

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.5.140106

УДК 681.78

Б.Ю. Пінчук^{1,2*}, В.Г. Колобродов², В.М. Тягун^{1,2}

¹Казенне підприємство спеціального приладобудування “Арсенал”, Київ, Україна

²КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ВПЛИВ КУТІВ ВІЗУВАННЯ ТА КРИВИЗНИ ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ НА ПРОСТОРОВЕ РОЗДІЛЕННЯ КОСМІЧНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Проблематика. Однією з ключових відмінностей між авіаційними і космічними оптико-електронними системами спостереження (ОЕСС) дистанційного зондування Землі є висота, з якої проводиться зйомка земної поверхні. Різниця між висотами авіаційних і космічних приладів може досягати декількох порядків, тому якщо для авіаційних ОЕСС ще можна розраховувати просторове розділення на площині, то для космічних ОЕСС це є критичним і необхідно додатково враховувати кривизну поверхні Землі, особливо при кутах візування, відмінних від нуля.

Мета дослідження. Розробка фізико-математичної моделі для визначення роздільної здатності ОЕСС, яка враховує кривизну поверхні Землі, орбітальну висоту та координати положення космічного апарата при різних кутах візування.

Методика реалізації. В основі фізико-математичної моделі запропоновано використовувати двовісний еліпсоїд як апроксимацію форми Землі для визначення її кривизни та траєкторію сонячно-синхронної орбіти.

Результати дослідження. Практичні результати розрахунків доводять, що кривизна поверхні Землі для космічних ОЕСС суттєво впливає на просторове розділення і відрізняється від результатів, отримуваних фізико-математичною моделлю, в якій просторове розділення визначається на плоскій поверхні. Результати проектування показують, що при відхиленні за кутами візування необхідно при розрахунках врахувати додаткове відхилення, яке збільшується при віддаленні від надира. На максимальних кутах візування тангажа і крена по $\pm 35^\circ$, тобто коли ОЕСС відхилена на $44,7^\circ$ від надира, додаткове відхилення становить $6,3^\circ$, що суттєво впливає на визначення просторового розділення.

Висновки. Аналіз запропонованої фізико-математичної моделі ОЕСС показав, що кривизна поверхні Землі, траєкторія орбіти і розташування космічного апарата, на відміну від висоти, впливають на деформацію форми проекції пікселів. При цьому значення кутів відхилення проекції рядків і колонок матричного приймача випромінювання відносно напрямку польоту змінюються нелінійно, що негативно впливає на модуляційну передавальну функцію системи і вимагає калібрування деяких параметрів у процесі польоту залежно від кутів візування і координат розташування.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі; просторове розділення; кути візування; проекція пікселів; кривизна поверхні Землі.

Вступ

Збільшення кількості супутників для дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) розширює і вибір продукції для користувача, який своєю чергою підвищує вимоги до якості отриманого зображення. На сьогодні, з огляду на сучасні вимоги, вже не достатньо просто розробити оптичну систему високої ефективності, тобто від розробника вимагається додатково підтримувати свій продукт. Під підтримкою продукту розуміється радіометричне і геометричне калібрування отриманих даних [1, 2]. Наприклад, одним із видів геометричного калібрування є географічна прив'язка, яка являє собою відповідність між системою координат зображення і географічною системою координат земної поверхні (ЗП) [3]. Отже, розраховуючи геометрію,

яка описує розташування центрів проекцій пікселів матричного приймача випромінювання (МПВ) відносно точки надира, можна встановити географічну прив'язку. За допомогою даних географічної прив'язки та раціональних поліноміальних коефіцієнтів (RPC) можна проводити фотограмметричну обробку зображення з усуненням спотворення та приведенням до вигляду, з яким користувачу зручно працювати [4, 5].

Ще однією з вимог є зйомка космічним апаратом (КА) відповідної місцевості під різними кутами візування. Тому однією з основних задач, яка ставиться в цьому випадку, є точне визначення спотворення проекції пікселів МПВ з урахуванням кривизни ЗП при відхиленні від надира. Точне визначення деформованої форми проекції МПВ дасть змогу роз-

* corresponding author: pinchuk.brus@gmail.com

рахувати й оцінити погіршення якості зображення, яка характеризуватиметься модуляційною передавальною функцією (МПФ).

Аналіз оптичної системи за МПФ дасть змогу не тільки оцінити, як система передає зображення об'єкта, а й встановити ефективний діапазон зміни для деяких конструктивних параметрів системи. При відхиленні осі КА від надира на максимальні кути насамперед матимемо різні проекції пікселів і несиметричне розміщення їх центрів, що своєю чергою говорить про те, що МПФ (навіть при ідеальному об'єкті) відрізнятиметься по всьому МПВ, і відмінність буде тим більшою, чим далі знаходяться проекції пікселів від надира. Тому можна вважати справедливим твердження про те, що чим більша відмінність МПФ по всьому тлі зображення, тим гірше сприйняття зображення спостерігачем. Наприклад, якщо використовується МПВ з великою кількістю елементів, а вісь КА максимально відхилена від надира, і в результаті розрахунків було отримано, що для крайніх 10 % елементів якість зображення неприйнятна, то це означає, що при зменшенні кількості елементів можна отримувати таку ж саму кількість корисної інформації з меншими економічними та енергетичними затратами.

Постановка задачі

Стаття присвячена розробці методу визначення просторової роздільної здатності космічної оптико-електронної системи спостереження. Мета дослідження полягає в розробці фізико-математичної моделі для розрахунку роздільної здатності системи спостереження, яка враховує форму Землі, висоту та координати положення КА при різних кутах візування.

Геометрична схема розташування космічного апарата відносно Землі

Розглянемо рис. 1, де A – розташування КА, B – точка спостереження, O – центр Землі, O' – точка надира, $H = AO'$ – висота КА, $R = OB$ – радіус Землі, $(90^\circ - \alpha)$ – нахил горизонту. В цьому випадку, для пояснення основної ідеї, форма Землі покладається у вигляді сфероїда, а в подальших дослідженнях буде використовуватися двовісний еліпсоїд, у геодезії ж використовують форму геоїда та квазі-геоїда [6].

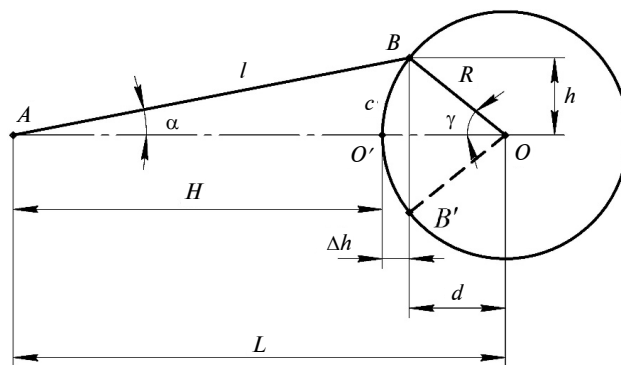


Рис. 1. Геометрична схема для визначення залежності між кутами α і γ

Згідно з рис. 1 запишемо такі формули:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{h}{H + \Delta h}, \quad (1)$$

$$\sin(\gamma) = \frac{h}{R}, \quad (2)$$

$$\Delta h = R(1 - \cos(\gamma)). \quad (3)$$

У цьому випадку кут α є результатом відхилення осі візування від надира (залежно від заданих тангажа і крена), а γ є кутом, за яким визначаються координати точки B на сфері. Ці кути взаємозалежні, а отже, для визначення лінійних координат відповідних точок, з яких визначатиметься просторове розділення, необхідно знати кутові координати пікселя α_{ij} .

