному функціонуванні засобів КСС;

використовувати архівну ЦІ, а також інформацію від інших засобів;

концентрувати власні КА за рахунок корекції орбіт і т. п.

Більше того, до поняття “управління процесом спостережень” доцільно віднести операції не тільки безпосереднього впливу на цей процес (моделювання, планування, формування БПУ та її реалізацію, а також контроль результатів), а й операції вибору, замовлення, придбання і т. п.

Таке розширене тлумачення процесу управління має суттєве значення з огляду на використання ЦІ від зарубіжних КСС, а також через необхідність парировання негативного впливу на якість ЦІ зовнішніх факторів.

Щодо формалізованого опису стану і процесів у КСС (див. рис. 1), то в авторських статтях [15–17] отримав подальший розвиток **метод формалізації процесів** у КСС як основа для подальшого моделювання. Він базується на теоретико-множинному підході з комплексним використанням аналітичних, логічних та логіко-аналітичних функцій та їх геометричної інтерпретації.

Для цього розроблено відповідний алфавіт, який містить як окремі позначення, так і логічні, аналітичні та логіко-аналітичні залежності, що відображають процеси замовлень, планування, спостереження, формування ЦІ та її передачі, управління засобами та процесами, стан орбітальних та наземних засобів, зовнішні та внутрішні умови їх функціонування, дії та рішення обслуговуючого персоналу, замовників і користувачів ЦІ.

В основу *формалізації* покладено математичний апарат теорії множин та комбінаторного аналізу, двозначної та багатозначної логіки. Просторово-часові явища в КСС формалізовані з використанням теорії польоту КА, а процес отримання ЦІ – на основі теорії інформації.

На базі формалізованого опису запропоновано ряд узагальнених моделей процесу отримання ЦІ. Приклад однієї із таких моделей показано на рис. 2. Як видно з рисунку, замовники, виходячи з передбачених інформаційних рішень, прогнозують власні потреби у цільовій інформації $\mathbf{J}^n = \{J_e^n\}$, $e = \overline{1, E}$ і з урахуванням інформаційних можливостей КСС $\mathbf{J}^m = \{J_{ж}^m\}$, $жс = \overline{1, Ж}$ формують відповідні заявки на спостереження тих або інших районів Землі $\mathbf{Z} = \{Z_{ю}^z\}$, $ю = \overline{1, Ю}$.

При цьому в одній заявці може бути декілька замовлень $\mathbf{Z} = \{Z_{\alpha}^z\}$, $\alpha = \overline{1, A}$ для спостереження декількох районів з декількох типів КА в декількох режимах роботи БЦА на декількох інтервалах часу і т. п. Отже, у загальному випадку таку заявку можна формально записати як окремі замовлення у вигляді *складеної* множини:

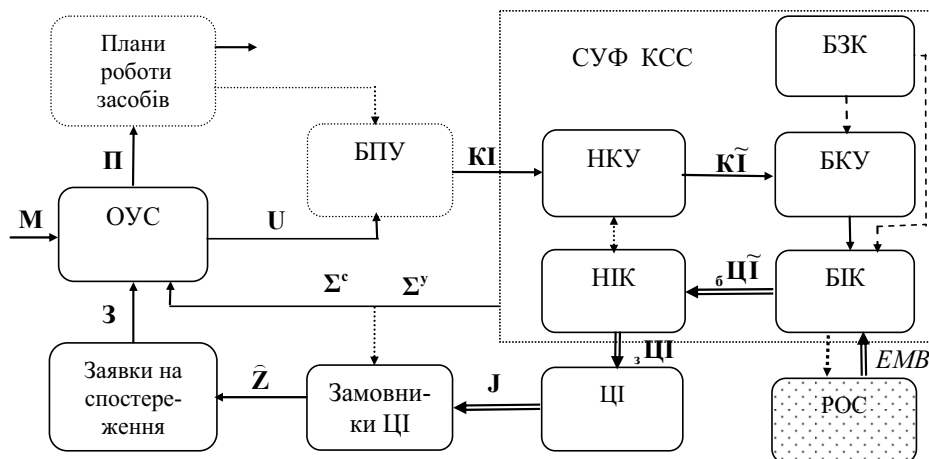


Рис. 2. Модель процесу отримання ЦІ в КСС:

М – методи; **З** – замовлення; **П** – плани; **U** – команди управління; **КІ** – командна інформація; **J** – ЦІ; Σ^c – множина станів КСС; Σ^y – множина умов функціонування КСС; НКУ – наземний комплекс управління; БЗК – бортовий забезпечувальний комплекс; БКУ – бортовий комплекс управління; НІК – наземний інформаційний комплекс; БІК – бортовий інформаційний комплекс; РОС – райони і об’єкти спостереження

$$\bar{Z}_o = \{ \{Z_o\}, \{Y_o^z\}, \{d_s\}, \{P_m\}, \{Y_m^p\}, \{K_c\}, \{B_z\}, \{U_i\}, \{\alpha_s\}, \{X_\beta\}, \{C_u^n\} \}, \quad (1)$$

