

НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ АПАРАТ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ ЗЕМЛЕОГЛЯДУ У ЗАВДАННЯХ ДЕТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Запропоновано систематизований науково-методичний апарат для розрахунків параметрів землеогляду у завданнях детальних космічних спостережень наземних об'єктів (НО) з використанням бортової цільової апаратури (БЦА) оптико-електронного типу при орієнтації її поля зору в надир.

Постановка проблеми. У завданнях спостереження Землі із космосу (землеогляду) широко застосовуються такі поняття (параметри), як: траса космічного апарата (КА); траса візирної осі БЦА; зона огляду БЦА; проекція зони огляду на земну поверхню; смуга огляду; знята сцена; смуга захвату та ін. (рис. 1).

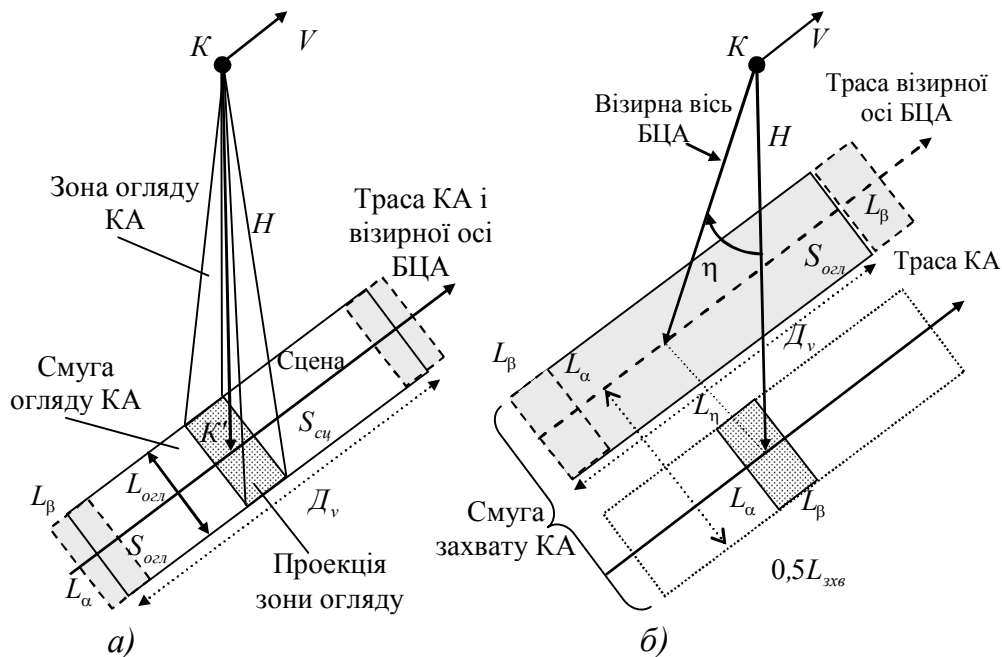


Рис. 1. Параметри землеогляду

Однак, якщо визначення цих параметрів більш-менш знайшло відображення в сучасній літературі, то математичний апарат та методика розрахунків їх значень потребують удосконалення або розробки.

Дослідження в цьому напрямі набувають особливої актуальності в нинішніх умовах, коли в Україні реалізуються державні програми послідовного і цілеспрямованого створення власних космічних систем спостереження (КСС) або задіяння доступних іноземних систем в інтересах народного господарства, науки, оборони і безпеки, а також міжнародного співробітництва [1, 2].

За цих умов існує **науково-прикладна проблема** моделювання процесів детальних спостережень за НО із космосу, коли відомі підходи, застосовувані при оглядових

спостереженнях, уже не задовольняють потреби практики. Створювані моделі повинні, зокрема, забезпечувати розрахунки параметрів землегляду з прийнятною точністю, що є основою для планування раціональних маршрутів “обслуговування” заданих НО та оцінювання ефективності процесу спостережень з урахуванням необхідності одержувати максимальні об’єми корисної цільової інформації (ЦІ) заданої якості в потрібний час при обмеженому бортовому ресурсі КА. А це потребує відповідного систематизованого науково-методичного апарату.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Формуванню параметрів землегляду та розрахункам їх значень присвячено ряд робіт [3–12]. Однак їх аналіз показав, що частина з них охоплює лише окремі питання побудови трас КА [3, 4]. У роботах [5–8] наведено окремі математичні вирази для розрахунків тільки лінійних розмірів смуги огляду або смуги захвату. Роботи [9, 10] висвітлюють параметри землегляду при суттєвих спрощеннях і обмеженнях, що не завжди відповідає практичним потребам. Найбільш близькими до визначеної проблеми є джерело [10], де наведені визначення майже всіх параметрів землегляду, а також статті [11, 12], в яких викладено математичний апарат для розрахунків окремих із них. У той же час у зазначених публікаціях не знайшли відображення такі поняття, як “траса візирної осі БЦА” та “математичний апарат для розрахунків географічних координат смуги огляду КА”.

Виходячи з цього, у статті наведено уточнені поняття окремих параметрів землегляду, систематизований існуючий або оригінальний авторський методичний і математичний апарат для їх розрахунків щодо задач планування та оцінювання ефективності детальних космічних спостережень.

Виклад основного матеріалу. Перш за все наведемо тлумачення окремих параметрів землегляду, які уточнюють або доповнюють визначення, наведені в [10].