Маючи основні формули (1)–(3), можемо встановити залежність кутів α і γ :

$$\sin(\gamma) \operatorname{ctg}(\alpha) + \cos(\gamma) = \frac{H + R}{R}. \quad (4)$$

Важливим для подальших розрахунків є кут γ , для визначення якого скористаємося методом Юніса [7]:

$$a \sin(x) \pm b \cos(x) = \sqrt{a^2 + b^2} \left\{ \begin{array}{l} \sin \\ \cos \end{array} \right\} \left(x \pm \left\{ \begin{array}{l} \arcsin \\ -\arccos \end{array} \right\} \left(\frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \right).$$

Застосовуючи метод Юніса, перепишемо (4) у вигляді

$$\frac{\sin(\gamma + \alpha)}{\sin(\alpha)} = \frac{H + R}{R}. \quad (5)$$

Кут α своєю чергою накладає обмеження на максимальний кут відхилення КА від надира, при якому можна розрахувати проекцію

пікселя. Тому знайдемо максимально допустимий кут відхилення КА α_{\max} . Із рис. 1 маємо, що максимальний кут буде за умови, коли AB буде дотичною до кола, яка проходить через точку A , причому $AB \perp OB$. Згідно з побудовою, для визначення α_{\max} можемо записати

$$\gamma + \alpha = 90^\circ. \quad (6)$$

Підставимо (6) у (4) і отримаємо

$$\begin{cases} \cos(\gamma_{\max}) \\ \sin(\alpha_{\max}) \end{cases} = \frac{R}{H + R}. \quad (7)$$

Точні розрахунки вимагають використовувати форму Землі, описану двовісним еліпсоїдом, а наведені вище формули наведені для сфери, тому, щоб зберегти точність, нам необхідно апроксимувати форму Землі у відповідній точці деякою сферою. Це означає, що необхідно знати розташування КА (широту Землі) і вираховувати кривизну Землі в точці надира. Оскільки радіус Землі доволі великий $R_3 = 6371,032$ км (базове, прийняте середнє значення), то кривизна змінюється “повільно”. Радіус Землі біля полюсів $R_{\min} = 6356,777$ км і на екваторі $R_{\max} = 6378,160$ км. Знаючи радіуси Землі, запишемо формулу, яка описувала б залежність її радіуса від широти γ :

$$\begin{cases} R_t(\gamma) = \sqrt{R_x^2(\gamma) + R_y^2(\gamma)}, \\ \begin{cases} R_x(\gamma) = R_{\min} \sin(\gamma), \\ R_y(\gamma) = R_{\max} \cos(\gamma). \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

Коефіцієнт кривизни кривої в параметрично заданому вигляді [8]:

$$K(\gamma) = \frac{\left| \frac{d^2}{d\gamma^2} R_y(\gamma) \cdot \frac{d}{d\gamma} R_x(\gamma) - \frac{d^2}{d\gamma^2} R_x(\gamma) \cdot \frac{d}{d\gamma} R_y(\gamma) \right|}{\left(\left(\frac{d}{d\gamma} R_x(\gamma) \right)^2 + \left(\frac{d}{d\gamma} R_y(\gamma) \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}.$$

Підставивши у наведену вище формулу коефіцієнта кривизни формули (8) і спростивши вираз, отримаємо радіус кривизни Землі у відповідній точці:

$$\begin{aligned} R_k(\gamma) &= \frac{1}{K(\gamma)} = \\ &= \frac{1}{|R_{\min} R_{\max}|} (R_{\min}^2 + R_{\max}^2 - R_t^2(\gamma))^{\frac{3}{2}} = \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{|R_{\min} R_{\max}|} (R_{\min}^2 \cos^2(\gamma) + R_{\max}^2 \sin^2(\gamma))^{\frac{3}{2}}. \quad (9)$$

Таким чином, знаючи, на якій широті знаходиться КА, за формулою (9) можна визначити радіус кривизни Землі в точці надира. Розрахунки за формулою (9) показали, що радіус кривизни Землі на полюсі становить 6399,615 км, а на екваторі 6335,466 км, тобто, знаходячись на полюсі, поверхню в заданій точці можна апроксимувати сферою радіусом у 6399,615 км. Пояснення всіх радіусів Землі схематично подано на рис. 2.

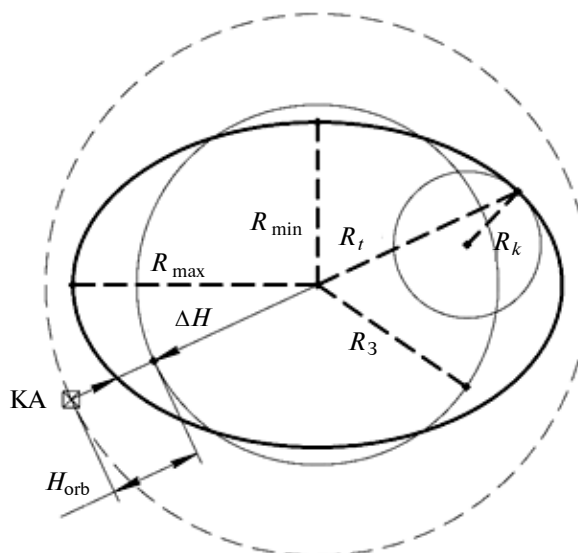


Рис. 2. Радіуси Землі і орбіта космічного апарата

Значення R_t дорівнює радіусу Землі R_3 на широті $35,288^\circ$, а радіус кривизни R_k – на широті $48,149^\circ$. Зауважимо, що параметр R_t важливий для розрахунку швидкості підсупутникової точки, а R_k – для точного розрахунку форми проєкції пікселів з урахуванням кривизни ЗП.

Похибка висоти ΔH важлива для визначення висоти КА і розраховується як

$$\Delta H(\gamma) = R_t(\gamma) - R_3. \quad (10)$$

Нехай КА летить по траєкторії сонячно-синхронної орбіти, яка зазвичай описується колом або траєкторією, дуже близькою до кола. Згідно з теорією орбітального руху, КА повинен мати сталу швидкість польоту при сталому радіусу орбіти (відстань від центра мас Землі до КА), і при зміні цього радіуса змінюється орбітальна швидкість КА. Відзначимо, що орбітальна висота є сталою величиною і не зале-

жить від координат КА (широти і довготи), на відміну від висоти КА. Тобто орбітальна висота H_{orb} (рис. 2) прив'язується до базової R_3 , що відповідає відстані від КА до точки на ЗП, яка апроксимована сферою радіусом R_3 . Реальна ж висота КА $H_{КА}$ залежить від координат КА, тобто це відстань від КА до точки на ЗП, і дорівнює

$$H_{КА}(\gamma) = H_{orb} + \Delta H(\gamma). \quad (11)$$

Значення реальної висоти $H_{КА}$ важливе для визначення проекції пікселів, а (11) говорить нам про те, що при руху по орбіті проекція пікселів буде залежати від широти (ландшафт у цьому випадку не враховується). Різниця між висотами на полюсі і екваторі становить ~ 21 км, а різниця кривизни, відповідно, ~ 64 км. Отже, з (9) і (11) можна зробити висновки, що $H_{КА}$ є масштабуючим коефіцієнтом для величини проекції пікселя, а R_k впливає на деформацію саме форми проекції.

Просторове розділення системи з урахуванням кривизни Землі

Розглянемо рис. 3, де A – розташування КА, B і C – точки, що знаходяться на поверхні Землі та визначатимуть просторове розділення, O – центр Землі, $H_{КА} = AD$ – висота КА, $R_k = OB = OC = OD$ – радіус кривизни Землі, l_{ij} – відстані від КА до точок B і C , α_{ij} – кути відхилення точок B і C проекції пікселя від лінії надира AD , γ_{ij} – відповідні кути (до α_{ij}) усередині апроксимованої сфери, ω_i – миттєве поле зору пікселя по одній із координат, β – еквівалентний кут ω_i усередині сфери.

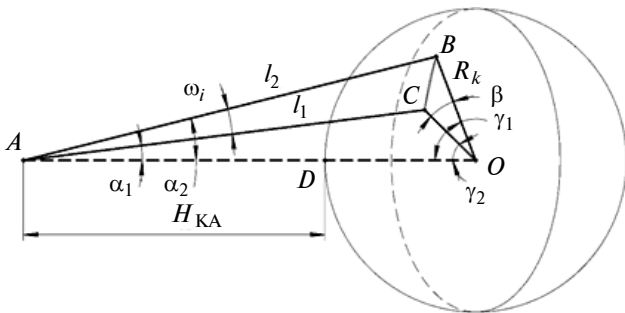


Рис. 3. Геометрія визначення просторового розділення

На рис. 3 зображено дугу $\cap BC$, яка проходить по поверхні Землі і є найкоротшою

відстанню між двома точками, а BC – пряма лінія (хорда), яка з'єднує дві точки B і C . Оскільки R_k доволі велике значення, то значення довжин $\cap BC \approx BC$, де L – довжина дуги $\cap BC$, а t – довжина хорди BC .