де аргументами виступають підмножини: замовників $\{Z_o\}$ та їх пріоритетів $\{Y_o^z\}$; заданих дат спостережень $\{d_s\}$; замовлених районів $\{P_m\}$ та їх пріоритетів $\{Y_m^p\}$; типів або номерів КА $\{K_c\}$; типів БЦА $\{B_z\}$; режимів спостереження $\{U_i\}$; припустимих значень кута місця Сонця α_s ; рівнів хмарності над районом $\{X_\beta\}$; пререференційних пунктів прийому інформації (ППП) $\{C_u^n\}$.

На основі отриманих заявок ОУС формує множину оперативних планів $\Pi = \Pi_u \{Z_o\} \neq \emptyset$ застосування засобів КСС на множині витків орбіти $\mathbf{V} = \{B_n\}, n = \overline{1, N}$ та відповідну множину бортових БПУ $\mathbf{U} = \{U_\delta\}, \delta = \overline{1, \Delta}$. При цьому враховуються інформаційні можливості КСС $\mathbf{J}^m = \{J_{\chi c}^m\}, \chi c = \overline{1, \mathcal{K}}$, стан $\Sigma^c = \{\Sigma_\chi^c\}, \chi = \overline{1, X^c}$ та умови її функціонування $\Sigma^y = \{\Sigma_\chi^y\}, \chi = \overline{1, X^y}$.

Для формалізації процесів у каналі отримання ЦІ запропоновано процесний підхід з використанням базових символів з розгалуженою системою індексів. Прикладом такого підходу може бути алгоритм отримання ЦІ при використанні БЦА оптико-електронного типу:

$$EMB_o^* \rightarrow_{zc} EMB_o^* \rightarrow_o EMB_o^* \rightarrow_o^c CI_o^+ \rightarrow_o^u CI_o^+ \rightarrow_o^k CI_o^+ \rightarrow_o^k CI_o^+ \rightarrow_o^k CI_o^+, \quad (2)$$

де EMB_o^* , EMB_o^* – суміші корисного, марного і заважаючого ЕМВ оптичного і радіодіапазонів на Землі та в середовищі Ср1; EMB_o^* – корисне ЕМВ оптичного і/або радіодіапазону на борту КА; CI_o^+ , CI_o^+ , CI_o^+ – корисна ЦІ у вигляді аналогових, цифрових сигналів та інформаційних кадрів, сформована на борту КА із корисного ЕМВ; CI_o^+ – корисна ЦІ у вигляді цифрових радіосигналів, переданих інформаційними кадрами з борту КА в середовище Ср2.

Для формалізованого опису умов отримання ЦІ запропоновано систему логічних функцій (ЛФ). Наприклад, нехай необхідно формально описати процес

отримання ЦІ при спостереженні засобами ОЕСп за m -м районом на n -му витку орбіти. Введемо ЛФ стану засобів і умов їх функціонування, а саме: орбітальних засобів КСС $\Phi_m^n(O)$, оптичної видимості районів з КА $\Phi_m^n(F^o)$, радіовидимості наземних засобів з КА $\Phi_m^n(F^f)$, астрономічних і балістичних умов $\Phi_m^n(A)$ і стану наземних засобів $\Phi_m^n(H)$. Тоді об’єктивні відносно ОУС умови отримання ЦІ можна задати двозначною ЛФ:

$$\Phi_m^n(\Sigma) = \begin{cases} 1, & \text{if } \Phi(O) \wedge \Phi(F^o) \wedge \Phi(A) \wedge \Phi(F^f) \wedge \Phi(H) = 1; \\ 0, & \text{if } \Phi(O) \wedge \Phi(F^o) \wedge \Phi(A) \wedge \Phi(F^f) \wedge \Phi(H) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Якщо $\Phi_m^n(\Sigma) = 1$, то стан і умови функціонування (СУФ) сприятливі і КСС може виконати цільове завдання в повному обсязі та з необхідною якістю. У протилежному випадку, коли $\Phi_m^n(\Sigma) = 0$, вважається, що через об’єктивні причини КСС не може виконати завдання на заданому рівні вимог до ЦІ.

Аналогічним способом описуються й інші складові у виразі (3). Використання ЛФ для опису процесів і явищ забезпечує перехід від шкали абсолютних значень величин до шкали їх нормованих безрозмірних значень. Ця властивість ЛФ виявляється зручною у завданнях порівняльного аналізу, оптимізації, прийняття технічних, управлінських та організаційних рішень.

В авторських статтях [18–20] отримав подальший розвиток метод прогнозування контрольованості заданих НО космічними засобами, який відрізняється від відомих комплексним урахуванням параметрів орбітального руху КА, несферичності Землі, технічних характеристик БЦА при розрахунках параметрів землегляду та оригінальною функцією видимості заданих НО.

