

СПОСІБ ВИБОРУ ДОСТУПНИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ЗА УМОВАМИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ВИДИМОСТІ МІЖ НИМИ ТА ЗАДАНИМ РАЙОНОМ ЗЕМЛІ

В умовах бойових дій на сході України особливої актуальності набуває проблема забезпечення військового керівництва інформацією космічного знімання. З огляду на відсутність вітчизняних засобів для вирішення цих завдань, можливим практичним шляхом отримання інформації космічного знімання є її замовлення та придбання в закордонних операторів. Слід зауважити, що ринок цих послуг достатньо розвинутий, тому постає проблема коректного формування замовлень на знімання.

У статті запропоновано оригінальний спосіб вибору доступних іноземних космічних апаратів дистанційного зондування Землі для використання їх цільової інформації в інтересах Збройних Сил України. Він базується на завчасних розрахунках очікуваних коефіцієнтів часового та просторового накриття заданих районів Землі зоною огляду визначених космічних апаратів, порівнянні їх з вимогами замовників цільової інформації та виборі на цій основі найбільш придатних варіантів.

Формалізовано умови видимості заданого району Землі визначеним космічним апаратом у задану календарну дату. При цьому використано апарат логічних функцій геометричної видимості. Крім того, запропоновано математичний апарат для розрахунку площі заданого району знімання в разі її опису багатокутником довільної форми з урахуванням ексцесу цього сферичного багатокутника. Розроблено математичну модель визначення миттєвої площі знімання на сферичній Землі пірамідальною зоною огляду космічного апарата за відхилень візирної осі бортової цільової апаратури за креном.

Запропоновано напрямки подальших досліджень, зокрема визначення фізичних умов спостереження заданих районів знімання.

Ключові слова: доступні космічні апарати; оптико-електронні спостереження; проекція поля зору; часовий та просторовий коефіцієнти накриття; заданий район Землі; знята сцена; бортова знімальна апаратура.

Постановка проблеми в загальному вигляді. На нинішньому етапі гостро стоїть проблема всебічного інформаційно-розвідувального забезпечення діяльності Збройних Сил (ЗС) в умовах бойових дій на сході України [1]. При цьому одним із важливих джерел розвідувальної інформації для ЗС є космічні засоби. У нашій державі на сьогодні добре розвинута лише їх наземна інфраструктура, а орбітальні засоби відсутні. Тому відповідно до керівних документів [2, 3] для національних потреб у космічній інформації акцент робиться на використанні цільової інформації (ЦІ) від доступних іноземних космічних апаратів (КА) спостереження, зокрема КА дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Але оскільки ринок космічних інформаційних послуг достатньо об'ємний, то постає проблема раціонального вибору закордонних космічних систем, найбільш придатних для задоволення тих чи інших потреб вітчизняних замовників, у тому числі й ЗС України, з подальшим плануванням їх цільового застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання планування космічних спостережень останнім часом у тій чи іншій мірі розглядалося низкою закордонних [4–8] та вітчизняних авторів [9–11]. Але в цих публікаціях досліджуються здебільшого власні орбітальні групування, коли не стоїть проблема вибору придатних КА з-поміж доступних іноземних. Так, статті [4–7] стосуються розподілу завдань між власними супутниками на основі механізму об'єднання завдань [4], стратегії руху горизонту [5], динамічного планування в режимі реального часу [6], мультиагентного гібридного навчання [7], а в роботі [8] досліджується процес планування тільки передачі ЦІ на власні наземні засоби.

Статті вітчизняних авторів присвячені раціональному плануванню космічного знімання Землі на основі багатокритерійної оптимізації [9], плануванню роботи бортових систем КА з метою використання координатних методів [10], оптимізації обслуговування заявок на отримання ЦІ з КА ДЗЗ [11]. Але в жодній із цитованих публікацій не розглядається процес вибору КА як передмова для планування їх застосування.

В авторських статтях [12–14] наведено здебільшого оригінальний математичний апарат розрахунків параметрів землегляду, який використовується далі, але вони не розкривають критеріїв прийняття відповідних рішень.

Найбільш повно проблему вибору КА розкрито в роботі [15], у якій запропоновано алгоритм автоматизованого вибору релевантних (придатних за багатьма показниками) КА для оптико-електронного спостереження (ОЕСп) Землі, але в ній не вистачає математичного апарату для розрахунків умов геометричної видимості між КА і заданим районом та правил прийняття раціональних рішень.

Тому **мета статті** полягає в розробці способу вибору доступних іноземних КА ДЗЗ за умовами геометричної видимості між ними та заданим районом Землі (РЗ) для планування їх цільового застосування в інтересах інформаційного забезпечення діяльності ЗС України.

Виклад основного матеріалу. Нехай в орбітальному польоті знаходиться множина доступних КА $\{K_\mu\}$, $\mu = \overline{1, M}$, $M \geq 1$, ОЕСп Землі. Відома множина районів на земній поверхні $\{P_m\}$, $m = \overline{1, M}$, $M \geq 1$, яка підлягає космічному моніторингу. У замовників цільової інформації є необхідність отримати якісні космічні знімки з m -го РЗ у певний час доби й року.

Відомо, що для організації космічних ОЕСп необхідно забезпечити *геометричну видимість* між КА і заданим РЗ m , коли на прямій лінії між ними відсутні інші об'єкти, наприклад, частина земної поверхні. А це означає, що потрібно забезпечити повне або часткове геометричне накриття m -го РЗ *смугою огляду* бортової знімальної апаратури (БЗА). При цьому необхідними ознаками накриття можуть бути такі часткові події:

- а) перетин *центра* m -го РЗ *трасою* КА;
- б) перетин *центра* m -го РЗ *трасою візирної осі* БЗА;
- в) перетин *меж* m -го РЗ *трасою* КА;
- г) перетин *меж* m -го РЗ *трасою візирної осі* БЗА;
- д) повне або часткове *накриття* m -го РЗ *смугою огляду* БЗА;
- е) повне або часткове *накриття* m -го РЗ *смугою захоплення* КА тощо.