Посилаючись на математичну модель розрахунку проекції пікселів на ЗП у статті [9], яка побудована на теорії кутового руху, запишемо алгоритм отримання кутів α_i .

Розглянемо рис. 4, де D – центр об'єктива, OA і OC – осі координат у площині МПВ, $AOCB$ – фокальна площина об'єктива і площина МПВ, OD – фокусна відстань об'єктива, B – центр деякого пікселя МПВ.

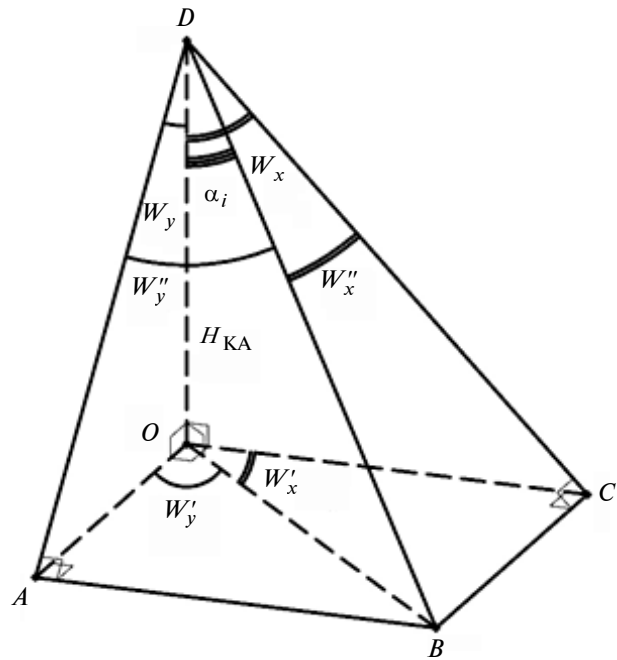


Рис. 4. Пояснення кутових координат центрів пікселів

Задаємо порядок нумерації пікселів: $i = \overline{0, p_D - 1}$ і $j = \overline{0, q_D - 1}$. Визначаємо крайні значення знаходження центра пікселя:

$$\begin{pmatrix} L_{p0} \\ L_{q0} \end{pmatrix} = 0,5 \begin{pmatrix} V_D \\ W_D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 - p_D \\ 1 - q_D \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} dL_p \\ dL_q \end{pmatrix},$$

де $dL_{p,q}$ – лінійне зміщення центра МПВ по відповідних осях координат; $v_D \times w_D$ – розмір чутливого елемента пікселя, а $V_D \times W_D$ – період чутливих елементів; p_D і q_D – кількість активних елементів розкладу (пікселів) по вертикалі

(осі Ox) і горизонталі (осі Oy) відповідно; f'_o – фокусна відстань об'єктива.

Розрахуємо значення розміщення кожного пікселя:

$$\begin{pmatrix} L_{pi} \\ L_{qj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{p0} \\ L_{q0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_D \\ W_D \end{pmatrix}.$$

Перейдемо від лінійних розмірів розміщення пікселів до кутових:

$$\text{tg} \begin{pmatrix} W_{xi} \\ W_{yj} \end{pmatrix} = \frac{1}{f'_o} \begin{pmatrix} L_{pi} \\ L_{qj} \end{pmatrix}.$$

Оскільки проєкції координат на осі Oxy відомі, то реальні значення (див. рис. 4) будуть

$$\text{tg} \begin{pmatrix} W''_{xi} \\ W''_{yj} \end{pmatrix} = \text{tg} \begin{pmatrix} W_{yj} \\ W_{xi} \end{pmatrix} \cos \begin{pmatrix} W_{xi} \\ W_{yj} \end{pmatrix}.$$

Миттєве поле зору $\omega_{x,y}$ – проєкція $\omega^r_{x,y}$ реального кутового розміру чутливого елемента МПВ на одну із осей для деякого пікселя:

$$\begin{aligned} \text{ctg} \begin{pmatrix} \omega_{xi} \\ \omega_{yj} \end{pmatrix} &= \\ &= f'_o \left(\frac{1/(V_D \cdot \cos^2(W_{xi}))}{1/(W_D \cdot \cos^2(W_{yj}))} \right) - \frac{1}{4f'_o} \begin{pmatrix} V_D \\ W_D \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

При цьому реальне кутове розділення позаосьового пікселя визначатиметься

$$\begin{aligned} \text{ctg} \begin{pmatrix} \omega^r_{xi} \\ \omega^r_{yj} \end{pmatrix} &= f'_o \left(\frac{1/(V_D \cdot \cos^2(W''_{xi}) \cdot \cos(W''_{yj}))}{1/(W_D \cdot \cos^2(W''_{yj}) \cdot \cos(W''_{xi}))} \right) - \\ &- \frac{1}{4f'_o} \begin{pmatrix} V_D \cdot \cos(W''_{yj}) \\ W_D \cdot \cos(W''_{xi}) \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Окрім миттєвого поля зору, необхідно визначити різницю кутів ω_{lx} і ω_{rx} (які утворюються поділом пікселя його геометричним центром “0” (рис. 5)), що дасть нам змогу розрахувати крайні точки проєкцій пікселів:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \Delta\omega_{xi} \\ \Delta\omega_{yj} \end{pmatrix} &= \text{sign} \begin{pmatrix} W_{xi} \\ W_{yj} \end{pmatrix} \times \\ &\times \arccos \left(\frac{1}{2f'_o} \begin{pmatrix} V_D \\ W_D \end{pmatrix} \cos^2 \begin{pmatrix} W_{xi} \\ W_{yj} \end{pmatrix} \sin \begin{pmatrix} \omega_{xi} \\ \omega_{yj} \end{pmatrix} \right) + \end{aligned}$$

$$+ \cos \begin{pmatrix} \omega_{xi} \\ \omega_{yj} \end{pmatrix},$$

де $\text{sign}(x)$ – функція визначення знака числа, яка набуває значення $-1, 0$ і $+1$ при $x < 0, x = 0$ і $x > 0$ відповідно.

На рис. 5 зображені 9 точок, які умовно розділені на рівні їх розміщення $m_{x,y}$ (табл. 1). Запишемо через $W^1_{x,y}$ значення координат точок пікселя:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} W^1_{xi}(m_x) \\ W^1_{yj}(m_y) \end{pmatrix} &= \\ &= \begin{pmatrix} W_{xi} \\ W_{yj} \end{pmatrix} + 0,5 \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} \omega_{xi} \\ \omega_{yj} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\omega_{xi} \\ \Delta\omega_{yj} \end{pmatrix} \right). \end{aligned}$$

Зауважимо, що для $W^1_{x,y}$ (і для $W^2_{x,y}$ далі) позначення “1” та “2” – це не степінь, а лише індекс.

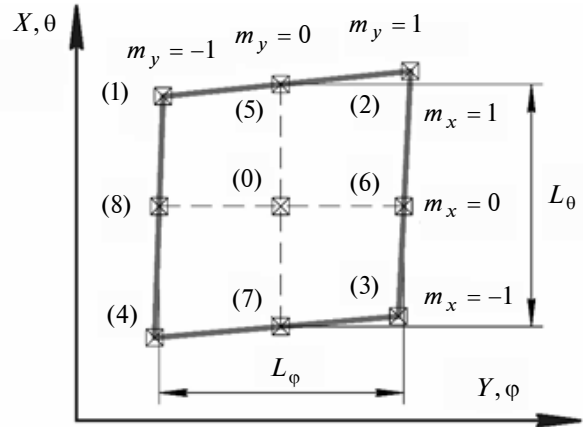


Рис. 5. Проєкція пікселя на земну поверхню

Таблиця 1. Координати точок проєкції пікселя

Для визначення роздільної здатності			Для визначення країв проєкції пікселя		
Точки	m_x	m_y	Точки	m_x	m_y
(5)	+1	0	(1)	+1	-1
(7)	-1	0	(2)	+1	+1
(6)	0	+1	(3)	-1	+1
(8)	0	-1	(4)	-1	-1

Крен ϕ – це кут повороту КА навколо повздовжньої осі, напрямком якої збігається з

напрямок польоту, тангаж θ – кут повороту навколо поперечної осі, а рискання ψ – кут повороту навколо нормальної осі.