При цьому врахована особливість обслуговування НО космічними засобами, коли об’єктивно існують інтервали чекання заданих моментів часу, обумовлені специфікою орбітального руху КА відносно обертової Землі. У такому разі смуга огляду БЦА некеровано

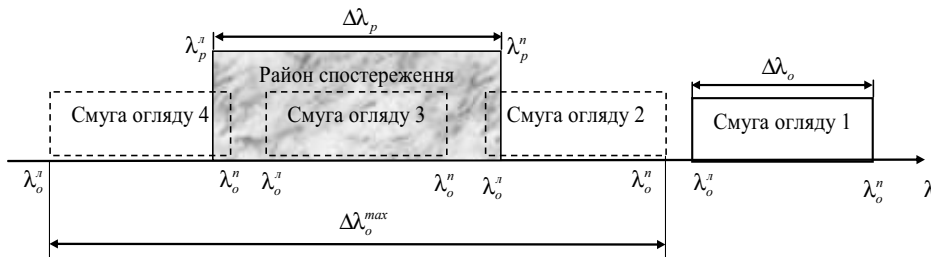


Рис. 3. Накриття району смугою огляду КА

послідовно переміщається на земній поверхні, досягаючи вибірково тих або інших НО.

З огляду на це виникає *актуальне завдання* щодо прогнозування контрольованості заданих НО з метою раціонального планування їх оперативного обслуговування.

У роботі [20] запропоновано задавати *умови контрольованості* будь-якого району спостереження *функцією видимості* цього району з КА на *n*-му витку орбіти (рис. 3)

$$\Phi_p(n) = \begin{cases} 1, & \text{if } (\lambda_o^a \leq \lambda_p^a) \wedge (\lambda_o^n \geq \lambda_p^n) = 1; \\ 0, & \text{if } (\lambda_o^a \leq \lambda_p^a) \wedge (\lambda_o^n \geq \lambda_p^n) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де λ_o^a та λ_o^n – географічна довгота лівої і правої меж відносно візирної осі смуги огляду; λ_p^a і λ_p^n – географічна довгота лівої і правої меж відносно візирної осі району.

При цьому район контролюється в разі $\Phi_p(n) = 1$ та не контролюється, якщо $\Phi_p(n) = 0$. Коли необхідно визначити не тільки факт, але й ступінь контрольованості заданого району, то можна скористатись одновимірним коефіцієнтом “накриття” цього району смугою огляду КА.

Наприклад, для ситуації, зображеної на рис. 3, цей коефіцієнт можна знайти як відношення географічної ширини контрольованої частини району до його повної географічної ширини, що доцільно подати логіко-аналітичною функцією (ЛДФ)

$$K_n = \begin{cases} (\lambda_p^n - \lambda_o^a) / \Delta\lambda_p, & \text{if } [(\lambda_o^a \leq \lambda_p^a) \wedge (\lambda_o^n \geq \lambda_p^n)] = 1; \\ \Delta\lambda_o / \Delta\lambda_p, & \text{if } [(\lambda_o^a \geq \lambda_p^a) \wedge (\lambda_o^n \leq \lambda_p^n)] = 1; \\ (\lambda_p^a - \lambda_o^n) / \Delta\lambda_p, & \text{if } [(\lambda_o^a \leq \lambda_p^a) \wedge (\lambda_o^n \geq \lambda_p^n)] = 1; \\ 0, & \text{if } [(\lambda_o^a > \lambda_p^a) \vee (\lambda_o^n < \lambda_p^n)] = 1. \end{cases} \quad (5)$$

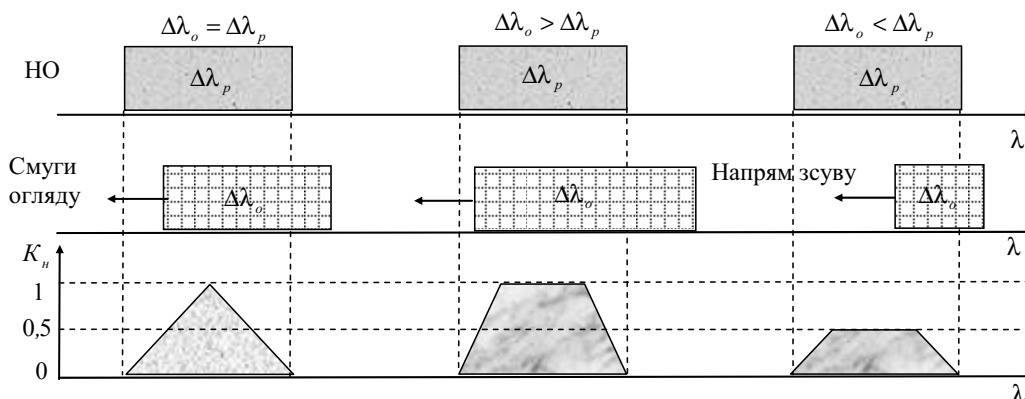


Рис. 4. Одновимірний коефіцієнт накриття

Геометричну інтерпретацію коефіцієнта (5) для різних співвідношень між розмірами контрольованих районів та смуг огляду зображено на рис. 4.