Траса КА – це проекція орбіти КА на *обертovu* Землю із вказівкою часу проходження КА окремих пунктів [4]. Інакше кажучи, траса – це геометричне місце множини підсупутникових точок (ПТ).

Підсупутникова точка – це точка K' на земній поверхні (рис. 2а), з якої в даний момент часу КА видно у зеніті. Іншими словами, – це точка перетину поточного радіуса-вектора КА $\vec{r}(t)$ з поверхнею Землі (рис. 2).

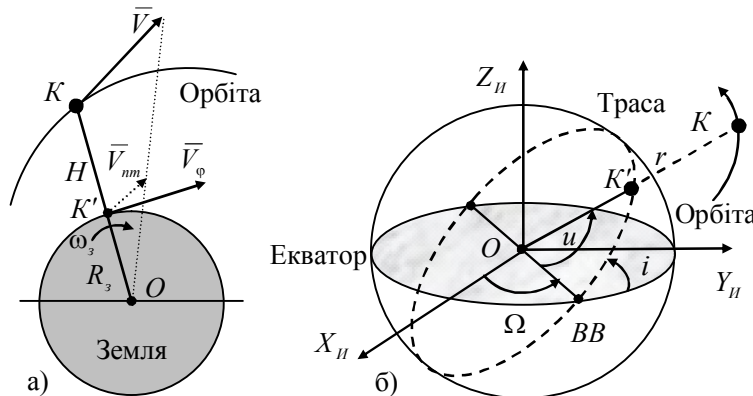


Рис. 2. До поняття траси КА:

BB – висхідний вузол; $OX_n Y_n Z_n$ – інерціальна (абсолютна) система координат; Ω – інерціальна довгота BB ; u – аргумент широти; i – нахилення орбіти

За допомогою траси можна планувати спостереження та оцінювати якість виконання КА цільового завдання, а саме:

- оцінювати можливість спостереження за НО із КА в надир;
- визначати необхідний кутовий маневр для спостереження за НО поза трасою КА;
- розраховувати сеанси радіозв'язку КА з наземними засобами для передачі ЦІ;
- оцінювати сталість траси (ізотрасовість) КА на значних інтервалах часу і т.п.

Очевидно, що розташування множини ПТ визначає форму траси, яка залежить від співвідношення лінійних швидкостей ПТ відносно *нерухомої* Землі $V_{nm} = V_{nm}(t)$ та лінійних швидкостей обертання точок із широтою φ на земній поверхні:

$$V_3(\varphi) = \omega_3 R_3 \cos \varphi, \quad (1)$$

де $\omega_3 = 7,292115 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ – кутова швидкість обертання Землі навколо своєї осі;

$R_3 = 6371 \text{ км}$ – середній радіус Землі.

Оскільки КА і його ПТ (точки K і K' на рис. 2а) лежать на одній прямій, то вони обертаються навколо центру Землі O з однією і тією ж кутовою швидкістю:

$$\omega_k = V / [R_3 + H] = V_{nm} / R_3, \quad (2)$$

де $V = V(t)$ – поточна лінійна швидкість КА;

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

Як видно із виразу (2), лінійна швидкість ПТ залежить від лінійної швидкості КА та висоти його орбіти, а її величину можна обчислити за формулою

$$V_{nm} = VR_3 / [R_3 + H]. \quad (3)$$

У свою чергу лінійна швидкість КА залежить від розмірів і форми орбіти, поточного положення КА на ній та розраховується як [4]

$$V = \sqrt{\mu_0 \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}, \quad (4)$$

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

$r = r(t) = H + R_3$ – поточна довжина радіуса-вектора КА;

$a = 0,5(H_A + H_{II} + 2R_3)$ – велика піввісь еліптичної орбіти.

H_A і H_{II} – висота апогею і перигею еліптичної орбіти над Землею.

Як бачимо із отриманих результатів, лінійна швидкість ПТ не перевищує лінійної швидкості КА. Ця закономірність має загальний характер, тобто $V_{nm} \leq V$, причому знак рівності може мати місце тільки у гіпотетичному випадку, коли КА знаходиться на поверхні Землі (при $H = 0$).

За аналогією з поняттям траси КА доцільно ввести поняття **траси візирної осі БЦА**, яка являє собою слід від перетину земної поверхні візирною віссю БЦА із вказівкою часу проходження КА окремих пунктів Землі. Якщо візирна вісь БЦА направлена в надир, то її траса збігається з трасою КА. У разі ж конструктивного або програмного відхилення цієї осі від надира за креном (перпендикулярно до траси КА) на кут η на земній поверхні виникає множина *точок візування*, що у сукупності утворюють трасу візирної осі, яка відхилена від траси КА на величину, пропорційну цьому куту. У такому разі географічне положення смуги огляду можна оцінювати як відносно траси КА, так і відносно траси візирної осі БЦА.

Під **зоною огляду БЦА** розумітимемо (рис. 1а) частину космічного простору, обмежену кутовим полем зору БЦА і частиною поверхні Землі, на котру це поле спирається. На практиці зона огляду має форму конуса або піраміди з вершиною у фокальній площині оптичної системи БЦА оптико-електронного спостереження або антени БЦА радіолокаційного спостереження. Основою цих фігур є відсічна частина земної поверхні. При цьому візирна (або оптична) вісь БЦА, як правило, є віссю симетрії зони огляду, тобто висотою конуса (піраміди).