Після повороту за кутом рискання значення координат точок пікселя $W_{x,y}^2$ дорівнюватимуть

$$\begin{pmatrix} W_{xi}^2(m_x, m_y) \\ W_{yj}^2(m_x, m_y) \end{pmatrix} = \arctg \left[\begin{matrix} \operatorname{tg} \left(\frac{W_{xi}^1(m_x)}{W_{yj}^1(m_y)} \right) \cos(\psi) + \\ + \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} \operatorname{tg} \left(\frac{W_{yj}^1(m_y)}{W_{xi}^1(m_x)} \right) \sin(\psi) \end{matrix} \right].$$

Тоді після повороту за кутами тангажа і крена (з урахуванням порядку відхилення) значення координат точок дорівнюватимуть (для прикладу взято порядок “тангаж–крен”)

$$\begin{aligned} \varphi_{2ij}(m_x, m_y) &= \\ &= \varphi + \arctg \left(\frac{\operatorname{tg}(W_{yj}^2(m_x, m_y)) \cos(W_{xi}^2(m_x, m_y))}{\cos(W_{xi}^2(m_x, m_y) + \varphi'')} \right), \\ \theta_{2ij}(m_x, m_y) &= \\ &= \arctg \left(\frac{\operatorname{tg}(W_{xi}^2(m_x, m_y) + \varphi'')}{\cos(\varphi_{2ij}(m_x, m_y))} \cos(\varphi_{2ij}(m_x, m_y) - \varphi) \right), \end{aligned}$$

де

$$\operatorname{tg} \begin{pmatrix} \theta'' \\ \varphi'' \end{pmatrix} = \operatorname{tg} \begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \end{pmatrix} \cos \begin{pmatrix} \theta \\ \varphi \end{pmatrix}.$$

Визначивши кутові координати всіх точок проекцій пікселів, можемо розрахувати їх відхилення від надира:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}^2(\alpha_{ij}(m_x, m_y)) &= \\ &= \operatorname{tg}^2(\theta_{2ij}(m_x, m_y)) + \operatorname{tg}^2(\varphi_{2ij}(m_x, m_y)). \quad (12) \end{aligned}$$

Отже, ми отримали необхідний нам кут α_{ij} за (12), тоді за (5) вираховуємо γ_{ij} :

$$\gamma_{ij} = \arcsin \left(\sin(\alpha_{ij}) \frac{H_{KA} + R_k}{R_k} \right) - \alpha_{ij}. \quad (13)$$

Згідно з рис. 3, ми можемо розрахувати відстані l_{ij} :

$$l_{ij} = \frac{1}{\cos(\alpha_{ij})} (H_{KA} + R_k (1 - \cos(\gamma_{ij}))). \quad (14)$$

За рис. 3, ми маємо 2 трикутники $\triangle ACB$ і $\triangle OCB$ (рівнобедрений), у яких сторона $BC = t$ спільна. Сторона BC визначається за теоремою косинусів:

$$t_{ij} = \sqrt{l_{1ij}^2 + l_{2ij}^2 - 2l_{1ij}l_{2ij} \cos(\omega_{ij}^r)}. \quad (15)$$

Кут, який відповідає миттєвому полю зору пікселя (див. рис. 3), становить:

$$\beta_{ij} = 2 \arcsin \left(\frac{t_{ij}}{2R_k} \right). \quad (16)$$

У результаті в секторі OCB всі сторони дорівнюють R_k . Тоді можемо визначити довжину дуги $\cap BC$:

$$L_{ij} = R_k \beta_{ij}. \quad (17)$$

Кути нахилу колонок і рядків проекції матричного приймача випромінювання

На рис. 6 зображені осі координат ЗП, причому вісь Ox спрямована вздовж напрямку польоту КА. Біля осей координат позначаються і кути візування, по яких відбулося відхилення. Центр проекції пікселя визначається перетином діагоналей, проведених від кутів проекції пікселя. Товста суцільна лінія зображує проекцію кожного елемента МПВ, а тонкою лінією показано умовне з'єднання центрів проекцій пікселів. Утворений при цьому кут до осі Ox визначає відхилення рядка φ_r (колонки φ_c) від напрямку польоту.

Повернемося до прикладу, зображеного на рис. 6. По осі Oy знаходяться q_D елементів, а по осі Ox – $p_D = N_{TDI}$ елементів (де N_{TDI} – кількість TDI-регістрів у колонці). Принцип дії ПЗЗ-лінійки полягає в тому, що TDI розміщені вздовж напрямку польоту, при цьому спочатку ЗП сканує перший рядок (розміщений із самого верху), після чого, згідно з принципом дії ПЗЗ-приймачів, інформація, яка знаходилась у першому рядку, паралельно переноситься в другий рядок. Паралельно перенесенню заряду між регістрами елементів відбувається часова затримка, при якій інформація не потрапляє на МПВ. Після часової затримки МПВ знову сприймає інформацію, при цьому за час, який відповідає часовій затримці, КА перемістився в таке положення, при якому другий рядок сканує ту ж саму поверхню, що сканував перший рядок; у той же час перший рядок сканує

нову частину ЗП. Під час сканування другим рядком інформація в кожному елементі накопичується і когерентно складається. Аналогічно відбувається і з усіма наступними рядками, і лише в останньому інформація зчитується та перетворюється на електричний сигнал. Така технологія сканування дає змогу без втрати просторового розділення збільшити час експозиції і відношення сигнал/шум у $\sqrt{N_{\text{TDI}}}$ разів.

Ця умова ідеально виконується, коли кути візування дорівнюють нулю, а середня швидкість зображення дорівнює швидкості руху зарядових елементів [10, 11].

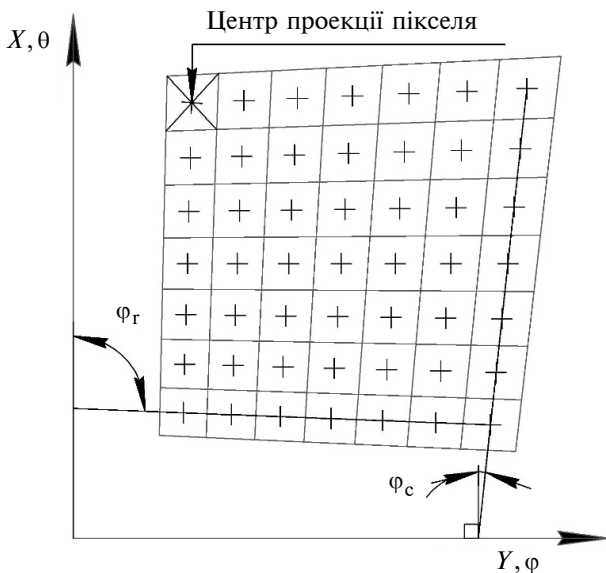


Рис. 6. Проекція матричного приймача випромінювання на земну поверхню

У цьому випадку кути візування – невеликі, тому і спотворення проєкцій є незначними, але все ж таки помітними для пояснення прикладу (див. рис. 6). При більших кутах візування умовні лінії центрів пікселів все більше відхилятимуться, збільшуючи свої кути φ_r і φ_c відносно напрямку польоту. Зауважимо, що при моделюванні на плоскій ЗП умовно проведена через центри пікселів по рядку чи колонці лінія є прямою і не перетворюється на криву. Оскільки умовна штрихова лінія відхиляється, то центри пікселів під час сканування в режимі TDI відповідної ділянки відрізнятимуться. Якщо припустити, що проєкції пікселів для однієї з колонок приблизно однакові, то навіть саме зміщення центрів пікселів цієї ж колонки від першого до останнього вносить все більше завад, що призводить до спотворення корисно-

го сигналу. Це відбувається тому, що відповідний піксель сканує частину ЗП, яку попередньо сканував піксель сусідньої колонки попереднього рядка. Можливо, в цьому випадку виявиться ефективним використання неповного коефіцієнта заповнення пікселя, тобто $v_D < V_D$ і $w_D < W_D$, але для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати доворот КА за кутом рискання для корегування нахилу умовної лінії. Тому в цьому випадку актуальною є задача – визначення кутів відхилення для рядків і колонок (РіК) МПВ залежно від зміни кутів візування.