Запропонований коефіцієнт (5) має одновимірний (на відміну від двовимірного або площинного) характер. Він може стати зручним при вирішенні задач вибору релевантних КА за критерієм максимального накриття заданого району та планування оперативного застосування таких КА.

Для управління процесом *детальних космічних спостережень* автором розроблено *аналітичну модель* обслуговування НО [21–25], яка враховує параметри орбіт КА, технічні характеристики БЦА та форму її зони огляду (конічна, пірамідальна), відвороти візирної осі БЦА від надира за креном та/або тангажем, а також різні моделі форми Землі (плоска, сферична, еліпсоїдальна).

Наприклад, розглянемо одну із найскладніших ситуацій Ξ_{122} (конус, відворот за креном, сферична поверхня Землі). Нехай зона огляду КА становить собою *прямий коловий конус* з кутом при вершині 2χ , візирна вісь БЦА збігається з висотою цього конуса. За рахунок кутового маневру КА за *креном* його зона огляду і візирна вісь БЦА *відхилені* від надира на кут η . КА знаходиться на висоті H . У цьому випадку проекція конічної зони огляду на поверхні *сферичної* Землі трансформується в деяку поверхню другого порядку яйцеподібної форми “*сферичний деформований еліпс*” (СДЕ), осями якого є *дуги* земної кулі.

У статті [25] отримано формулу для розрахунків великої осі СДЕ, яка одночасно є *шириною смуги огляду* КА, у вигляді

$$L_a = R_3 \left\{ \pi - 2\chi - \arccos \left[\frac{R_3 + H}{R_3} \sin(\chi - \eta) \right] - \arccos \left[\frac{R_3 + H}{R_3} \sin(\chi + \eta) \right] \right\}, \quad (6)$$

де $R_3 = 6371$ км – середній радіус Землі.

За малу вісь СДЕ пропонується взяти дугу

$$L_b \approx 2R_3 \left[0,5\pi - \chi - \arccos \left(\frac{R_3 + H_\eta}{R_3} \sin \chi \right) \right], \quad (7)$$

де $H_\eta = KA_2 = H/\cos \eta$ – спотворена за рахунок крену “висота” КА.

Використовуючи отримані результати, можна орієнтовно обчислювати площу проекції зони огляду КА з урахуванням вирізів (6) і (7) як

$$S_{122} \approx 0,5\pi L_a L_b. \quad (8)$$

Площу знятої сцени з колових або майже колових орбіт за час спостереження Δt_{cn} можна розрахувати як

$$S_{cn} \approx S_{122} + \frac{L_a R_3 \sqrt{\mu_0 / (R_3 + H)}}{R_3 + H} \Delta t_{cn}, \quad (9)$$

де $\mu_0 = 3,986 \cdot 10^5$ км³/с² – гравітаційний параметр Землі.

При відворотах поля зору КА від надирі за креном на кут η одержимо смугу захоплення з лінійними розмірами (шириною) на поверхні Землі:

$$L_{xxx} \approx L_a + 2L_\eta, \quad (10)$$

де $L_\eta \approx H \operatorname{tg} \eta$ – лінійна відстань між трасами КА і візирною віссю БЦА.

Авторські роботи [5–7] присвячені синтезу логіко-аналітичної моделі кутового руху КА, яка дозволяє проводити якісний аналіз та кількісно оцінювати вплив параметрів кутового руху на об’єми та якість ЦІ. Крім того, така модель забезпечує формування раціональних маршрутів обслуговування заданих НО. В основу моделі покладено формалізований опис процесів отримання цільової інформації в КСС та управління кутовим рухом у режимах програмних розворотів КА та його прецизійної орієнтації і стабілізації.

При цьому зазначені етапи кутового руху КА описані логічною функцією, яка містить: кути v^{np} програмних розворотів КА і похибки їх відпрацювання Δv^{np} ; час t^{np} програмного перенацілювання КА; похибки прецизійної орієнтації Δv і стабілізації $\Delta \dot{v} = \dot{v}$ КА; час заспокоювання КА t^y після перенацілювання.