Проекція зони огляду БЦА на поверхні Землі являє собою множину точок у межах замкнутої кривої, утвореної при пересіканні земної поверхні конічним (пірамідальним) полем зору. Проекція зони огляду рухається на земній поверхні зі швидкістю V_{nm} , утворюючи смугу огляду. Тому поняття “траса зони огляду” і “смуга огляду” можна вважати тотожними.

Смуга огляду КА у загальному випадку являє собою слід (трасу) проекції зони огляду КА на *обертівій* Землі із вказівкою часу проходження КА окремих наземних пунктів. Основним параметром смуги огляду є її *ширина* $L_{огл}$. Вона характеризує геометричні (просторові) можливості КА зі спостереження за НО відносно його траси (при орієнтації поля зору в надир) або відносно траси візирної осі БЦА (при відворотах візирної осі БЦА за креном).

Сцена – це частина смуги огляду КА (див. рис. 1а), що обмежена шириною смуги огляду $L_{огл}$ та довжиною спостережуваної ділянки D_v , яка утворюється за рахунок руху ПТ з лінійною швидкістю V_{nm} за час спостереження

$$\Delta t_{cn} = t_k - t_n, \quad (5)$$

де t_k і t_n – моменти кінця і початку спостереження відповідно.

Смуга захвату характеризує потенційні просторові можливості КА зі спостереження за НО при відхиленнях візирної осі БЦА від надира за креном на кут η (див. рис. 1б). При цьому спостереження за НО як і раніше ведеться в межах зони огляду, але кутове положення цієї зони може мінятися.

При спостереженнях за НО *в надир* візирна вісь БЦА направлена по радіусу-вектору КА в центр сферичної Землі. Тому траса візирної осі БЦА збігається з трасою КА (див. рис. 1а), а смуга захвату КА – зі смугою огляду БЦА.

Виходячи із наведених уточнених параметрів землеогляду, доцільно систематизувати, уточнити або розробити математичний апарат для їх розрахунків.

Якщо задача побудови траси КА добре відпрацьована [4], то методики формування інших параметрів землеогляду та їх розрахунків потребують уточнення та подальшого розвитку.

Розіб'ємо завдання на дві частини. Спочатку дослідимо задачу спостереження за НО на *необерттовій сферичній* Землі, а далі врахуємо особливості, обумовлені реальними умовами (обертота несферична Земля).

Поняття “необертота Земля” означає, що її кутова швидкість обертання навколо власної осі $\omega_3 \approx 0$, а “сферична” – що Земля має форму сфери з радіусом $R_3 = 6371$ км.

Такі допущення прийнятні в ряді практичних задач на невеликих інтервалах часу, а також як методичний прийом при наукових дослідженнях, коли розв’язуються складні завдання, що потребують послідовного аналізу з подальшим ускладненням.

Методика розрахунків ширини смуги огляду. Ширину смуги огляду можна вимірювати як в лінійних, так і в кутових одиницях.

Лінійною шириною смуги огляду [11] може служити довжина дуги (рис. 3):

$$L_{огл} = 2L_\chi = 2R_3\psi_\chi. \quad (6)$$

де ψ_χ – центральний кут, що опирається на половину дуги проєкції зони огляду.

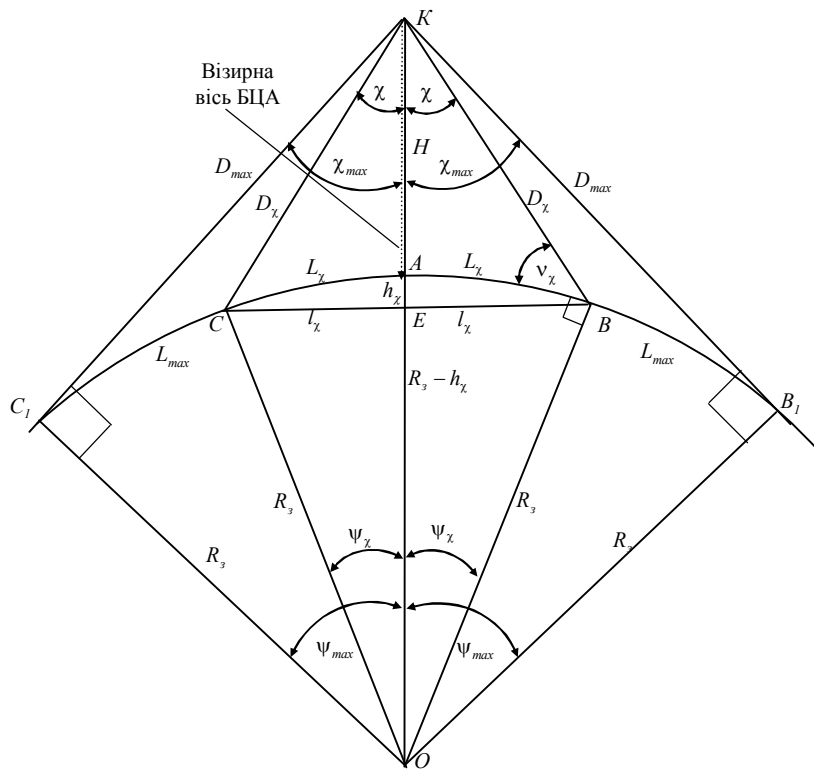


Рис. 3. До ситуації спостережень у надир сферичної Землі конічною зоною огляду КА

Кут ψ_χ являє собою половину *кутової ширини* смуги огляду. Його можна знайти із трикутників OKC або OKB (див. рис. 3) як

$$\psi_\chi = \arcsin\left(\frac{R_3 + H}{R_3} \sin \chi\right) - \chi = 0,5\pi - \arccos\left(\frac{R_3 + H}{R_3} \sin \chi\right) - \chi, \quad (7)$$

де χ – половина кута конічного поля зору БЦА.