Такий самий підхід можна застосовувати для планування моментів спостережень за заданими об'єктами в межах заданого району.

Множину можливих ситуацій у ході планування космічних спостережень за заданим РЗ із використанням БЗА оптико-електронного типу наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Можливі ситуації в ході планування ОЕСп за заданим РЗ

Параметри РЗ	Атрибути землеогляду КА			
	Траса КА	Траса візирної осі	Смуга огляду	Смуга захоплення
Центр району	0	0	+	++
Заданий об'єкт	0	0	+	++
Межі району	+	+	++	+++
Задана ділянка	+	+	++	+++
Весь район	++	++	+++	++++

Примітка. У табл. 1 цифра 0 означає дуже малу ймовірність події (близьку до нуля), знаки: + – малу ймовірність; ++ – середню ймовірність; +++ – ймовірність, вищу середньої; ++++ – високу ймовірність; +++++ – дуже високу ймовірність (близьку до одиниці).

У формалізованому вигляді наявність або відсутність умов видимості m -го РЗ з μ -го КА в задану дату $d \in d^3$ космічного знімання визначимо за допомогою логічної функції геометричної видимості:

$$\Phi_m^r(\mu) = \begin{cases} 1, & \text{if } (K_m^{\tau}(\mu) \geq \bar{K}_m^{\tau}) \wedge (K_m^S(\mu) \geq \bar{K}_m^S) = 1; \\ 0, & \text{if } (K_m^{\tau}(\mu) < \bar{K}_m^{\tau}) \wedge (K_m^S(\mu) < \bar{K}_m^S) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де $K_m^{\tau}(\mu)$ – часовий коефіцієнт накриття m -го РЗ смугою огляду μ -го КА, який повинен бути не менше допустимого \bar{K}_m^{τ} ;

$K_m^S(\mu)$ – просторовий коефіцієнт накриття m -го РЗ смугою огляду μ -го КА, який повинен бути не менше допустимого \bar{K}_m^S .

Умови часового накриття m -го РЗ μ -м КА можна подати логічною функцією (рис. 1)

$$[\tau_m(\mu) \in \bar{\tau}_m] \wedge [\tau_m(\mu) \geq \bar{\tau}_m] = 1, \quad (2)$$

де

$$\tau_m(\mu) = t_m^k(\mu) - t_m^n(\mu) \quad (3)$$

– тривалість очікуваного інтервалу знімання КА μ ;

$$\bar{\tau}_m = \bar{t}_m^k - \bar{t}_m^n \quad (4)$$

– тривалість заданого інтервалу знімання;

$t_m^k(\mu)$, \bar{t}_m^k – очікуваний та заданий моменти закінчення знімання;

$t_m^n(\mu)$, \bar{t}_m^n – очікуваний та заданий моменти початку знімання.

Методику розрахунків очікуваних моментів часу буде розроблено в подальшому.

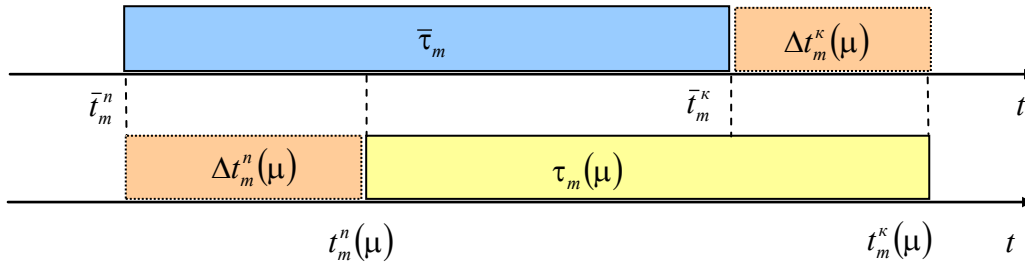


Рис. 1. До положення та тривалості очікуваного та заданого інтервалів знімання

Тоді часовий коефіцієнт накриття можна знайти як відношення очікуваного часового інтервалу космічного знімання m -го РЗ μ -м КА $\tau_m(\mu)$ до заданого часу геометричної видимості цього району $\bar{\tau}_m$, прагнучи до його максимізації, тобто

$$K_m^\tau(\mu) = \tau_m(\mu) / \bar{\tau}_m, \quad K_m^\tau(\mu) \rightarrow \max. \quad (5)$$

Від коефіцієнта (5) можна перейти до його нормованих значень за правилом

$$\widehat{K}_m^\tau(\mu) = \begin{cases} \tau_m(\mu) / \bar{\tau}_m, & \text{if } \tau_m(\mu) < \bar{\tau}_m; \\ 1, & \text{if } \tau_m(\mu) \geq \bar{\tau}_m. \end{cases} \quad (6)$$

У такому разі коефіцієнт (6) може набувати значень із діапазону

$$0 \leq \widehat{K}_m^\tau(\mu) \leq 1. \quad (7)$$

При цьому слід прагнути до забезпечення умови

$$\widehat{K}_m^\tau(\mu) \rightarrow 1, \quad (8)$$

а вибір придатних КА здійснювати за найбільшими значеннями коефіцієнта (7) із упорядкованої множини його очікуваних значень

$$\widehat{K}_m^\tau(1) > \widehat{K}_m^\tau(2) > \dots > \widehat{K}_m^\tau(\mu) \dots, \quad \mu = \overline{1, M}. \quad (9)$$

Вимогу $K_m^\tau(\mu) \rightarrow \max$ у виразі (5) можна інтерпретувати й по-іншому, наприклад, через вимогу мінімізації часу *ненакриття* m -го РЗ μ -м КА, що можна подати такими аналітичними виразами (див. рис. 1):

$$\Delta t_m^n(\mu) = |t_m^n(\mu) - \bar{t}_m^n| \rightarrow 0; \quad (10)$$

$$\Delta t_m^k(\mu) = |t_m^k(\mu) - \bar{t}_m^k| \rightarrow 0; \quad (11)$$

$$\Delta t_m^\Sigma(\mu) = \Delta t_m^n(\mu) + \Delta t_m^k(\mu) \rightarrow 0. \quad (12)$$