Наприклад, логічна функція якості кутового руху КА по одному з каналів системи орієнтації і стабілізації (СОС) з використанням багатозначної логіки має вигляд

$$\Phi(\Psi) = \begin{cases} 1, & \text{if } \Phi(v^{np}) \wedge \Phi(\Delta v^{np}) \wedge \Phi(t^{np}) \wedge \Phi(\Delta v) \wedge \Phi(\dot{v}) \wedge \Phi(t^y) = 1; \\ \Phi(\zeta)_{min}, & \text{if } 0 < \bigcap \Phi(\zeta) < 1, \quad \zeta = \{v^{np}, \Delta v^{np}, t^{np}, \Delta v, \dot{v}, t^y\}; \\ 0, & \text{if } \Phi(v^{np}) \wedge \Phi(\Delta v^{np}) \wedge \Phi(t^{np}) \wedge \Phi(\Delta v) \wedge \Phi(\dot{v}) \wedge \Phi(t^y) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Вираз (11) має досить зрозумілий фізичний зміст, оскільки поєднує всі вимоги до самої СОС і законів управління кутовим рухом КА при веденні детального спостереження. За необхідності кожному зі співмножників виразу (11) можна присвоїти ваговий коефіцієнт. Аргументи формули (11) являють собою ЛАФ, що мають таке значення:

ЛАФ потенційних можливостей кутових маневрів $\Phi(v^{np})$ свідчить про технічні можливості СОС забезпечувати переорієнтацію поля зору КА в межах заданих кутів v^{np} . Вона може бути задана аналітичним виразом вигляду (рис. 5, а)

$$\Phi(v^{np}) = \begin{cases} 1, & \text{if } |v^{np}_{max}| = v^{np}_3; \\ |v^{np}_{max}| / v^{np}_3 & \text{if } 0 < |v^{np}_{max}| < v^{np}_3; v^{np}_3 \geq 0; \\ 0, & \text{if } v^{np}_{max} = 0; \end{cases} \quad (12)$$

ЛАФ точності програмних розворотів $\Phi(\Delta v^{np})$ характеризує діапазон кутів і абсолютні похибки їх відпрацювання СОС. Якщо прийняти лінійну модель зниження якості ЦІ від величини цих похибок, то дана функція має вигляд, показаний на рис. 5, б, і описується аналітичним виразом

$$\Phi(\Delta v^{np}) = \begin{cases} 1, & \text{if } |\Delta v^{np}| = |v^{np} - v^3| = 0; \\ 1 - |v^{np} - v^3| / \Delta v^{np}_0 & \text{if } 0 < |\Delta v^{np}| \leq \Delta v^{np}_0; \Delta v^{np}_0 \geq 0; \\ 0, & \text{if } |\Delta v^{np}| = |v^{np} - v^3| > \Delta v^{np}_0; \end{cases} \quad (4)$$

ЛАФ часу програмних розворотів КА $\Phi(t^{np})$ характеризує швидкодію СОС. Її можна задати аналітичним виразом вигляду (рис. 5, в):

$$\Phi(t^{np}) = \begin{cases} 1, & \text{if } t^{np} = 0; \\ 1 - t^{np} / t^{np}_0 & \text{if } 0 < t^{np} \leq t^{np}_0; t^{np}_0 \geq 0; \\ 0, & \text{if } t^{np} > t^{np}_0. \end{cases} \quad (5)$$

З огляду на задачі керування рухом КА в цілому і кутовим зокрема об’єктивно існує ряд майже незалежних процесів, а задача ОУС здебільшого полягає в «пристосуванні» їх для визначених цілей. У цих умовах виникає потреба в організації такого маршруту (траси) візирної осі БЦА, щоб найкращим чином задовольнити максимум заявок споживачів ЦІ. Для вирішення такої задачі в роботі [8] синтезовано геометричні моделі наведення

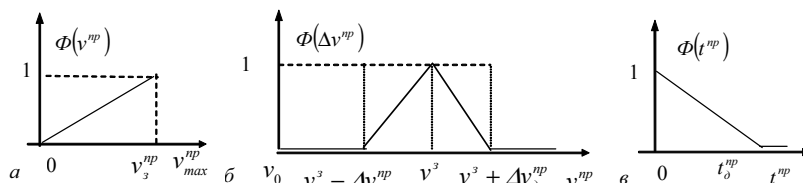


Рис. 5. Функції, що описують процеси переорієнтації КА

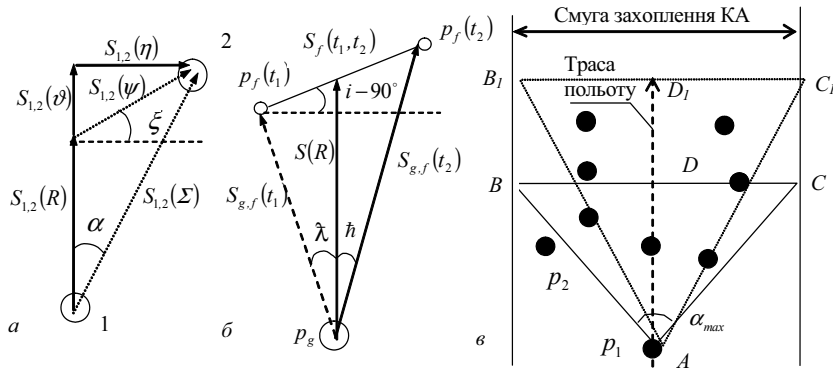


Рис. 6. До питання формування раціональних маршрутів

поля зору КА на задані НО з урахуванням обертання Землі (рис. 6).