Граничні геометричні можливості спостереження за поверхнею Землі із висоти H характеризує максимальний кут ψ_{max} , який можна знайти із прямокутних трикутників OC_1K або OB_1K (див. рис. 3) за формулою

$$\psi_{max} = \arccos[R_3 / (R_3 + H)] . \tag{8}$$

Використовуючи значення кута (8) та враховуючи, що $\psi_{max} = 0,5\pi - \chi_{max}$, можна знайти *максимально* можливий лінійний розмір смуги огляду:

$$2L_{max} = C_1B_1 = 2R_3\psi_{max} = 2R_3(0,5\pi - \chi_{max}) . \tag{9}$$

При цьому, як видно із рис. 3, граничне значення кута поля зору БЦА

$$\chi_{max} = 0,5\pi - \psi_{max} = 0,5\pi - \arccos[R_3 / (R_3 + H)] . \tag{10}$$

Отримані максимальні значення слід використовувати при розрахунках як обмеження виду $\chi \leq \chi_{max}$, $\psi_\chi \leq \psi_{max}$, $L_\chi \leq L_{max}$.

Поряд із введеними параметрами смуги огляду на практиці часто необхідно знати її *ширину в географічних координатах*, тобто вздовж паралелі з географічною широтою φ при фіксованих параметрах χ , ψ_χ , H та нахиленні орбіти i :

$$\Delta\lambda_*(\varphi) = \lambda_*^n(\varphi) - \lambda_*^l(\varphi) , \tag{11}$$

де $\lambda_*^n(\varphi)$ і $\lambda_*^l(\varphi)$ – географічна довгота правої і лівої відносно траси КА межі смуги огляду на широті φ .

Ширину смуги огляду у вигляді (11) зручно використовувати в задачах спостереження Землі, оскільки координати НО та їх розміри зазвичай задаються в географічних координатах. Дослідження показали, що для розрахунків ширини смуги огляду в *географічних координатах* необхідно залежно від співвідношень між значеннями географічної широти ПТ φ , нахилення орбіти i та кутової ширини смуги огляду ψ_χ розглянути окремо ситуації, наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Варіанти ситуацій для розрахунків ширини смуги огляду $\Delta\lambda'_*(\varphi)$

Діапазони значень кутів	Діапазони значень тригонометричних функцій кутів	
	$\sin \varphi > \operatorname{tgi} \sin \psi_\chi$	$\sin \varphi < \operatorname{tgi} \sin \psi_\chi$
$0 \leq \varphi \leq i - \psi_\chi$	$\Delta\lambda'_1(\varphi)$	$\Delta\lambda'_2(\varphi)$
$i - \psi_\chi \leq \varphi \leq i + \psi_\chi$	$\Delta\lambda'_3(\varphi)$	$\Delta\lambda'_4(\varphi)$

Зокрема, для діапазону географічних широт $0 \leq \varphi \leq i - \psi_\chi$ при $\sin \varphi > \operatorname{tgi} \sin \psi_\chi$ ширина смуги огляду може бути знайдена як

$$\Delta\lambda'_1(\varphi) = \arccos\left(\frac{\operatorname{tgi}\varphi - \frac{\sin\psi_\chi}{\cos\varphi}}{\operatorname{tgi}}\right) - \arccos\left(\frac{\operatorname{tgi}\varphi + \frac{\sin\psi_\chi}{\sin i \cos\varphi}}{\operatorname{tgi}}\right), \quad (12)$$

де $\varphi = \varphi_j = \varphi(t_j)$ – поточна географічна широта ПТ.

Для розрахунків значень φ_j можна скористатись формулою [4]

$$\varphi_j = \varphi(t_j) = \arcsin\left[\sin u(t_j) \cdot \sin i\right]. \quad (13)$$

Для діапазону географічних широт $0 \leq \varphi \leq i - \psi_\chi$ при $\sin \varphi < \operatorname{tgi} \sin \psi_\chi$ ширину смуги огляду можна обчислити за формулою

$$\Delta\lambda'_2(\varphi) = \pi - \left[\arccos\left(\frac{\frac{\sin\psi_\chi}{\sin i \cos\varphi} - \frac{\operatorname{tgi}\varphi}{\operatorname{tgi}}}{\operatorname{tgi}}\right) + \arccos\left(\frac{\operatorname{tgi}\varphi + \frac{\sin\psi_\chi}{\sin i \cos\varphi}}{\operatorname{tgi}}\right) \right]. \quad (14)$$