У такому разі замість (5) слід користуватися протилежним показником – часовим коефіцієнтом ненакриття m -го РЗ:

$$K_m^{\Delta t}(\mu) = 1 - K_m^\tau(\mu) = \Delta t_m^\Sigma(\mu) / \bar{\tau}_m, \quad K_m^{\Delta t}(\mu) \rightarrow \min. \quad (13)$$

Виконання вимог (10)–(13) забезпечує своєчасність ОЕСп, економію бортових ресурсів та запобігання отриманню надлишкової ЦІ. У разі невиконання цих вимог визначеними КА слід перевірити на придатність інші апарати та витки орбіти, а також можливість здійснення кутових маневрів вибраних зразків.

Просторовий коефіцієнт накривтя $K_m^S(\mu)$ у виразі (1) можна знайти як відношення площі $S_m^*(\mu)$ спостережуваної ділянки m -го РЗ μ -м КА до загальної площі цього району S_m^* (рис. 2), прагнучи до його максимізації, тобто

$$K_m^S(\mu) = S_m^*(\mu) / S_m^*, \quad K_m^S(\mu) \rightarrow \max, \quad (14)$$

де правий верхній індекс * відведений для позначення форми відповідних атрибутів землеогляду – спостережуваної ділянки, усього РЗ тощо.

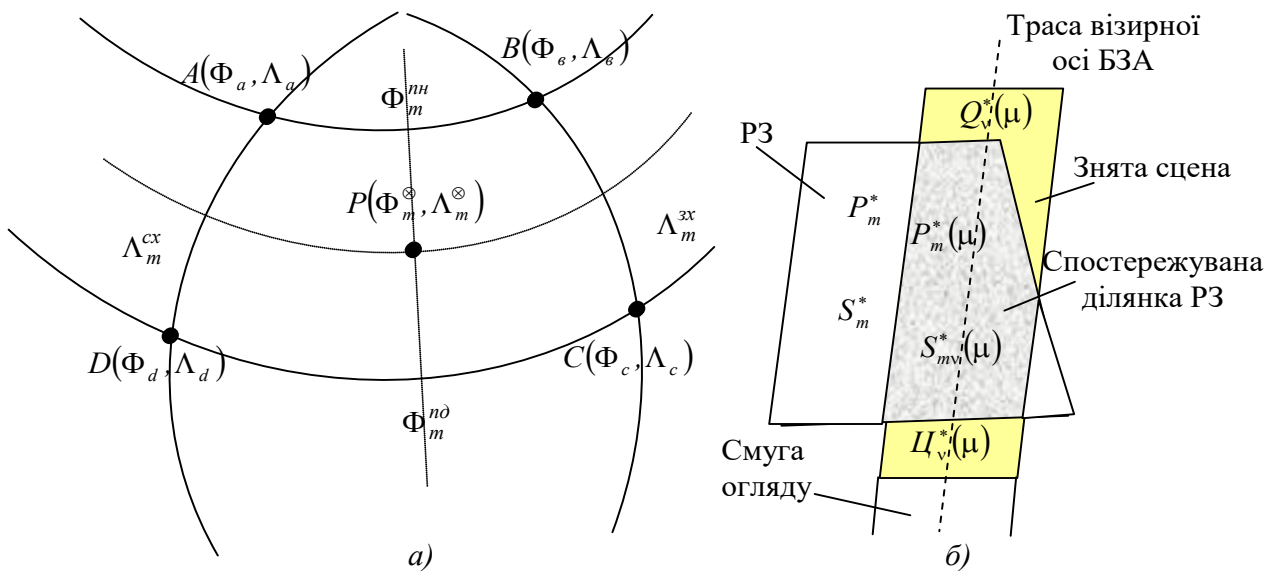


Рис. 2. До поняття просторового коефіцієнта накривтя РЗ

Для зручності та з метою запобігання надлишковості від коефіцієнта (14) можна перейти до його нормованих значень

$$\widehat{K}_m^S(\mu) = \begin{cases} S_m(\mu) / S_m, & \text{if } S_m(\mu) < S_m; \\ 1, & \text{if } S_m(\mu) \geq S_m. \end{cases} \quad (15)$$

У такому разі коефіцієнт (15) може набувати значень із діапазону

$$0 \leq \widehat{K}_m^S(\mu) \leq 1. \quad (16)$$

При цьому слід прагнути до забезпечення умови

$$\widehat{K}_m^S(\mu) \rightarrow 1, \quad (17)$$

а вибір придатних КА здійснювати за найбільшими значеннями коефіцієнтів (15) із упорядкованої множини його очікуваних значень

$$\widehat{K}_m^S(1) > \widehat{K}_m^S(2) > \dots > \widehat{K}_m^S(\mu) \dots, \mu = \overline{1, M}. \quad (18)$$

Виконання вимог (10)–(13) забезпечує своєчасність ОЕСп, економію бортових ресурсів та запобігання отриманню надлишкової ЦП. У разі невиконання цих вимог визначеними КА слід перевірити на придатність інші апарати та витки орбіти, а також можливість здійснення кутових маневрів вибраних варіантів.

Для розрахунків площі заданого РЗ S_m^* у виразі (14) можна скористатися таким підходом [13, 14]. Нехай РЗ має форму сферичної трапеції $ABCD$, сторонами якої є паралелі та меридіани (див. рис. 2). Тоді формально це можна подати як

$$P_m^\diamond = P(\Phi_m^{nn}, \Phi_m^{nd}, \Lambda_m^{cx}, \Lambda_m^{xx}), \quad (19)$$

де $\Phi_m^{nn}, \Phi_m^{nd}, \Lambda_m^{cx}, \Lambda_m^{xx}$ – географічні межі m -го РЗ (північна та південна широта, східна та західна довгота відповідно).