На цьому етапі для пояснення визначення кутів відхилення РіК опустимо їх розрахунок на сфері, тобто з урахуванням кривизни повною мірою, а враховуватимемо її частково – апроксимуючи нахиленою площиною. Покладається, що відстань між проєкціями пікселів на ЗП умовно невелика і проєкція всього приймача кладеться на поверхню, яка близька до площини, і в цьому випадку можна розраховувати проєкцію як на плоскій поверхні. В іншому випадку, при відхиленні від надира за певними кутами візування, центр проєкції МПВ зміщується на значно більшу величину, ніж розмір проєкції всієї МПВ, але допускається, що в новому місці поверхня, яку охоплює проєкція МПВ, плоска, але нахилена під деяким кутом відносно площини в надирі. Площину, яку охоплює проєкція МПВ, визначатимемо як плоску поверхню, яка є дотичною до сфери в точці центра проєкції МПВ.

Згідно з рис. 7, нам необхідно визначити $\angle D'$, що є двограним кутом між площиною в надирі b і апроксимуючою площиною $C'B$, яка є дотичною до сфери в точці C' . Опустимо доведення через простоту доказів, а запишемо лише результат. Розглядаючи $\triangle OC'E$ ($\angle OC'E = 90^\circ$) і його висоту $C'C = c$, можна довести, що $\angle EOC' = \angle CC'E = \gamma$. Розглядаючи подібні трикутники $\triangle OC'E$ і $\triangle ABE$, маємо, що $\angle BAE = \angle C'OE = \gamma$. Прямі a , b і c – паралельні, тому $\angle CC'E = \angle D' = \angle E = \gamma$. У цьому випадку α є кутом відхилення КА від надира $AD = H_{\text{КА}}$. Повертаючись до розрахунку проєкції МПВ на площині без урахування кривизни, можна сказати, що відхилення від надира на $\angle \alpha$ еквівалентне випадку, коли б ми зробили переріз під $\angle \alpha$ на деякій відстані від точки A через точку E на прямій надира AD . Тому, виходячи з цього, можна вважати, що $\angle D' = \gamma = \angle EAB$ –

це додаткове відхилення КА від надира. Звідси маємо, що розраховувати проєкції пікселів необхідно на площині з кутом відхилення КА:

$$\alpha' = \alpha + \gamma. \quad (18)$$

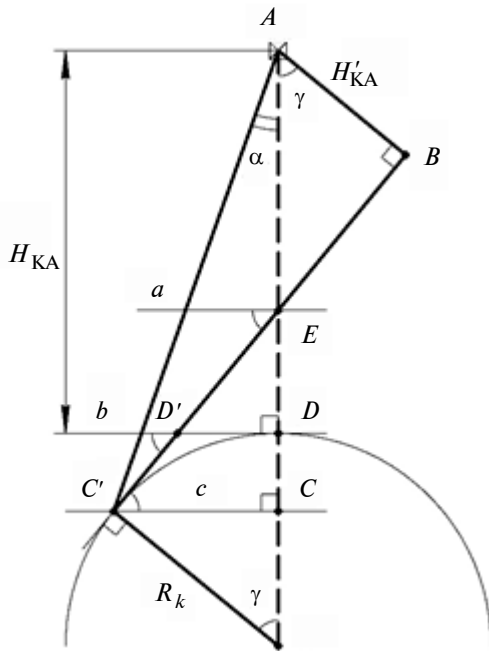


Рис. 7. Апроксимація кривизни нахиленою площиною

Відомо, що вимоги до нахилу КА за кутами візування для тангажа і крена становлять до $\pm 45^\circ$, але зазвичай $\pm 35^\circ$. Тому наведемо графік, який показуватиме, який кут становитиме апроксимована площина з площиною в надирі (рис. 8). Для прикладу візьмемо $R_k = R_3 = 6371,032$ км, $H_{КА} = 668$ км і розрахуємо за формулою

$$\gamma = \arcsin\left(\sin(\alpha) \frac{H_{КА} + R_k}{R_k}\right) - \alpha. \quad (19)$$

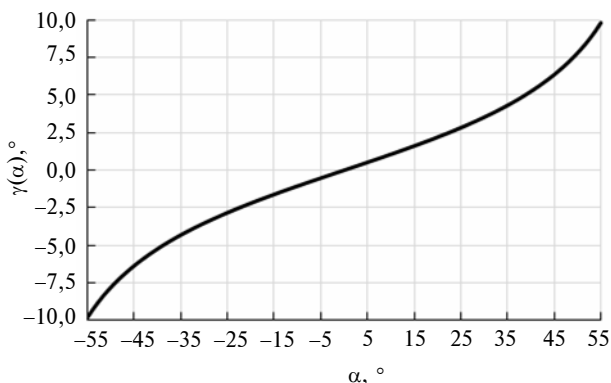


Рис. 8. Додаткове відхилення космічного апарата

Подібно до (12) знаходимо кут нахилу КА [6]:

$$\alpha = \arctg(\sqrt{\tg^2(\theta) + \tg^2(\varphi)}). \quad (20)$$

Маємо, що для кутів тангажа і крена по $\pm 35^\circ$ (для α це $44,719^\circ$) додаткове відхилення становить $6,305^\circ$, що суттєво впливатиме на проєкцію пікселя.

З рис. 7 видно, що висота до апроксимованої площини, на якій розраховується проєкція, дорівнює $H'_{КА}$. Відомо, що висота є масштабуючим коефіцієнтом, а тому її визначення важливе для точного розрахунку просторового розділення. Розглянемо $\triangle AC'B$ і $\triangle C'AC$, де $C'A$ є спільною гіпотенузою. Звідси висота розраховується як

$$H'_{КА} = (H_{КА} + R_k(1 - \cos(\gamma))) \frac{\cos(\alpha + \gamma)}{\cos(\alpha)}. \quad (21)$$

Відповідно до сказаного вище, γ є двограним кутом між двома площинами, а також результуючим кутом додаткового нахилу по двох координатних осях у напрямку і поперек польоту. Оскільки кути тангажа θ і крена φ є основними для розрахунку деформації проєкції МПВ, то визначимо із результуючого кута γ величину необхідного додатково відхилення по кожному із кутів, тобто знайдемо $\Delta\theta$ і $\Delta\varphi$.

Представимо перетин двох площин, як зображено на рис. 9, де a , b і c – сторони рівнобедреного сферичного трикутника, причому кути при основі α' і β' – рівні. Запишемо теорему косинусів для сферичних трикутників [9]:

$$\cos(c) = \cos(a)\cos(b) + \sin(a)\sin(b)\cos(\gamma').$$

Оскільки це сферичний рівнобедрений трикутник, то $a = b = \varphi$. Зробивши деякі спрощення, можна записати, що:

$$\sin\left(\frac{c}{2}\right) = \sin(\varphi)\sin\left(\frac{\gamma'}{2}\right).$$

З рис. 9 видно, що лінія перетину двох площин, яка збігається з віссю Oy , має перпендикуляр, у площині якого завжди знаходиться максимальний кут відхилення між двома площинами. Якщо ж система нахилена за двома кутами, то перпендикуляр до лінії перетину двох площин з віссю Ox становить φ' градусів, які вираховуються за формулою (з рис. 4, де φ' відповідатиме W'_y , $\theta \rightarrow W_x$, а $\varphi \rightarrow W_y$):