Ширина смуги огляду для діапазону географічних широт $i - \psi_\chi \leq \varphi \leq i + \psi_\chi$ при $\sin \varphi > \operatorname{tgi} \sin \psi_\chi$ може бути знайдена як

$$\Delta\lambda'_3(\varphi) = \arccos\left(\frac{\operatorname{tgi}\varphi - \frac{\sin\psi_\chi}{\sin i \cos\varphi}}{\operatorname{tgi}}\right). \quad (15)$$

I, нарешті, ширину смуги огляду для діапазону географічних широт $i - \psi_\chi \leq \varphi \leq i + \psi_\chi$ при $\sin \varphi < \operatorname{tgi} \sin \psi_\chi$ можна розрахувати за формулою

$$\Delta\lambda'_4(\varphi) = \pi - \arccos\left(\frac{\frac{\sin\psi_\chi}{\sin i \cos\varphi} - \frac{\operatorname{tgi}\varphi}{\operatorname{tgi}}}{\operatorname{tgi}}\right). \quad (16)$$

Оскільки розглядається ситуація з необертовою Землею, то траса КА становитиме собою замкнуту лінію (великий круг на поверхні Землі), а смуга огляду на наступних витках орбіти накладатиметься на попередні смуги.

Методика визначення географічного положення смуги огляду. Прийmemo, що смуга огляду розташована симетрично відносно траси КА. Тоді географічне положення смуги огляду на *необертovій* Землі при спостереженнях у *надир* можна визначити як географічну довготу її лівої та правої межі (рис. 4). При цьому безпосередньо із рис. 4 ці межі можна визначити як

$$\lambda_n^l(\varphi) = \lambda - 0,5\Delta\lambda'_*(\varphi); \quad (17)$$

$$\lambda_n^r(\varphi) = \lambda + 0,5\Delta\lambda'_*(\varphi), \quad (18)$$

де нижні індекси n означають “необертова” (Земля), а верхні l – ліва, p – права межі;

$\lambda = \lambda_j = \lambda(t_j)$ – географічна довгота ПТ, розрахована в геоцентричній сферичній системі координат для моментів часу t_j ;

$\Delta\lambda'_*(\varphi) = \Delta\lambda'_*(\varphi_j) = \Delta\lambda'_*[\varphi(t_j)]$ – ширина смуги огляду, знайдена із виразів (12)...(16) для моментів часу t_j .

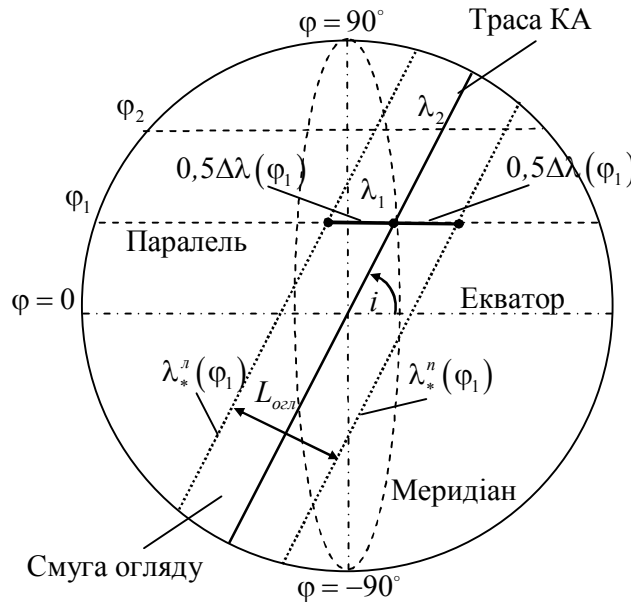


Рис. 4. До визначення географічного положення смуги огляду

Для розрахунків географічної довготи ПТ можна скористатись математичним апаратом, наведеним у [4], пристосувавши його для необертової Землі у вигляді

$$\lambda_j = \lambda(t_j) = \Omega + \delta\lambda(t_j), \quad \delta\lambda(t_j) = \arctg [tg u(t_j) \cos i],$$

де Ω – інерціальна довгота висхідного вузла орбіти;

t_j – поточний час польоту КА, відлічуваний від моменту знаходження КА у висхідному вузлі t_Ω ;

$\delta\lambda(t_j)$ – поточні зміни географічної довготи ПТ.

$tgu(t_j)$ – поточні значення аргументу широти КА.

Методика розрахунку площі знятої сцени. Зважаючи на те, що розглядається ситуація з необертовою ($\omega_s \approx 0$) сферичною Землею ($R_s = 6371$ км), **площу знятої сцени** (див. рис. 1а) можна знайти як [11, 12]

$$S_{сц} = S_{огл} + L_{огл} D_v. \tag{19}$$

У цій формулі довжина знятої сцени D_v у загальному випадку може бути знайдена через лінійну швидкість ПТ (3) як

$$D_v = \int_{t_n}^{t_k} V_{nm}(t) dt. \quad (20)$$

З урахуванням виразів (4) та (20) із формули (19) можна знайти кінцевий вираз для розрахунків площі знятої сцени:

$$S_{cu} = S_{ozl} + L_{ozl} \int_{t_n}^{t_k} \frac{R_3}{R_3 + H} \sqrt{\mu_0 \left(\frac{2}{R_3 + H} + \frac{1}{a} \right)} dt. \quad (21)$$