На практиці в цьому випадку часто обмежуються заданням РЗ через координати тільки двох вершин сферичної трапеції, наприклад, північно-західної $A(\Phi_m^{nn}, \Lambda_m^{xx})$ та південно-східної $C(\Phi_m^{nd}, \Lambda_m^{cx})$.

Площу такого РЗ можна обчислити за географічними координатами його вершин [14]:

$$S_m^\diamond(\Phi_m, \Lambda_m) = R_3^2 (\Lambda_m^{cx} - \Lambda_m^{xx}) (\sin \Phi_m^{nn} - \sin \Phi_m^{nd}), \quad (20)$$

де Φ_m^* та Λ_m^* – географічні широта й довгота сторін трапеції в радіанах.

Якщо РЗ має форму багатокутника, то його називають полігоном [14] і описують як

$$P_m^\Sigma = P[(X_m^1, Y_m^1), (X_m^2, Y_m^2), \dots, (X_m^k, Y_m^k)], \quad (21)$$

де верхніми правими індексами $1, 2, \dots, k$ позначені номери вершин багатокутника, а (X_m^k, Y_m^k) – їх декартові координати.

У разі, коли РЗ має просту форму (коло, трикутник, трапеція тощо) і сферичністю Землі можна нехтувати, то для розрахунку його площі варто скористатися звичайними формулами планіметрії.

Якщо ж РЗ становить собою багатокутник (рис. 3а) довільної форми, то його площу можна знайти через обчислення площ відповідних трапецій [14]. Наприклад, площу

фігури 12345 (рис. 3б) можна обчислити, якщо знайти суму площ трьох "великих" трапецій: 1'122', 2'233', 3'344', – а потім відняти від неї суму площ двох "зайвих" трапецій: 1'155' і 5'544'.

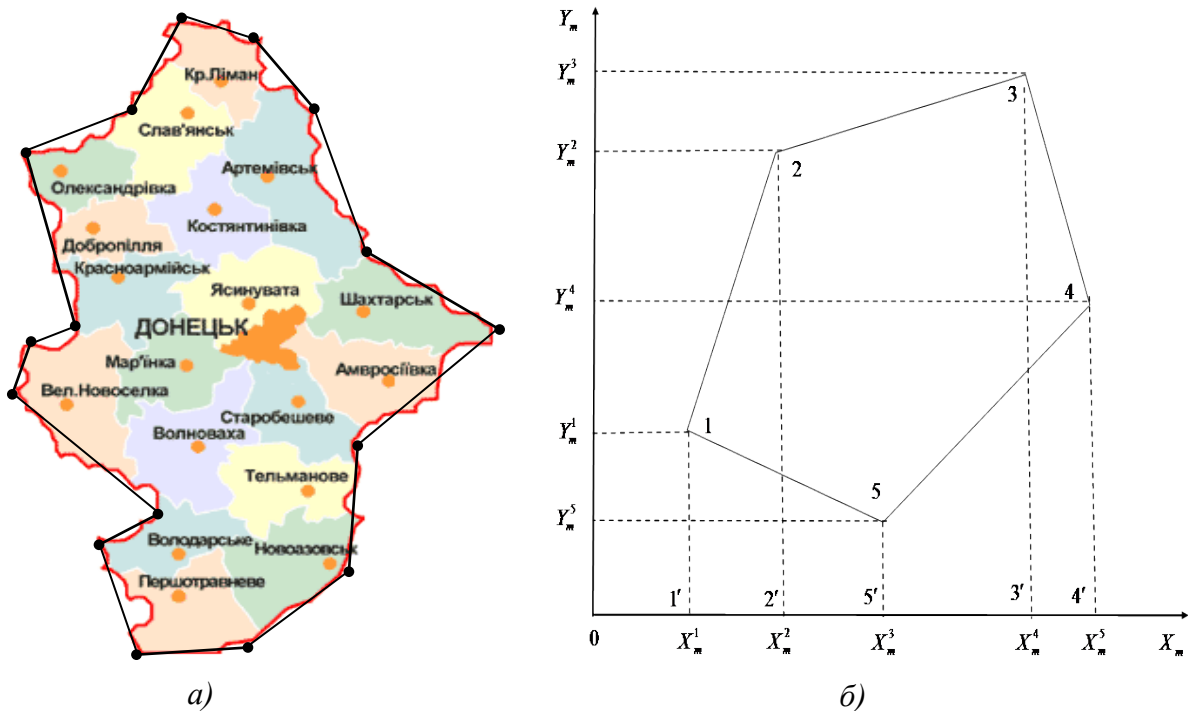


Рис. 3. До розрахунків площі РЗ у вигляді багатокутника

При цьому площа будь-якої з трапецій обчислюється через добуток її основи на висоту, а за висоту беруть середню лінію трапеції. Наприклад, площа першої із "великих" трапецій дорівнює

$$S_m^1 = 0,5(Y_m^1 + Y_m^2)(X_m^2 - X_m^1). \quad (22)$$

Аналогічно для решти "великих" трапецій 2'233' і 3'344'

$$S_m^2 = 0,5(Y_m^2 + Y_m^3)(X_m^3 - X_m^2); \quad (23)$$

$$S_m^3 = 0,5(Y_m^3 + Y_m^4)(X_m^4 - X_m^3). \quad (24)$$

Таким же чином отримаємо площі "зайвих" трапецій: 1'155' і 5'544':

$$S_m^4 = 0,5(Y_m^1 + Y_m^5)(X_m^5 - X_m^1); \quad (25)$$

$$S_m^5 = 0,5(Y_m^5 + Y_m^4)(X_m^4 - X_m^5). \quad (26)$$

Тоді площа багатокутника 12345 становитиме:

$$S_m^\Sigma = S_m^1 + S_m^2 + S_m^3 - S_m^4 - S_m^5. \quad (27)$$

Якщо у вираз (27) підставити формули (22)–(26), то отримаємо подвійну площу цього багатокутника:

$$2S_m^\Sigma = \sum [X_m^i (Y_m^{i+1} - Y_m^{i-1})] \text{ або } 2S_m^\Sigma = \sum [Y_m^i (X_m^{i-1} - X_m^{i+1})]. \quad (28)$$

Аналогічно можна обчислювати площі земельних ділянок з іншою кількістю сторін, включаючи трикутники і чотирикутники, якщо відомі декартові координати їх вершин.