На рис. 6, а показано випадок, коли необхідно перенацілитись з об'єкта 1 на об'єкт 2. При цьому результуючий вектор переміщення візирної осі виражений через вектори орбітального $\bar{S}_{1,2}(R)$ і кутового $\bar{S}_{1,2}(\eta)$ переміщення як сума векторів:

$$\bar{S}_{1,2}(\Sigma) = \bar{S}_{1,2}(R) + \bar{S}_{1,2}(\eta). \quad (6)$$

Особливістю вектора орбітального переміщення $\bar{S}_{1,2}(R)$ є те, що в даному випадку він *некерований*. Його модуль для колової орбіти з висотою H_0 визначається лінійною швидкістю КА V_0 та інтервалом часу орбітального польоту $\tau_{1,2}^R$.

Складова вектора (6) $\bar{S}_{1,2}(\eta)$ керована, вона визначається часом кутового маневру $\tau_{1,2}^\eta$, кутовою швидкістю КА $\dot{\eta}$ та висотою орбіти H_0 , причому керованими можуть бути перші два параметри.

Модуль результуючого вектора (6), а також кут його орієнтації відносно траси польоту КА (*трасовий кут*) α , що спільно визначають стратегію перенацілювання візирної осі БЦА з об'єкта 1 на об'єкт 2, запишуться так:

$$S_{1,2}(\Sigma) = \sqrt{S_{1,2}^2(R) + S_{1,2}^2(\eta)}; \quad (7)$$

$$\alpha_{1,2} = \arctg [S_{1,2}(\eta) / S_{1,2}(R)]. \quad (8)$$

Із залежностей (7) і (8) випливає, що для колових орбіт успішність процедури перенацілювання поля зору КА з одного НО на інший залежить від взаємного розташування цих об'єктів і їх розташування відносно траси, а також від технічних можливостей СОС. Кутовий рух НО в полі зору БЦА та орбітальний рух КА створюють складну картину взаємних переміщень, тому виникає принципова необхідність *керування кутовим рухом* КА.

На підставі отриманих результатів синтезовано *комплексну модель*, яка враховує орбітальний рух КА, нахилення орбіти, переміщення об'єктів за рахунок обертання Землі і поля зору БЦА за рахунок керування кутовим рухом КА. Результуючу картину прояву цих процесів показано на рис. 6, б.

Модуль переміщення поля зору БЦА з об'єкта p_g на об'єкт p_f , що розташований на широті ϕ , за рахунок

обертання Землі за час орбітального польоту КА $\tau_{1,2}^R = t_2 - t_1$ до об'єкта p_f визначається як (див. рис. 6, б)

$$S_f(t_1, t_2) = V_o (t_2 - t_1) \cos \phi \sin i. \quad (9)$$

Тоді у законі керування кутовим рухом КА необхідно враховувати результуючий вектор

$$\bar{S}_{g,f}(t_2) = \bar{S}_{g,f}(t_1) + \bar{S}_f(t_1, t_2). \quad (10)$$

На основі отриманих результатів сформовано концепцію раціонального обслуговування НО, розташованих у *смугі захоплення КА* (рис. 6, в), згідно з якою доцільно віддавати перевагу тим об'єктам, що мають більш високий пріоритет і розташовані ближче до траси польоту КА.

Для *розбиття множини* заданих НО на об'єктивно придатні (ОПО) і об'єктивно непридатні (ОНО) доцільно скористатися *миттєвою зоною обслуговування* (МЗО), що являє собою частину зони захоплення у формі трикутника ABC (рис. 6, в), який переростає далі в прямокутник з нескінченно віддаленою стороною $B'C'$. Така зона рухається на плоскій поверхні Землі трасою візирної осі БЦА зі швидкістю підсупутникової точки (ПТ). НО, що потрапили до МЗО, віднесемо до ОПО об'єктів, інші об'єкти (наприклад, НО p_2 на рис. 6, в) – до категорії ОНО.

Для автоматизації розрахунків розроблено аналітичну модель МЗО, в основу якої покладено такий підхід:

1. За формулою (8) розрахується кут α_{max} за умови $\eta = \eta_{max}$. При цьому кут α_{max} визначається співвідношенням лінійних швидкостей за креном $\dot{\eta}$ і по орбіті V_o , тобто динамікою руху візирної осі БЦА:

$$\alpha_{max} = \arctg [H_o \dot{\eta} / V_o]. \quad (11)$$

2. Через задані кутові положення окремих НО p_g і p_f необхідно розрахувати відповідні *трасові кути* $\alpha_{g,f}$ за формулою

$$\alpha_{g,f} = \arctg [S_{g,f}(\eta) / S_{g,f}(R)] = \arctg [\alpha_{max} \tau_{g,f}^\eta / \tau_{g,f}^R]. \quad (12)$$

3. Порівнюючи трасові кути окремих НО (12) з максимальним кутом (11), можна відносити відповідні об'єкти до ОПО або ОНО за правилом

$$\mathfrak{R}_f = \begin{cases} p^+, \text{ if } |\alpha_{g,f}| < \alpha_{max}; \\ p^0, \text{ if } |\alpha_{g,f}| = \alpha_{max}; \\ p^-, \text{ if } |\alpha_{g,f}| > \alpha_{max}, \end{cases} \quad (13)$$

де p^0 – підмножина об'єктів, розташованих на межі розділу (на лініях AB і AC на рис. 6, в).