Якщо для спостережень застосовують колові або майже колові орбіти, то $H \approx H_A \approx H_{\Pi} \approx H_o$, $r = r_o$, $a = H_o + R_3 = r_o$ і формула (4) спрощується до вигляду

$$V \approx V_o = \sqrt{\mu_0 / r_o} \approx const. \quad (22)$$

Тоді вираз (3) можна подати як

$$V_{nmo} = \frac{R_3}{R_3 + H_o} V_o. \quad (23)$$

У цьому випадку з урахуванням залежностей (5) та (23) для розрахунків довжини знятої сцени замість виразу (20) можна скористатись спрощеною формулою

$$D_{vo} \approx V_{nmo} \Delta t_{cn}. \quad (24)$$

На основі отриманих результатів із формули (21) знайдемо кінцевий вираз для розрахунків площі знятої сцени з колових або майже колових орбіт:

$$S_{cuo} \approx S_{ozl} + \frac{R_3 \sqrt{\mu_0 / (R_3 + H_o)}}{R_3 + H_o} \Delta t_{cn}. \quad (25)$$

Особливості спостереження за НО на обертовій несферичній Землі. Через обертання Землі траса КА становитиме собою незамкнуту лінію, а смуга огляду на наступних витках орбіти зміщуватиметься відносно попередніх смуг.

Можна показати, що за рахунок **обертання** Землі **ширина смуги огляду в географічних координатах**, розрахована за формулами (14)...(16), залежно від нахилення орбіти, змінюється на величину

$$\delta \lambda_o = \frac{T}{T_{30}} \left[\arcsin \left(\frac{\sin \varphi}{\sin i \cos \psi_\chi} + \frac{tg \psi_\chi}{tgi} \right) - \arcsin \left(\frac{\sin \varphi}{\sin i \cos \psi_\chi} - \frac{tg \psi_\chi}{tgi} \right) \right], \quad (26)$$

де $T_{30} = 86164^s$ – тривалість зоряної доби.

Тоді з урахуванням виразу (26) ширина смуги огляду на обертовій Землі

$$\Delta \lambda_{o*}(\varphi) = \Delta \lambda'_*(\varphi) \pm \delta \lambda_o, \quad (27)$$

де $\Delta\lambda'_*(\varphi)$ – ширина смуги огляду на необертовій Землі, розрахована за будь-якою із формул (14)...(16), тобто при $* = \{1, 2, 3, 4\}$;

знак “+” береться для випадку зворотних орбіт ($i > 0,5\pi$), а “-” – для випадку прямих орбіт ($i < 0,5\pi$).

У такому разі **географічне положення** смуги огляду на **обертовій** Землі за аналогією із виразами (17) і (18) можна визначати з урахуванням формули (27) як

$$\lambda_{o*}^n(\varphi) = \lambda - 0,5\Delta\lambda_{o*}(\varphi) = \lambda - 0,5[\Delta\lambda'_*(\varphi) - \delta\lambda_o]; \quad (28)$$

$$\lambda_{o*}^n(\varphi) = \lambda + 0,5\Delta\lambda_{o*}(\varphi) = \lambda + 0,5[\Delta\lambda'_*(\varphi) - \delta\lambda_o]. \quad (29)$$

За рахунок **несферичності** Землі виникає прецесія лінії вузлів за виток [4]

$$\Delta\Omega_\varepsilon = 2\pi\varepsilon \frac{R_3^2}{p^2} \cos i, \quad (30)$$

де p – фокальний параметр орбіти;

$$\varepsilon = \varepsilon_3 / \mu_0 R_3^2 \approx 0,00164;$$

$$\varepsilon_3 = 2,634 \cdot 10^{10} \text{ км}^5 / \text{с}^2 \text{ – константа для еліпсоїда Землі.}$$

Внаслідок цього для **колової** орбіти з висотою H_o зміни ширини смуги огляду на несферичній Землі становитимуть

$$\delta\lambda_\varepsilon = \varepsilon \left(\frac{R}{R + H_o} \right)^2 \cos i \left[\arcsin \left(\frac{\sin \varphi}{\sin i \cos \psi_\chi} + \frac{\text{tg} \psi_\chi}{\text{tgi}} \right) - \arcsin \left(\frac{\sin \varphi}{\sin i \cos \psi_\chi} - \frac{\text{tg} \psi_\chi}{\text{tgi}} \right) \right]. \quad (31)$$

Тоді з урахуванням виразу (31) **ширина смуги огляду БЦА в географічних координатах** внаслідок прецесії лінії вузлів становитиме

$$\Delta\lambda_\varepsilon(\varphi) = \Delta\lambda'_*(\varphi) - \delta\lambda_\varepsilon. \quad (32)$$

Через це **географічне положення** смуги огляду на **несферичній** Землі за аналогією із формулами (28) і (29) необхідно визначати з урахуванням (32) як

$$\lambda_{\varepsilon*}^n(\varphi) = \lambda - 0,5\Delta\lambda_{\varepsilon*}(\varphi) = \lambda - 0,5[\Delta\lambda'_*(\varphi) - \delta\lambda_\varepsilon]; \quad (33)$$

$$\lambda_{\varepsilon*}^n(\varphi) = \lambda + 0,5\Delta\lambda_{\varepsilon*}(\varphi) = \lambda + 0,5[\Delta\lambda'_*(\varphi) - \delta\lambda_\varepsilon]. \quad (34)$$