У випадках, коли необхідно враховувати сферичність Землі, визначають площу полігона через ексцес сферичного багатокутника за формулою [14]

$$\widehat{S}_\varepsilon^\Sigma = \varepsilon R_3^2,$$

де $\varepsilon = 2\pi - \sum_{i=1}^l \gamma_i$ – ексцес, тобто сума зовнішніх кутів сферичного багатокутника, що перевищують 2π (рис. 4);

$\gamma_i = \pi - \theta_i$ – кут, що доповнює румб до π ;

$\theta_i = \alpha_{i,i-1} - \alpha_{i,i+1}$ – румб (кут між двома напрямками), причому $\theta_i \leq 0,5\pi$;

$\alpha_{i,i+1}$ – азимут сторони, спрямованої з i -ї вершини в наступну;

$\alpha_{i,i-1}$ – азимут сторони, спрямованої з i -ї вершини в попередню.

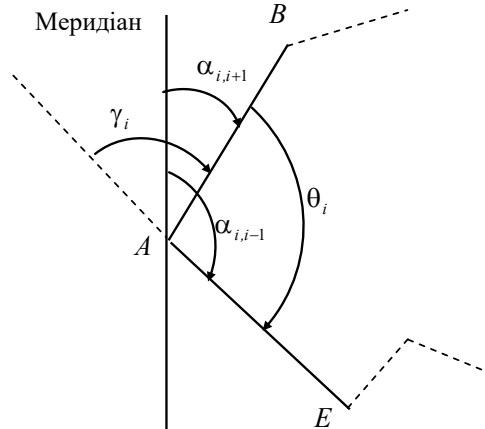


Рис. 4. До вимірювання площі полігона на сферичній Землі

Під спостережуваною ділянкою (див. рис. 2б) розумітимемо ту частину РЗ, яка накривається проекцією зони огляду (ПЗО) БЗА μ -го КА за час космічного знімання τ , або, що одне й те ж, смугою огляду БЗА. При цьому, якщо $\tau \approx 0$, то отримаємо *миттєву площу космічного знімання*, яка дорівнює площі ПЗО на земній поверхні $S_{озл}^*(\mu)$. Якщо ж $\tau > 0$, то матимемо інтегральну площу – *площу знятої сцени* $S_{озл}^*(\mu)$.

Нехай зона огляду μ -го КА є правильною прямокутною пірамідою $KBCFG$ (рис. 5а) з кутами при вершині 2α (рис. 5б) і 2β (рис. 5в), візирна вісь БЗА збігається з висотою піраміди H і направлена в надир, Земля – *плоска*.

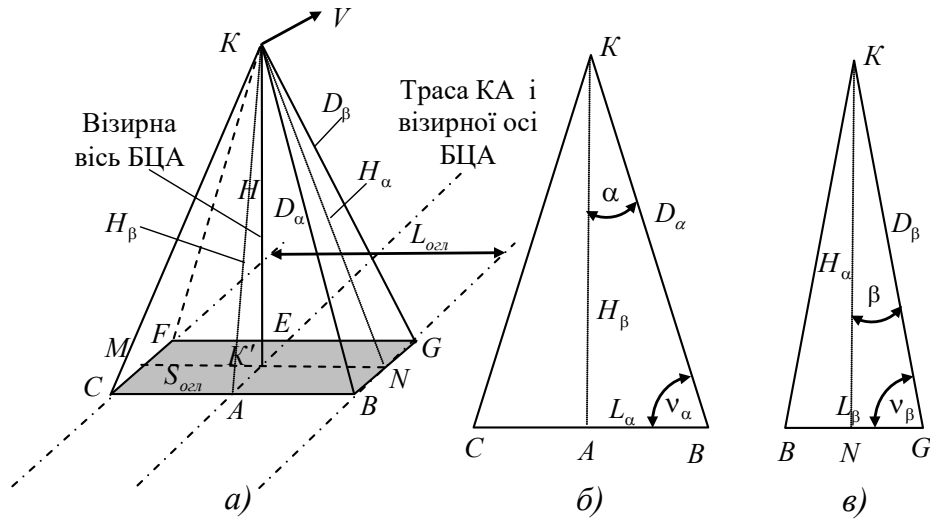


Рис. 5. До ситуації спостережень у надир плоскої Землі пірамідальною зоною огляду КА

У цьому разі площа ПЗО S_{ozl}^* становить собою площу прямокутника $CFGB$ (рис. 5а), яку можна обчислити як добуток його сторін [12, 14]

$$S_{ozl}^{\perp} = CB \cdot BG = 2L_{\alpha} \cdot 2L_{\beta}; \quad (29)$$

$$L_{\alpha} = Htg\alpha / \cos\beta; \quad (30)$$

$$L_{\beta} = Htg\beta / \cos\alpha. \quad (31)$$

Підставивши (30) та (31) у вираз (29), отримаємо миттєву площу знімання

$$S_{ozl}^{\perp} = 4H^2tg\alpha tg\beta / \cos\alpha \cos\beta. \quad (32)$$

Оскільки в реальних умовах кути поля зору БЗА невеликі ($\alpha \leq 10^\circ$ і $\beta \leq 10^\circ$), то отримані залежності можна застосовувати і для сферичної моделі Землі.