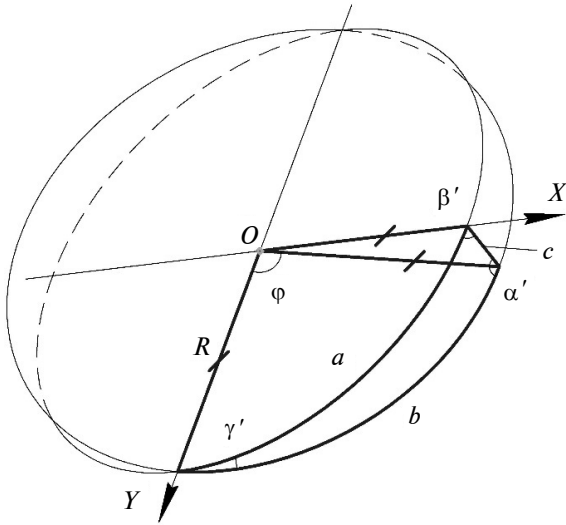


Рис. 9. Двогранний кут між площиною в надирі й апроксимуючою площиною, яка є дотичною до Землі в точці C'

$$\operatorname{tg}(\theta) = \operatorname{tg}(\varphi') \operatorname{tg}(\varphi) = \operatorname{tg}(\alpha) \sin(\varphi'). \quad (22)$$

Враховуючи дані рис. 7, маємо, що кут $\gamma' = \gamma$. Отже, результуюча формула при відхиленні на два кути має вигляд

$$c = 2 \arcsin(\sin(\varphi' + \varphi) \sin(0,5\gamma)). \quad (23)$$

У напрямку польоту $\varphi = 0^\circ$, тоді додатковий доворот по тангажі:

$$\Delta\theta = 2 \arcsin(\sin(\varphi') \sin(0,5\gamma)). \quad (24)$$

Поперек польоту $\varphi = 90^\circ$, тоді додатковий доворот по крену:

$$\Delta\varphi = 2 \arcsin(\cos(\varphi') \sin(0,5\gamma)). \quad (25)$$

У результаті з (22) знайдемо кут φ' :

$$\varphi' = \begin{cases} 0, & \text{при } \theta = 0 \text{ і } \varphi \in [0, 0,5\pi), \\ \pi, & \text{при } \theta = 0 \text{ і } \varphi \in (-0,5\pi, 0), \\ 0,5\pi \cdot \operatorname{sign}(\theta), & \text{при } \theta \neq 0 \text{ і } |\theta| < 0,5\pi \text{ і } \varphi = 0, \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}(\theta)}{\operatorname{tg}(\varphi)}\right), & \text{при } |\theta| \in (0, 0,5\pi) \text{ і } \varphi \in (0, 0,5\pi), \\ \pi + \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}(\theta)}{\operatorname{tg}(\varphi)}\right), & \text{при } |\theta| \in (0, 0,5\pi) \text{ і } \varphi \in (-0,5\pi, 0). \end{cases} \quad (26)$$

Отже, при розрахунку проекції пікселів МПВ необхідно замість кутів тангажа і крена підставляти відповідно

$$\begin{cases} \theta^* = \theta + \Delta\theta, \\ \varphi^* = \varphi + \Delta\varphi. \end{cases} \quad (27)$$

Окрім кутів візування, підставлятимемо і $H'_{КА}$ замість $H_{КА}$. Маємо:

$$\operatorname{tg}\begin{pmatrix} \theta''^* \\ \varphi''^* \end{pmatrix} = \operatorname{tg}\begin{pmatrix} \varphi^* \\ \theta^* \end{pmatrix} \cos\begin{pmatrix} \theta^* \\ \varphi^* \end{pmatrix},$$

$$\begin{cases} \varphi_{2ij}^* = \varphi^* + \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}(W_{yj}^2) \cos(W_{xi}^2)}{\cos(W_{xi}^2 + \varphi''^*)}\right), \\ \theta_{2ij}^* = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}(W_{xi}^2 + \varphi''^*) \cos(\varphi_{2ij}^* - \varphi^*)}{\cos(\varphi_{2ij}^*)}\right). \end{cases} \quad (28)$$

Лінійні координати точок уздовж осі Ox позначаються M_θ , а вздовж осі Oy — M_φ . У загальному випадку кутові координати перераховуються в лінійні як [9]

$$\begin{pmatrix} M_\varphi^* \\ M_\theta^* \end{pmatrix} = H'_{КА} \cdot \operatorname{tg}\begin{pmatrix} \varphi_2^* \\ \theta_2^* \end{pmatrix}.$$

Зауважимо, що користуватися $M_{\theta,\varphi}$ для визначення відстані від надира по осях Oxy не можна, вона необхідна лише для визначення просторового розділення. Щоб правильно записати відстань, необхідно зробити перерахунок так, щоб відстань від точки надира до центра проекції МПВ дорівнювала дузі $C'D$, причому необхідно лише змістити координати точок без зміни їх розмірів.

Просторове розділення проекції пікселя на ЗП визначається як

$$\begin{pmatrix} L_\theta^* \\ L_\varphi^* \end{pmatrix} = \sqrt{\left(\begin{pmatrix} M_{\theta 05}^* \\ M_{\theta 06}^* \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} M_{\theta 07}^* \\ M_{\theta 08}^* \end{pmatrix}\right)^2 + \left(\begin{pmatrix} M_{\varphi 05}^* \\ M_{\varphi 06}^* \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} M_{\varphi 07}^* \\ M_{\varphi 08}^* \end{pmatrix}\right)^2}.$$

Виявлено, що висота $H'_{КА}$ не впливає на результат відхилення РіК, а тому кути нахилу РіК можна розрахувати за допомогою кутових координат без переходу в лінійні. Знайдемо ку-

ти нахилу РіК, які відраховуватимуться від напрямку польоту (див. рис. 6), при цьому якщо лінія нахилена за годинниковою стрілкою, то кут більший нуля, а проти – менший.

Для колонок φ_c :

$$\varphi_{c[i,j]} = \arctg \left(\frac{\operatorname{tg}(\theta_{2[0,j]}) - \operatorname{tg}(\theta_{2[p_D-1,j]})}{\operatorname{tg}(\theta_{2[0,i]}) - \operatorname{tg}(\theta_{2[p_D-1,i]})} \right). \quad (29)$$

Для рядків φ_r :

$$\begin{aligned} \varphi_{r[i]} &= \\ &= \frac{\pi}{2} - \arctg \left(\frac{\operatorname{tg}(\theta_{2[i,0]}) - \operatorname{tg}(\theta_{2[i,q_D-1]})}{\operatorname{tg}(\theta_{2[0,i]}) - \operatorname{tg}(\theta_{2[q_D-1,i]})} \right), \quad (30) \end{aligned}$$

Примітка: у (29) і (30) $[i, j]$ – індекс (номер) відповідного пікселя, “0” перед змінною вказує на номер точки пікселя, який необхідно брати відповідно до рис. 5 і табл. 1.

Щоб спростити формули (29) і (30), скористаємося теоремою Коші:

$$\operatorname{tg}(\varphi_c) = \frac{\operatorname{tg}(\varphi_2) - \operatorname{tg}(\varphi_1)}{\operatorname{tg}(\theta_2) - \operatorname{tg}(\theta_1)} = \frac{\frac{d}{dW_x} [\operatorname{tg}(\varphi_i)]}{\frac{d}{dW_x} [\operatorname{tg}(\theta_i)]}, \quad (31)$$

$$\operatorname{tg} \left(\varphi_r - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{\operatorname{tg}(\theta_2) - \operatorname{tg}(\theta_1)}{\operatorname{tg}(\varphi_2) - \operatorname{tg}(\varphi_1)} = \frac{\frac{d}{dW_y} [\operatorname{tg}(\theta_i)]}{\frac{d}{dW_y} [\operatorname{tg}(\varphi_i)]}. \quad (32)$$

Використовуючи (28)–(32), запишемо формули, які дають можливість розрахувати кут нахилу колонок і рядків при послідовності відхилення “тангаж–крен” без урахування кута рискання:

$$\operatorname{tg} \left(\varphi_r - \frac{\pi}{2} \right) = \operatorname{tg}(W_x + \varphi'') \sin(\varphi), \quad (33)$$

$$\operatorname{tg}(\varphi_c) = \frac{\sin(\varphi'') \operatorname{tg}(W_y)}{\cos(\varphi) - \sin(\varphi) \cos(\varphi'') \operatorname{tg}(W_y)}. \quad (34)$$