З урахуванням виразів (27) і (32) отримаємо **ширину смуги огляду в географічних координатах**:

$$\Delta\lambda_{oe}(\varphi) = \Delta\lambda'_*(\varphi) \pm \delta\lambda_o - \delta\lambda_\varepsilon. \quad (35)$$

Підставивши у формулу (35) значення її складових (27) і (32), отримаємо для діапазону географічних широт ПТ $0 \leq \varphi_I \leq i - \psi_\chi$

$$\Delta\lambda_{oe}(\varphi_I) = \Delta\lambda'_*(\varphi_I) - \left[\arcsin\left(\frac{\sin\varphi_I}{\sin i \cos\psi_\chi} + \frac{\operatorname{tg}\psi_\chi}{\operatorname{tgi}}\right) - \arcsin\left(\frac{\sin\varphi_I}{\sin i \cos\psi_\chi} - \frac{\operatorname{tg}\psi_\chi}{\operatorname{tgi}}\right) \right] \times \left[\frac{T}{T_{30}} + \varepsilon \left(\frac{R_3}{R_3 + H_o} \right)^2 \cos i \right]. \quad (36)$$

При подальшому зростанні географічної широти ПТ можливі два випадки:

- а) межа смуги огляду не досягає полюса Землі, тобто $i + \psi_\chi \leq 0,5\pi$;
- б) межа смуги огляду переходить за полюс Землі, тобто $i + \psi_\chi > 0,5\pi$.

У першому випадку для діапазону географічних широт ПТ $i - \psi_\chi \leq \varphi \leq i + \psi_\chi$ ширину смуги огляду слід розраховувати за формулою

$$\Delta\lambda_{oe}(\varphi_{II}) = \arccos\left(\frac{\operatorname{tg}\varphi_{II}}{\operatorname{tgi}} - \frac{\sin\psi_\chi}{\sin i \cos\varphi_{II}}\right) - \frac{\zeta}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{\sin\varphi_{II}}{\sin i \cos\psi_\chi} - \frac{\operatorname{tg}\psi_\chi}{\operatorname{tgi}}\right) \right], \quad (37)$$

де $\zeta = 2\pi \frac{T}{T_{30}} + \Delta\Omega_e$ – параметр, що враховує обертання Землі та її несферичність.

Аналіз формули (37) показує, що при зростанні географічної широти ПТ φ_{II} ширина смуги огляду $\Delta\lambda_{oe}(\varphi_{II})$ зменшується і при $\varphi_{II} = i + \psi_\chi$ досягає мінімуму $\Delta\lambda_{oe}(\varphi_{II}) = 0$ (рис. 5а).

Якщо у формули (36) або (37) підставити значення географічної широти ПТ $\varphi_* = i - \psi_\chi$, то отримаємо максимальне значення ширини смуги огляду:

$$\Delta\lambda_{oe}^{max}(\varphi_*) = \arccos\left[1 - \frac{2 \sin\psi_\chi}{\sin i \cos(i - \psi_\chi)}\right] - \frac{\zeta}{2\pi} \arccos\left(1 - \frac{2 \operatorname{tg}\psi_\chi}{\operatorname{tgi}}\right). \quad (38)$$

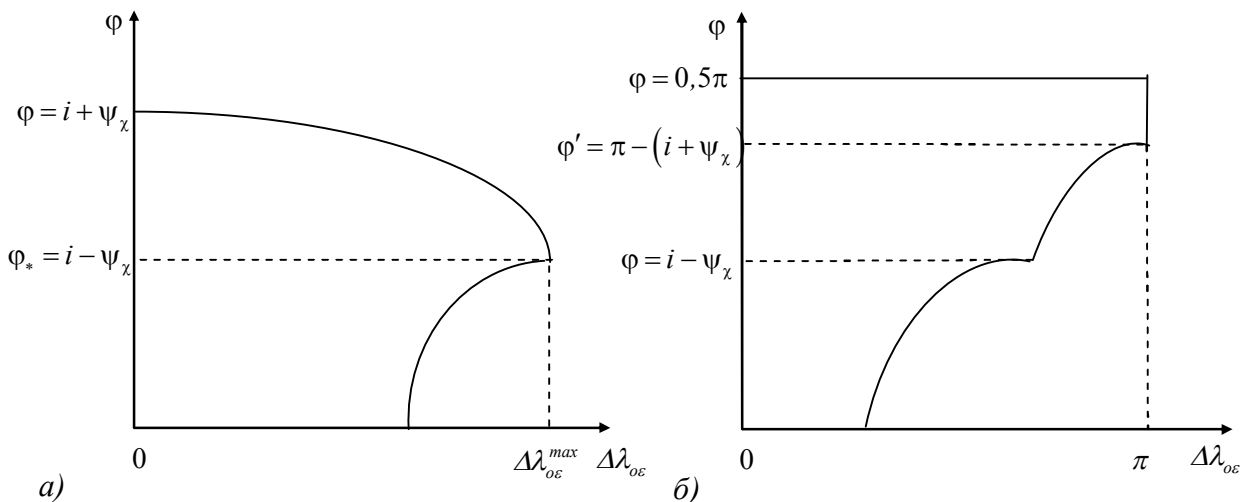


Рис. 5. Графіки залежності ширини смуги огляду від географічної широти

У другому випадку для діапазону географічних широт ПТ $0 \leq \varphi_{III} \leq i - \psi_\chi$ ширину смуги огляду можна розрахувати за формулою (36). При цьому на інтервалі географічних

широт ПТ $i - \psi_\chi \leq \varphi'_{III} \leq \pi - (i + \psi_\chi)$ вона зростатиме за законом (37), причому на широті $\varphi'_{III} = \pi - (i + \psi_\chi)$ вона досягне максимального значення $\Delta\lambda_{oe}^{max}(\varphi'_{III}) = \pi$ (рис. 5б).