Якщо за рахунок кутового маневру КА за креном його зона огляду і візирна вісь БЗА відхилені від надира на кут η (рис. 6а), то ПЗО на поверхні плоскої Землі трансформується в рівнобічну трапецію $C_1B_1G_1F_1$ (рис. 6б).

Тоді площа ПЗО є площею трапеції $C_1F_1G_1B_1$ (див. рис. 6б), яку можна обчислити через середню лінію трапеції та її висоту:

$$S_{ozl}^{\diamond}(\eta) = A_1E_1 \cdot M_1N_1. \quad (33)$$

Середню лінію трапеції A_1E_1 визначаємо через півсуму її основ:

$$A_1E_1(\eta) = H[\sec(\alpha + \eta) + \sec(\alpha - \eta)] tg\beta. \quad (34)$$

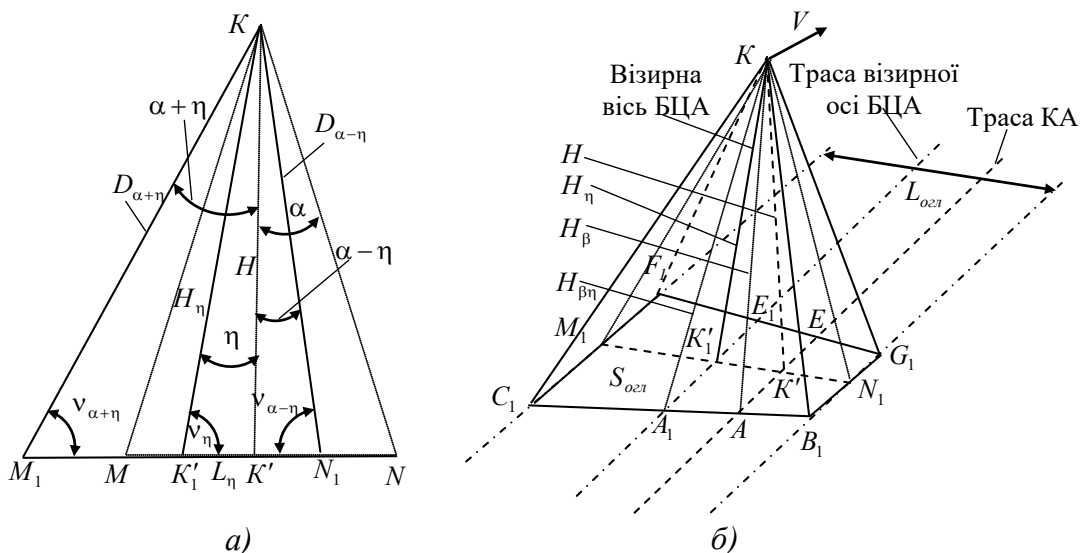


Рис. 6. До ситуації спостережень плоскої Землі пірамідальною зоною огляду КА з відхиленням візорної осі БЗА за креном

Ширину смуги огляду можна знайти через висоту трапеції M_1N_1 (див. рис. 5б) як

$$M_1N_1 = L_{\text{озл}}^{\diamond}(\eta) = H[\text{tg}(\alpha + \eta) + \text{tg}(\alpha - \eta)]. \quad (35)$$

Підставивши вирази (34) та (35) у формулу (33), отримаємо кінцевий вираз для обчислення площі ПЗО (миттєвої площі космічного знімання) на *плоскій* Землі за відхилень візорної осі від надира:

$$S_{\text{озл}}^{\diamond}(\eta) = H^2 \text{tg}\beta [\text{tg}(\alpha + \eta) + \text{tg}(\alpha - \eta)] \cdot [\sec(\alpha + \eta) + \sec(\alpha - \eta)]. \quad (36)$$

Для *сферичної* Землі ширину смуги огляду можна знайти як [12, 14]

$$\tilde{L}_{\text{озл}}^{\diamond}(\eta) = R_3 \left\{ \pi - 2\alpha - \arccos \left[A_H^{-1} \sin(\alpha - \eta) \right] - \arccos \left[A_H^{-1} \sin(\alpha + \eta) \right] \right\}, \quad (37)$$

де $A_H = R_3 / (R_3 + H)$ – аргумент висоти орбіти КА.

Для обчислення миттєвої площі знімання на *сферичній* Землі за відхилень візорної осі від надира можна скористатися наближеною формулою, отриманою як добуток виразів (34) та (37):

$$\widehat{S}_{\text{озл}}^{\diamond}(\eta) \approx \tilde{L}_{\text{озл}}^{\diamond}(\eta) \cdot H [\sec(\alpha + \eta) + \sec(\alpha - \eta)] \text{tg}\beta. \quad (38)$$

Графічна інтерпретація залежностей (35)–(38) подана на рис. 7. Наведені графіки свідчать про таке:

а) миттєві площі знімання визначаються *технічними характеристиками* БЗА та *висотою* орбіти КА, але не залежать від параметрів орбітального руху;

б) у разі відхилень візорної осі БЗА від надира ці *площі суттєво зростають*, особливо за кутів крену $\eta \geq 30^\circ$, якщо $\eta \geq 45^\circ$, то може суттєво *погіршуватися* *детальність* отримуваних космічних знімків.