Для відхилення за послідовністю “крен–тангаж” маємо

$$\operatorname{tg} \left(\varphi_r - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{\sin(\theta'') \operatorname{tg}(W_x)}{\cos(\theta) - \sin(\theta) \cos(\theta'') \operatorname{tg}(W_x)}, \quad (35)$$

$$\operatorname{tg}(\varphi_c) = \operatorname{tg}(W_y + \theta'') \sin(\theta). \quad (36)$$

Приклади розрахунку просторового розділення та кутів відхилення рядків і колонок

Розглянемо оптичну систему, що встановлена на борту КА, який знаходиться на орбітальній висоті в $h = 668$ [км], об’єктив має фокусну відстань $f'_o = 112,8$ [мм]; МПВ має $q_D = 4097$ [пікселів] і $p_D = N_{TDI} = 33$ [пікселя], період пікселів становить $V_D \times W_D = 17 \times 17$ [мкм], коефіцієнт заповнення пікселя 100 %; поворот на кут рискання $\psi = 0^\circ$ – не здійснюється; центр приймача розміщений на оптичній осі; порядок відхилення за кутами “тангаж–крен”, широта Землі, де знаходиться КА, $\gamma = 50^\circ$.

Примітка: кількість елементів q_D і p_D взято на 1 більше від реального значення для того, щоб наводити один центральний піксель, а не декілька. Зауважимо, що нумерація пікселів прив’язана до розміщення їх проєкцій на ЗП відносно напрямку польоту. Порядок нумерації “ (i, j) ”: для колонок “ i ” – знизу доверху, а для рядків “ j ” – зліва направо.

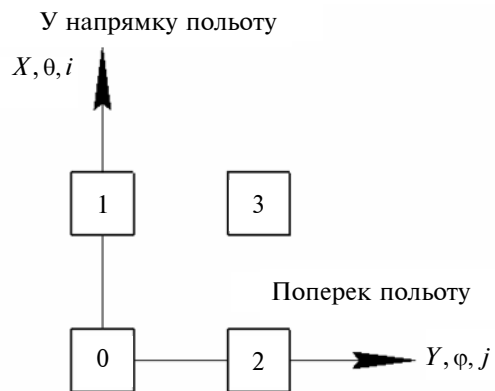


Рис. 10. Схема розглянутих випадків відхилення космічного апарата

На рис. 10 зображена схема, яка умовно показує розміщення проєкції МПВ при різних кутах візування, де цифрами позначено випадки:

- випадок № 0: $\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$;
- випадок № 1: $\theta = 35^\circ, \varphi = 0^\circ$;
- випадок № 2: $\theta = 0^\circ, \varphi = 35^\circ$;
- випадок № 3: $\theta = 35^\circ, \varphi = 35^\circ$.

У попередній роботі [9] як приклад було наведено розрахунок проєкції МПВ на площині без апроксимації площиною нахилу і врахування кривизни Землі. В цьому прикладі наведемо для порівняння просторове розділення, апроксимоване площиною і з урахуванням кри-

Таблиця 2. Просторове розділення пікселів, апроксимованих поверхнею

Випадок	№ 0		№ 1		№ 2		№ 3	
	L_0 , м	L_φ , м	L_0 , м	L_φ , м	L_0 , м	L_φ , м	L_0 , м	L_φ , м
(1, 1)	99,86	99,86	164,15	124,94	99,95	103,10	123,58	118,20
(1, 2049)	99,86	99,86	161,11	124,94	125,19	161,74	169,41	199,76
(1, 4097)	99,86	99,86	164,15	124,94	167,48	289,48	281,64	407,73
(17, 1)	99,86	99,86	164,80	125,19	99,95	103,10	123,87	118,38
(17, 2049)	99,86	99,86	161,74	125,19	125,19	161,74	169,93	200,22
(17, 4097)	99,86	99,86	164,80	125,19	167,48	289,48	282,88	409,19
(33, 1)	99,86	99,86	165,45	125,43	99,95	103,10	124,17	118,57
(33, 2049)	99,86	99,86	162,38	125,43	125,19	161,74	170,45	200,67
(33, 4097)	99,86	99,86	165,45	125,43	167,48	289,48	284,12	410,67

Таблиця 3. Просторове розділення пікселів з урахуванням кривизни Землі

Випадок	№ 0		№ 1		№ 2		№ 3	
	L_0 , м	L_φ , м	L_0 , м	L_φ , м	L_0 , м	L_φ , м	L_0 , м	L_φ , м
(1, 1)	105,03	101,42	198,77	137,62	108,75	109,18	145,66	134,69
(1, 2049)	99,86	99,86	186,23	133,55	133,86	187,20	214,98	268,36
(1, 4097)	105,03	101,42	198,77	137,62	209,61	488,16	1343,05	2418,55
(17, 1)	105,03	101,42	199,81	137,97	108,75	109,18	146,08	134,96
(17, 2049)	99,86	99,86	187,20	133,86	133,86	187,20	215,98	269,34
(17, 4097)	105,03	101,42	199,81	137,97	209,61	488,16	1407,53	2532,68
(33, 1)	105,03	101,42	200,86	138,32	108,75	109,18	146,50	135,23
(33, 2049)	99,86	99,86	188,17	134,18	133,86	187,20	217,00	270,33
(33, 4097)	105,03	101,42	200,86	138,32	209,61	488,16	1480,31	2661,54

Таблиця 4. Відхилення кутів рядків і колонок на апроксимованій поверхні

Випадок	№ 0		№ 1		№ 2		№ 3	
	φ_r , °	φ_c , °	φ_r , °	φ_c , °	φ_r , °	φ_c , °	φ_r , °	φ_c , °
(1, 1)	90,00	0,00	90,00	-11,06	89,91	0,00	68,15	-10,00
(17, 2049)	90,00	0,00	90,00	0,00	90,00	0,00	68,04	0,00
(33, 4097)	90,00	0,00	90,00	11,06	90,09	0,00	68,15	15,24

визни Землі, а також додатково наведемо значення кутів відхилення РіК (табл. 2–4).

У табл. 2 наведено 9 основних точок для аналізу, тобто деяку матрицю опорних пікселів 3×3 .

Похибка висоти ΔH за (11) становить $-5,41$ км.

На апроксимованій площині смуга огляду для випадків № 0 – 409 км, № 1 – 514 км, № 2 – 708 км і № 3 – 838 км. Смуга огляду – це відстань, яку охоплює проекція всього МПВ при скануванні і яка визначається довжиною між крайніми точками проекції поперек польоту.

Висновки

У науково-технічній літературі доволі складно зустріти інформацію, яка б давала можливість розрахувати просторове розділення оптико-електронної системи ДЗЗ за умов, коли вісь візування відхилена від надира, і практично не зустрічається інформація, у якій би в розрахунках бралася до уваги кривизна ЗП. Тому в цій статті і описана фізико-математична модель з наведеними в таблицях практичними результатами, які дають змогу оцінити вплив кривизни ЗП на просторове розділення та порівняти їх із

розрахованими в [9, 13] даними. Результати дослідження показали, що якщо вісь візування в надирі, то просторове розділення відрізняється і залежатиме від розміщення КА, тобто від широти. Не менш значний вплив має траєкторія орбіти, і щоб спростити розрахунки, у роботі використовується траєкторія сонячно-синхронної орбіти, хоча цю математичну модель можна адаптувати і для будь-якої іншої траєкторії [14].

Наведені дві фізико-математичні моделі, які враховують кривизну ЗП: це розрахунок просторового розділення по дузі (що є найбільш близькою до реальних даних) і розрахунок із використанням апроксимованої поверхні (що зручніше використовувати для розрахунків). Згідно з табл. 2 і 3, різниця між просторовим розділенням обох моделей є незначною, лише при максимальних кутах відхилення вона суттєво зростає для крайніх пікселів. Важливо звернути увагу на те, що, користуючись моделлю апроксимованої поверхні, необхідно враховувати додаткове відхилення по тангажу і крену. Кути додаткового відхилення залежать від величини кутів тангажа і крена, і чим більше

відхилення візирної осі, тим більше значення додаткового відхилення необхідно врахувати для точнішого визначення просторового розділення. Було показано, що при відхиленні по тангажу і крену на 35° сумарне додаткове відхилення становить більше 6° (див. рис. 8), що суттєво впливає на результати.