При подальшому зростанні широти аж до полюса Землі ширина смуги не змінюватиметься і становитиме $\Delta\lambda_{oe}^{max}(\varphi'_{III}) = \pi$.

На підставі викладеного **географічне положення** смуги огляду на **обертівій несферичній** Землі за аналогією із формулами (28) і (29) необхідно визначати з урахуванням (38) як

$$\lambda_{oe*}^n(\varphi) = \lambda - 0,5\Delta\lambda_{oe*}(\varphi) = \lambda - 0,5[\Delta\lambda'_*(\varphi) - \delta\lambda_o - \delta\lambda_\varepsilon]; \quad (39)$$

$$\lambda_{oe*}^n(\varphi) = \lambda + 0,5\Delta\lambda_{oe*}(\varphi) = \lambda + 0,5[\Delta\lambda'_*(\varphi) - \delta\lambda_o - \delta\lambda_\varepsilon]. \quad (40)$$

Висновки:

1. Розповсюджені на практиці параметри землеогляду доповнені наочними уявленнями й отримали однозначне тлумачення цих понять у порівнянні з цитованими джерелами, що має важливе значення для користувачів ЦІ.

2. Запропонований уточнений, доповнений і систематизований науково-методичний апарат для розрахунків основних параметрів землеогляду може бути основою для моделювання процесів детальних космічних спостережень Землі в надир.

3. Потребує подальшого розвитку аналогічний науково-методичний апарат для моделювання процесів детальних космічних спостережень Землі при відворотах поля зору БЦА від надира, що є предметом подальших досліджень автора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Концепція реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 березня 2011 р. № 238-р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon1.rada.gov.ua>.
2. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2013–2017 роки, затверджена Законом України від 5 вересня 2013 року № 439-VII [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon1.rada.gov.ua>.
3. Сучасні космічні системи оптичної зйомки Землі / А. М. Явтушенко, С. В. Козелков, В. І. Богом'я, С. Д. Ставицький : навч. посіб. – К. : НАОУ, 2004. – 93 с.
4. Фриз П. В. Основи орбітального руху космічних апаратів : підручник / П. В. Фриз. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2012. – 348 с. : іл.
5. Дистанционное зондирование Земли из космоса: получение и использование информации : монография / Е. И. Бушуев, В. И. Волошин, Е.И. Капустин и др. / Под общ. ред. С. П. Мосова. – Днепропетровск : Стилус, 2012. – 320 с.
6. Кусуль Н. М. Можливий підхід до раціонального планування космічної зйомки Землі на основі багатокритерійної оптимізації / Н. М. Кусуль, В. П. Фриз, С. Л. Янчевський // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2011. – Вип. 4. – С. 97–105.

7. Манойлов В. П. Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації : монографія / В. П. Манойлов, В. В. Омельчук, В. В. Опанюк. – Житомир : ЖТДУ, 2008. – 384 с.
8. Фриз С. П. Алгоритм розрахунку площі контрольованої частини заданого району при проведенні зйомки з космічних апаратів / С. П. Фриз // Вісник ЖДТУ. Технічні науки: – Житомир : ЖДТУ, 2012 – Вип. № 1 (60). – С. 69–77.
9. Фриз С. П. Можливий підхід до планування спостережень космічними апаратами / С. П. Фриз, В. В. Петрожалко, В. В. Ожінський // Проблеми створення, випробовування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2011. – Вип. 4. – С. 87–96.
10. Дистанційне зондування Землі. Терміни та визначення понять: ДСТУ 4220 – 2003. – [Чинний від 2004–10–01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2003. – 17 с. : табл. – (Національний стандарт України).
11. Фриз П. В. Систематизований математичний апарат для розрахунків розмірів контрольованих ділянок земної поверхні при космічних спостереженнях конічною зоною огляду в надир / П. В. Фриз // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2012. – Вип. 4 (63). – С. 118–127.
12. Фриз П. В. Удосконалений математичний апарат для розрахунків розмірів контрольованої ділянки земної поверхні при космічних спостереженнях пірамідальною зоною огляду / П. В. Фриз // Проблеми створення, випробовування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2012. – Вип. 6. – С. 113–127.

Подано 06.08.13

С. П. Фриз

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕОБЗОРА В ЗАДАЧАХ ДЕТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Предложен систематизированный научно-методический аппарат для расчетов параметров землеобзора в задачах детальных космических наблюдений наземных объектов с использованием бортовой целевой аппаратуры оптико-электронного типа при ориентации ее поля зрения в надир.

S. P. Frees

RESEARCH AND SYSTEMATIC APPARATUS FOR CALCULATION OF PARAMETERS OF LAND IN REVIEW PROBLEMS DETAILED SPACE OBSERVATIONS

Proposed systematic scientific methodological apparatus for calculating the parameters of the review of land in problems detailed space-based observations of terrestrial objects using board target equipment optoelectronic type orientation at her field of vision at the nadir.