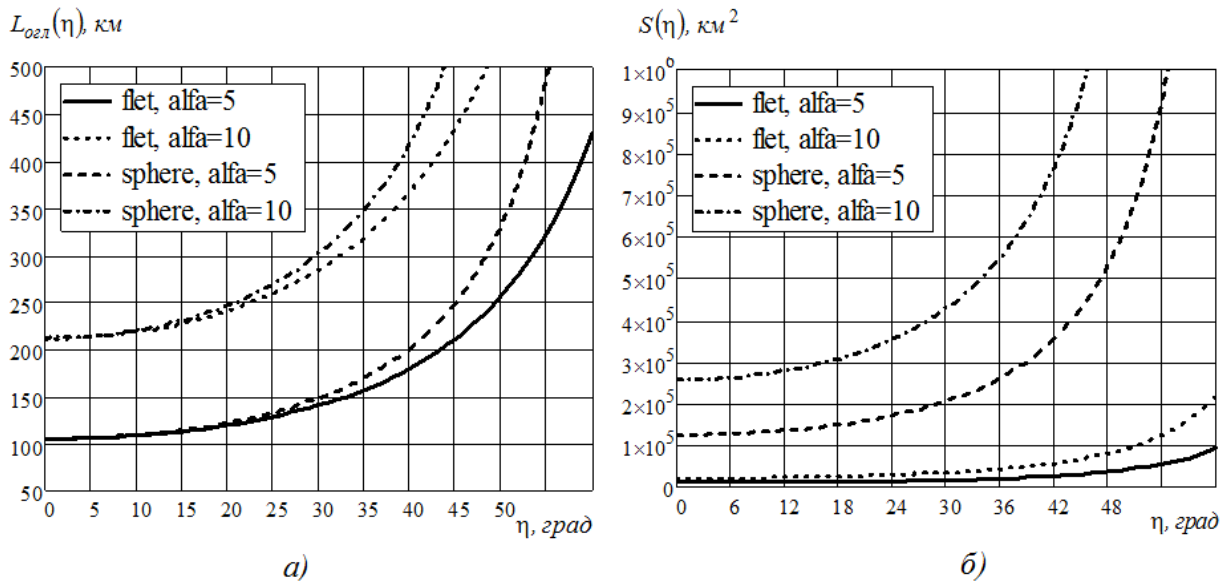


Рис. 7. Залежність ширини смуги огляду (а) та миттєвої площі знімання (б) від кута крену (flet – плоска Земля; sphere – сферична Земля; alfa – кут α в градусах)

Знята сцена $U_{\mu}^{\tau}(\lambda_*, \varphi_*)$ (див. рис. 2б) – це частина смуги огляду μ -го КА, обмежена її шириною $L_{\text{озл}}^*$ та довжиною спостережуваної ділянки $D_v(t)$, яка утворюється за рахунок орбітального руху КА з лінійною швидкістю $V(t)$ за час космічного знімання τ .

Для розрахунків площі сцени, знятої μ -м КА за час τ , скористаємося такою формулою [12]:

$$Q_{\mu}^{\tau}(\ast) = S_{\text{озл}}^* + L_{\text{озл}}^* \int_{t_v^n}^{t_v^n + \tau} A_H \sqrt{\mu_0 \left(\frac{2}{R_3 + H} - \frac{1}{a} \right)} dt, \quad (39)$$

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

$\mu_0 = 3,986 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$ – гравітаційний параметр Землі;

$a = 0,5(H_A + H_{\text{П}} + 2R_3)$ – велика піввісь еліптичної орбіти;

H_A і $H_{\text{П}}$ – висота апогею і перигею еліптичної орбіти;

$H = H(t)$ – поточна висота орбіти КА.

Якщо для спостережень застосовують колові або майже колові орбіти з висотою H_o , то для розрахунків площі знятої сцени замість виразу (39) можна скористатися спрощеною формулою

$$Q_{\mu}^{\tau}(\ast) \approx S_{\text{озл}}^* + L_{\text{озл}}^* \frac{R_3 \sqrt{\mu_0 / (R_3 + H_o)}}{R_3 + H_o} \tau. \quad (40)$$

Форму спостережуваної частини m -го РЗ, її розмір та положення на земній поверхні можна знайти як результат перетину фігур цього району та знятої сцени $U_{\mu}^{\tau}(\lambda_*, \varphi_*)$:

$$P_{m\mu}^*(\varphi_*, \lambda_*) = P_m^*(\varphi_*, \lambda_*) \cap U_{\mu}^{\tau}(\varphi_*, \lambda_*), \quad (41)$$

де символом (*) позначено форму фігури;

$(\varphi_*, \lambda_*) = (\varphi_*^{nn}, \varphi_*^{nd}, \lambda_*^{cx}, \lambda_*^{zx})$ – скорочене позначення географічних меж РЗ, знятої сцени та спостережуваної ділянки (північна та південна широта, східна та західна довгота відповідно).

Висновки

1. Запропоновані просторові та часові показники дозволяють оцінювати та/або прогнозувати наявність або відсутність *геометричної* видимості між μ -м КА та m -м РЗ, що становить необхідні, але ще недостатні умови для вибору доступних космічних систем, придатних для ОЕСп.

2. Для кінцевого вибору КА геометричні умови слід доповнити *фізичними*, зокрема показниками освітленості РЗ Сонцем, станом атмосфери, рівнем хмарності тощо. Ці фактори доцільно дослідити в наступних статтях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Концепція реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30.03.2011. № 238-р. URL: <http://zakon1.rada.gov.ua> (дата звернення: 25.03.2019).
2. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2019–2023 роки (проект). URL: <http://zakon1.rada.gov.ua> (дата звернення 26.03.2019).
3. Фриз П. В. До проблеми управління процесом космічних спостережень заданих районів Землі при вирішенні оперативних завдань // Озброєння та військова техніка : наук.-техн. журнал. Київ : ЦНДІ ОБТ ЗС України, 2017. Вип. 1. С. 64–69.
4. Liu Xiaolua, Bai Baocunb, Chen Yingwua, Yao Fenga. Multi satellites scheduling algorithm based on task merging mechanism // Applied Mathematics and Computation. 2014. № 230. P. 687–700.
5. He Chuan, Liu Jin, Ma Manhao. A Dynamic Scheduling Method of Earth-Observing Satellites by Employing Rolling Horizon Strategy // The Scientific World Journal. 2013. P. 34–42
6. Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites / Jianjiang Wanga, Xiaomin Zhua, Laurence Yangb and other // Journal of Computer and System Sciences. 2015. № 81. P. 110–124.
7. A Distributed Cooperative Dynamic Task Planning Algorithm for Multiple Satellites Based on Multi-agent Hybrid Learning / Chong Wang, Jun Li, Ning Jing and other // Chinese Journal of Aeronautics. 2011. № 24. P. 493–505.
8. Гончаров А. К., Чернов А. А. Планирование сеансов приёма информации с космических аппаратов орбитальной группировки при ограниченном количестве приёмных комплексов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 3 (74). С. 180–189.
9. Куссуль Н. М., Фриз В. П., Янчевський С. Л. Можливий підхід до раціонального планування космічної зйомки Землі на основі багатокритерійної оптимізації // Проблеми створення, випробовування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ НАУ, 2011. Вип. 4. С. 97–105.
10. Ожінський В. В., Парфенюк В. Г. Планування роботи бортових систем космічних апаратів при використанні координатних методів управління // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. Житомир : ЖДТУ, 2011. Вип. № 1 (56). С. 61–71.