З метою формування множини *припустимих маршрутів* обслуговування ОПО об'єктів, з огляду на введені обмеження і «проріджування» множини заданих об'єктів за правилом (13), можна скористатися методом прямого перебору.

Для вибору з отриманої множини раціональних маршрутів введено кілька значущих критеріїв вибору та на їх основі проведено багатокритеріальну оптимізацію ухвалення рішення, для чого використовується нелінійна схема компромісів вигляду

$$Y(\lambda, K) = \sum_{i=1}^l \lambda_i [1 - K_i(\mathfrak{R}_\mu)]^{-1}; \quad \lambda_i \geq 0; \quad \sum_{i=1}^l \lambda_i = 1, \quad (14)$$

де $\lambda_i = \text{const}$ – компоненти вектора важливості A критеріїв оптимізації; $K_i(\mathfrak{R}_\mu)$ – нормовані критерії оптимізації маршрутів.

Виходячи із запропонованої концепції раціонального обслуговування об'єктів, як критерії оптимізації маршрутів обрано:

а) сумарний пріоритет НО на μ -му маршруті $\Sigma \gamma_f(\mu) = \sum \gamma_f(\mu)$. Кращими будуть ті маршрути, на яких забезпечується $\Sigma \gamma_f(\mu) \rightarrow \max$ або відповідний нормований критерій $K_\gamma(\mu) \rightarrow 1$.

б) суму трасових кутів на даному маршруті $\Sigma \alpha(\mu) = \sum_{f=g}^m |\alpha_{g,f}(\mu)|$.

Цей критерій характеризує ступінь відхилення траєкторії візирної осі БЦА на даному маршруті від траси польоту КА. Менші значення такого показника свідчать про менші енерговитрати на перенацілювання КА і про кращу якість ЦП. Тому бажано вибирати ті маршрути, де $\Sigma |\alpha(\mu)| \rightarrow \min$ або відповідний критерій $K_\alpha \rightarrow 0$.

Формула згортки для практичного використання з цими критеріями має вигляд

$$(\mu) = \frac{\lambda_\gamma}{K_\gamma(\mu)} + \frac{\lambda_\alpha}{K_\alpha(\mu)} + \frac{\lambda_\alpha}{1 - K_\alpha(\mu)} + \frac{\lambda_l}{1 - K_l(\mu)}, \quad \sum_{i=1}^4 \lambda_i = 1, \quad i = \gamma, \alpha, q, l. \quad (15)$$

Для зручності порівняння і вибору кращих рішень доцільно використовувати нормовані значення згортки вигляду

$$\hat{Y}(\mu) = \hat{Y}(\mu) / Y_{max}, \quad 0 \leq \hat{Y}(\mu) \leq 1, \quad Y_{max} = \max Y(\mu). \quad (16)$$

Критерієм вибору раціонального маршруту обслуговування заданих НО служить мінімум нормованої згортки (16), а алгоритм вибору таких маршрутів можна формально подати як

$$\hat{\mathfrak{R}}_\mu^p(f) = \underset{\mu=1, M}{\text{opt}} \hat{Y}_f(\mu) = \underset{\mu=1, M}{\text{arg min}} \hat{Y}_f(\mu). \quad (17)$$

Висновки:

1. В умовах широкого використання космічної інформації щодо явищ, подій і процесів на Землі та стану наземних об'єктів існує проблема ефективного управління процесом космічних спостережень для оперативного отримання цієї інформації заданих обсягу, складу та якості.