Кути відхилення колонок відносно напрямку польоту φ_c дають змогу не тільки оцінити деформацію проекції МПВ на ЗП, а й якість отриманого зображення, особливо для ПЗЗ-лінійок. Кути φ_c у ПЗЗ-лінійках дають оцінку тому, на скільки змішуватиметься зображення в процесі сканування від першого до останнього елемента TDI, і чим більше відхилення, тим більше зміщення, а отже, і гірша якість зображення.

Спираючись на отримані у роботі результати, подальші дослідження ми спрямуємо на дослідження впливу кутів візування на МПФ системи та визначення оптимального кута довороту КА, при якому якість отриманого зображення буде найкращою.

References

- [1] R. Sandau, *Digital Airborne Camera Introduction and Technology*. Springer, 2010, 343 p. doi: 10.1007/978-1-4020-8878-0
- [2] M.A. Gomasca, *Basics of Geomatics*. Springer, 2009, 656 p. doi: 10.1007/978-1-4020-9014-1
- [3] V.V. Belous *et al.*, *Remote Sensing and the Photogrammetry Basics*. Kyiv, Ukraine: Publishing Center "Kyiv University", 2011, 368 p.
- [4] C. Pohl and J.L. van Genderen, *Remote Sensing Image Fusion: A Practical Guide*. CRC Press, 2016, 288 p.
- [5] G. Moser and J. Zerubia, *Mathematical Models for Remote Sensing Image Processing. Models and Methods for the Analysis of 2D Satellite and Aerial Images*. Springer, 2018, 441 p. doi: 10.1007/978-3-319-66330-2
- [6] M.S. Molodensky, *The Gravitational Field. The Figure and the Internal Structure of the Earth*. Moscow, Russia: Nauka, 2001, 569 p.
- [7] *Table of Integrals, Series, and Products*, 8rd ed., D. Zwillinger, Ed. Academic Press, 2014, 1184 p. doi: 10.1016/C2010-0-64839-5
- [8] *CRC Standard Mathematical Tables and Formulas*, 33rd ed., D. Zwillinger, Ed. New York: CRC Press, 2017, 858 p.
- [9] V.G. Kolobrodov *et al.*, "Spatial resolution of the remote sensing system when changing the angle of sighting", *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 1, pp 54–64, 2018. doi: 10.20535/1810-0546.2018.1.111880
- [10] V.G. Kolobrodov and M.I. Lykholyt, *Design of Thermal Imaging and Television Observation Systems*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2007, 364 p.
- [11] V.G. Kolobrodov and N. Shuster, *Thermal Imaging Systems (Physical Bases, Methods of Design and Control, Application)*. Kyiv, Ukraine: Tyrazh, 1999, 340 p.
- [12] M.P. Danilevsky *et al.*, *Fundamentals of Spherical Geometry and Trigonometry*. Kharkiv, Ukraine: KNAME, 2011, 92 p.
- [13] V.G. Kolobrodov *et al.*, "Spaceborne linear array imager's spatial resolution for arbitrary viewing angles", *Proc. SPIE*, vol. 10445, pp. 104450J-1–104450J-9, 2017. doi: 10.1117/12.2280909
- [14] M. Capderou, *Satellites Orbits and Missions*. Switzerland: Springer International Publishing, 2014, 922 p. doi: 10.1007/978-3-319-03416-4

Б.Ю. Пинчук, В.Г. Колобродов, В.М. Тягур

ВЛИЯНИЕ УГЛОВ ВИЗИРОВАНИЯ И КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Проблематика. Одним из ключевых различий между авиационными и космическими оптико-электронными системами наблюдения (ОЭСН) дистанционного зондирования Земли является высота, с которой производится съемка земной поверхности. Разница между высотами авиационных и космических приборов может достигать нескольких порядков, поэтому если для авиационных ОЭСН еще можно рассчитывать пространственное разрешение на плоскости, то для космических ОЭСН это является критическим и необходимо дополнительно учитывать кривизну поверхности Земли, особенно при углах визирования, отличных от нуля.

Цель исследования. Разработка физико-математической модели для определения разрешения ОЭСН, которая учитывает кривизну поверхности Земли, орбитальную высоту и координаты положения космического аппарата при различных углах визирования.

Методика реализации. В основе физико-математической модели предложено использовать двухосный эллипсоид как аппроксимацию формы Земли для определения ее кривизны и траекторию солнечно-синхронной орбиты.

Результаты исследования. Практические результаты расчетов показывают, что кривизна поверхности Земли для космических ОЭСН существенно влияет на пространственное разрешение и отличается от результатов, получаемых физико-математической моделью, в которой пространственное разрешение определяется на плоской поверхности. Результаты проектирования показывают, что при отклонении по углам визирования необходимо при расчетах учитывать дополнительное отклонение, которое увеличивается при удалении от надира. На максимальных углах визирования, тангажа и крена по $\pm 35^\circ$, то есть когда ОЭСН отклонена на $44,7^\circ$ от надира, дополнительное отклонение составляет $6,3^\circ$, что существенно влияет на определение пространственного разрешения.

Выводы. Анализ предложенной физико-математической модели ОЭСН показал, что кривизна поверхности Земли, траектория орбиты и расположение космического аппарата, в отличие от высоты, влияют на деформацию формы проекции пикселей. При этом значения углов отклонения проекции строк и столбцов матричного приемника излучения относительно направления полета изменяются нелинейно, что отрицательно влияет на модуляционную передаточную функцию системы и требует калибровки некоторых параметров в процессе полета в зависимости от углов визирования и координат местоположения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли; пространственное разрешение; углы визирования; проекция пикселей; кривизна поверхности Земли.

B.Yu. Pinchuk, V.G. Kolobrodov, V.M. Tiagur

INFLUENCE OF ANGLES OF SIGHTING AND THE EARTH'S SURFACE CURVATURE ON THE SPATIAL RESOLUTION OF THE SPACE ELECTRO-OPTICAL VIEWING SYSTEM

Background. One of the key differences between the aeronautical and space optical-electronic viewing systems (OEVS) of remote sensing of the Earth is the height from which the Earth's surface picture is taken. The difference between the heights of aircraft and spacecraft devices can reach several orders of magnitude, so if for aeronautical OEVS you can calculate spatial division on a plane, then for space OEVS this is critical and it is necessary to additionally consider the Earth's surface curvature, especially for angles of sighting other than zero.

Objective. The aim of the paper is to develop physico-mathematical model for determining the resolution of the OEVS, which considers the Earth's surface curvature, the orbital height and location of the spacecraft position for different angles of sighting.

Methods. In the basis of physical and mathematical model is proposed to use a biaxial ellipsoid as an approximation of the Earth shape to determine its surface curvature and Sun-synchronous orbit trajectory.

Results. Practical results of the calculations prove that the Earth's surface curvature for space OEVS significantly influence the spatial resolution and differs from the results obtained by physical and mathematical model in which the spatial resolution is determined on a flat surface. The results of the design show, that when deflected at the angles of sighting, it is necessary to consider the additional deflection in calculations, which it increases, when distance increases for the nadir. At maximum angles of sight, pitch and roll to $\pm 35^\circ$, i.e. when the OEVS is deflected at 44.7° from the nadir, the additional deflection is 6.3° , which significantly influences the determination of spatial resolution.

Conclusions. The analysis of the proposed the physico-mathematical model of the OEVS showed that the Earth's surface curvature orbit trajectory and the location of the spacecraft, unlike the height, influence the pixels' projection shape deformation. In this case, the values of the projection tilt angles of the rows and columns of the matrix detector relative to the flight direction change nonlinearly, which adversely influence the system modulation transfer function and require the calibration for some parameters during the flight depending on the angles of sighting and location coordinates.

Keywords: remote sensing of the Earth; spatial resolution; angles of sighting; projection of pixels; Earth's surface curvature.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
13 серпня 2018 року

Прийнята до публікації
6 вересня 2018 року