11. Савчук А. В. Оптимальне обслуговування заявок на отримання цільової інформації з борту космічних апаратів дистанційного зондування Землі // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. Житомир : ЖДТУ, 2010. Вип. № 1 (52). С. 140–146.
12. Фриз П. В. Удосконалений математичний апарат для розрахунків розмірів контрольованих ділянок земної поверхні при космічних спостереженнях пірамідальною зоною огляду // Проблеми створення, випробовування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ НАУ, 2012. Вип. 6. С. 113–127.
13. Фриз П. В. Математичний апарат для оцінювання спостережуваності заданих районів Землі в задачах дистанційного зондування із космосу // Озброєння та військова техніка : наук.-техн. журнал. Київ : ЦНДІ ОБТ ЗС України, 2015. Вип. 1. С. 64–69.
14. Фриз П. В. Удосконалений математичний апарат для визначення спостережуваної площі заданого району Землі у завданнях космічного моніторингу // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. Житомир : ЖДТУ, 2017. Вип. 2 (80). С. 126–134.
15. Кондратов О. М., Фриз П. В. Алгоритм автоматизованого вибору релевантних космічних апаратів для оптико-електронного спостереження заданих районів Землі // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. Житомир : ЖДТУ, 2012. Вип. № 2 (61). С. 138–146.

Подано 17.04.2019

П. В. Фриз

СПОСОБ ВЫБОРА ДОСТУПНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО УСЛОВИЯМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ВИДИМОСТИ МЕЖДУ НИМИ И ЗАДАНЫМИ РАЙОНАМИ ЗЕМЛИ

В условиях боевых действий на востоке Украины особо актуальной стала проблема обеспечения военного руководства информацией космической съемки. С учётом отсутствия отечественных средств для решения этих задач возможным практическим путем получения информации космической съемки является ее заказ и приобретение у зарубежных операторов. Следует отметить, что рынок этих услуг достаточно развит, поэтому возникает проблема корректного формирования заказов на съемку.

В статье предложен оригинальный способ выбора доступных иностранных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли для использования их целевой информации в интересах Вооруженных Сил Украины. Он базируется на заблаговременных расчетах ожидаемых коэффициентов временного и пространственного накрытия заданных районов Земли зоной обзора определенных космических аппаратов, сравнении их с требованиями заказчиков целевой информации и выборе на этой основе наиболее подходящих вариантов.

Формализованы условия видимости заданного района Земли определенным космическим аппаратом в конкретную календарную дату. При этом использован аппарат логических функций геометрической видимости. Кроме того, предложен математический аппарат для расчета площади заданного района съемки в случае ее описания многоугольником произвольной формы с учетом эксцесса этого сферического многоугольника. Разработана математическая модель определения мгновенной площади

съемки на сферической Земле пирамидальной зоной обзора космического аппарата при отклонении визирной оси бортовой целевой аппаратуры по крену.

Предложены направления дальнейших исследований, в частности определение физических условий наблюдения заданных районов съемки.

Ключевые слова: доступные космические аппараты; оптико-электронные наблюдения; проекция поля зрения; часовой и пространственный коэффициенты накрытия; заданный район Земли; бортовая съемочная аппаратура.

P. V. Fryz

THE METOD OF SELECTING THE AVAILABLE SPACE VEHICLES UNDER THE TERMS OF GEOMETRICAL VISIBILITY BETWEEN THEM AND THE EARTH'S DESIGNATED AREAS

Under the warfare conditions in the east of Ukraine the problem of providing the command with space shooting information is gaining topicality. With respect to the absence of national means for solving these tasks, ordering and purchasing the space shooting information from foreign operators appears the only practical way of gaining the above information. It is noteworthy, that the market of these services is well-developed, this the problem of the reasonable formation of orders for shooting appears topical.

The paper suggests a unique method for selecting available foreign space vehicles for the Earth's remote sensing with the aim of using their target information for the benefit of the Armed Forces of Ukraine. The method is based on the advance calculations of the prognosticated coefficients of the temporal and spatial coverage of the Earth's designated areas by the inspection zone of the space vehicles selected, comparing them with the requirements of the target information ordering customers, as well as on choosing the most appropriate options on this basis.

The visibility conditions of the Earth's designated area by the determined space vehicle at a given calendar date are formalized. Along with it the instrument of logical functions of the geometric visibility is used. Besides, the author suggests the mathematical instruments for the calculating the area of the designated territory of shooting in case of its description by the polygon of arbitrary shape with respect to the excess of this spherical polygon. The author also develops the mathematical model for determining instant shooting area on the spherical Earth by the pyramid coverage zone of the space vehicle under the in roll deviation of the sight axis of the onboard target equipment.

The directions for the further research in general, and determining the physical conditions of monitoring the designated shooting areas in particular, are suggested.

Keywords: available space vehicles; optical and the electronic observations; field of view projection; temporal and spatial coverage coefficients; Earth's designated area, onboard shooting equipment.