2. Наведені в статті результати авторських досліджень певною мірою сприяють вирішенню зазначеної проблеми, зокрема, при організації детальних спостережень в умовах обмежених бортових ресурсів. Ці результати здебільшого орієнтовані на застосування в задачах моделювання процесів у КСС як передумови планування спостережень та управління ними.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2013–2017 роки : затверджена Законом України від 5 вересня 2013 року № 439-VII. URL: <http://zakon1.rada.gov.ua>.
2. Концепція реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року : схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 березня 2011 р. № 238-р. URL: <http://zakon1.rada.gov.ua>.
3. Фриз П. В. Методика розрахунків функцій видимості космічних апаратів з наземних пунктів // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІРЕ, 2003. Вип. 6. С. 53–60.
4. Фриз П. В., Фриз С. П. Можливий підхід до вибору показників ефективності планування роботи засобів космічних систем // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІРЕ, 2004. Вип. 7. С. 24–34.
5. Фриз П. В., Андреев О. В., Фриз В. П. Технологія раціонального моделювання кутового руху космічних апаратів у задачах спостереження Землі // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІРЕ, 2006. Вип. 10. С. 70–79.
6. Фриз П. В., Гуменюк М. О., Фриз В. П. Особливості моделювання кутового руху космічних апаратів видової розвідки // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІРЕ, 2007. Вип. 12. С. 95–103.
7. Фриз П. В. Моделювання процесів перенацілювання поля зору космічних апаратів у завданнях оптико-електронного спостереження Землі // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ НАУ, 2013. Вип. 8. С. 26–37.
8. Фриз П. В. Можливий підхід до формування раціональних маршрутів обслуговування наземних

- об'єктів у задачах космічних спостережень // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ НАУ, 2015. Вип. 11. С. 96–105.
9. Фриз П. В., Кондратов О. М. Алгоритм автоматизованого вибору релевантних космічних апаратів для оптико-електронного спостереження заданих районів Землі // Вісник ЖДТУ : технічні науки. Житомир, 2012. Вип. 2 (61). С. 138–146.
 10. Соловьев В. А., Лысенко Л. Н., Любинский В. Е. Управление космическими полетами : учеб. пособие в 2-х частях / под общей ред. Л. Н. Лысенко. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. Ч. I. 476 с. ; Ч. II. 426 с.
 11. Ковтун В. С., Строченкин А. В., Фролов В. Н. Выбор оптимальных вариантов маршрутов съёмки для космических систем дистанционного зондирования Земли // Космическая техника и технологии. М. : РКК “Энергия”, 2014. № 3 (6). С. 57–63.
 12. Lehenkyi V. Point symmetries of controlled systems and their applications // J. Nonlin. Math. Phys. 1997. N 1–2. P. 168–172.
 13. Ефимов В. В., Самсонова М. В. Управление процессами : учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2008. 222 с.
 14. Solozhentsev E. D. Risk management technologies with logic and probabilistic models // Springer. 2012. 328 p.
 15. Фриз П. В., Мироненко В. М., Фриз С. П. Возможный подход до формалізації процесів у космічних системах спостереження // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІРЕ, 2006. Вип. 10. С. 53–62.
 16. Фриз П. В. Возможный подход до формалізованого опису специфічних орбіт космічних апаратів у задачах спостереження Землі // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ НАУ, 2011. Вип. 5. С. 147–157.
 17. Фриз П. В. Теоретико-множинний підхід до опису просторово-часового положення космічних апаратів в задачах спостереження Землі // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України : наук.-техн. журнал. Х. : ХУПС, 2013. № 1 (10). С. 205–208.
 18. Фриз П. В., Петрожалко В. В., Фриз С. П. Високоточний алгоритм розрахунку очікуваного коефіцієнта накриття заданого району розвідки смугою огляду космічних апаратів // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІРЕ, 2005. Вип. 9. С. 229–238.
 19. Фриз П. В. Методика оцінювання освітленості контрольованих районів Землі в задачах космічних спостережень // Вісник ЖДТУ: технічні науки. Житомир. 2013. Вип. 1 (64). С. 118–127.
 20. Фриз П. В. Математичний апарат для оцінювання спостережуваності заданих районів Землі в задачах дистанційного зондування із космосу // Озброєння та військова техніка : наук.-техн. журнал. К. : ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2015. Вип. 1. С. 64–69.
 21. Фриз П. В. Систематизований математичний апарат для розрахунків розмірів контрольованих ділянок земної поверхні при космічних спостереженнях конічною зоною огляду в надир // Вісник ЖДТУ : технічні науки. Житомир. 2012. Вип. 4 (63). С. 118–127.
 22. Фриз П. В. Удосконалений математичний апарат для розрахунків розмірів контрольованих ділянок земної поверхні при космічних спостереженнях пірамідальною зоною огляду // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ НАУ, 2012. Вип. 6. С. 113–127.
 23. Фриз П. В. Методика розрахунків параметрів землеогляду в задачах космічних спостережень конічною зоною огляду поза надиром // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ НАУ, 2014. Вип. 9. С. 193–205.
 24. Фриз П. В. Методика розрахунків ширини та географічного положення смуги огляду у завданнях детальних космічних спостережень у надир // Вісник ЖДТУ : технічні науки. Житомир. 2014. Вип. 3 (70). С. 82–88.
 25. Фриз П. В. Уточнений математичний апарат для розрахунків параметрів землеогляду сферичної поверхні в задачах космічних спостережень конічною зоною огляду поза надиром // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ НАУ, 2015. Вип. 10. С. 74–86.
- Рецензент А. С. Довгополий**, д-р техн. наук, проф.
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)