

УДК 681.78

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.1.111880

Б.Ю. Пінчук^{1,2*}, В.Г. Колобродов², В.М. Тягун^{1,2}¹Казенне підприємство спеціального приладобудування "Арсенал", Київ, Україна²КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ПРОСТОРОВЕ РОЗДІЛЕННЯ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ПРИ ЗМІНІ КУТА ВІЗУВАННЯ

Проблематика. Системи дистанційного зондування Землі широко застосовуються для спостереження земної поверхні (ЗП) авіаційними і космічними засобами, оснащеними тепловізійними системами спостереження (ТСС). Отримані дані використовуються для розв'язання екологічних і природоресурсних задач, розвитку фундаментальних досліджень, в інтересах безпеки і оборони країни. Ефективність роботи ТСС на літальних апаратах характеризується роздільною здатністю на місцевості, яка визначається просторовим розділенням системи.

Мета дослідження. Розробка фізико-математичної моделі ТСС для розрахунку проекцій усіх пікселів матричного приймача випромінювання (МПВ) на ЗП при різних кутах візування.

Методика реалізації. На основі аналізу фізико-математичної моделі запропоновано розраховувати деформовану проекцію всіх пікселів МПВ на ЗП за допомогою теорії кутового руху.

Результати дослідження. Практичні результати дають уявлення про те, наскільки відрізняється просторове розділення проекцій опорних пікселів при кутах візування (вип. № 1–3) від проекцій, коли МПВ знаходиться в надирі (вип. № 0). Згідно з розглянутим прикладом маємо:

- при відхиленні тільки по тангажу на 35° просторове розділення збільшується від 1,22 до 1,57 разу – вип. № 1;
- при відхиленні тільки по крену на 35° просторове розділення збільшується від 1,01 до 2,44 разу – вип. № 2;
- при відхиленні по тангажу і крену на 35° просторове розділення збільшується від 1,17 до 3,24 разу – вип. № 3.

Результати проектування показують, що при відхиленні за кутами візування розміри і форми проекцій пікселів МПВ збільшуються і сильніше деформуються при віддаленні від надиру. Важливим є і те, що проекції рядків і колонок МПВ відхиляються на різні кути, що суттєво впливає на якість зображення, яке формується за допомогою ПЗЗ-лінійки.

Висновки. Аналіз запропонованої фізико-математичної моделі показав, що висота не впливає на форму деформації проекції пікселів, а є лише коефіцієнтом масштабування при переході від кутових координат до лінійних. При цьому, крім інших параметрів, які впливають на форму проекцій пікселів, свій вплив вносить і послідовність відхилення за кутами візування "тангаж–крен" і "крен–тангаж".

Ключові слова: дистанційне зондування Землі; тепловізор; просторове розділення; кути візування; проекція пікселів; теорія кутового руху.

Вступ

Тепловізійні системи спостереження (ТСС), які встановлені на літальних апаратах (ЛА), широко використовуються для моніторингу земної поверхні (ЗП) [1, 2]. ТСС є одним із небагатьох методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) як спосіб отримання інформації про ЗП і розміщені на ній об'єкти. Створення приладів ДЗЗ є одним із основних пріоритетів, такі прилади являють собою продукт найсучасніших технологій і свідчення належності держави до провідних космічних гравців. Дані, отримані завдяки ДЗЗ, знаходять досить широке застосування в різних сферах діяльності, серед яких значну роль відіграють комерційні знімки, що використовуються не тільки урядовими та військовими, а й громадськими та науковими структурами.

Першочерговою задачею вчених і конструкторів є поліпшення якості одержуваного зображення для підвищення просторової та енергетичної роздільної здатності ТСС [3]. Сучасні тепловізори, встановлені на ЛА, мають можливість змінювати кути спостереження (тангажу θ , крену φ і рискання ψ) для отримання необхідної просторової інформації для відповідної ділянки ЗП, що безпосередньо впливає на якість зображення [4]. Основною характеристикою, яка визначає якість зображення та просторове розділення ТСС, є його модуляційна передавальна функція (МПФ). Серед багатьох факторів, від яких залежить МПФ, можна виділити вплив умов спостереження [3]. Більшість праць, у яких представлені фізико-математичні моделі ТСС, дають змогу розрахувати МПФ за умови, коли вісь візування перпендикулярна ЗП (у надирі). В науково-технічній літера-

* corresponding author: pinchuk.brus@gmail.com

турі відсутні дослідження, пов'язані з впливом кутів візування на якість зображення за умов, коли оптична вісь сканера ТСС відмінна від надиру.

Постановка задачі

Стаття присвячена вирішенню проблеми, яка полягає у визначенні спотворень отримуваної від ЗП інформації, спричинених деформацією проєкцій пікселів матричного приймача випромінювання (МПВ) при зміні кута спостереження. Мета нашого дослідження полягає в розробці фізико-математичної моделі для розрахунку проєкцій усіх пікселів МПВ ТСС на ЗП при різних кутах візування.

Вихідні положення

Суть фізичної моделі процесу формування зображення ПЗ за допомогою ТСС на ЛА полягає в тому, що потік електромагнітного випромінювання, яке відбивається або/і випромінюється об'єктом спостереження та фоном, проходить через атмосферу і потрапляє в об'єктив ТСС. Зображення у відповідному спектральному діапазоні фокусується об'єктивом у площині МПВ. Як приймач випромінювання можуть використовуватися як лінійки, так і матриці, які перетворюють розподіл освітленості в електричний сигнал, що після зчитування формує цифровий відеосигнал [3].

Потік випромінювання, який формує сигнал, залежить від кутів візування, що визначаються за допомогою g-сенсорів (акселерометрів) та гіродатчиків (гіроскопів). Кути спостереження (візування) краще схематично зображувати на прикладі літака (рис. 1), ніж на космічних апаратах (КА), оскільки на таких схемах можна визначити напрямком польоту.

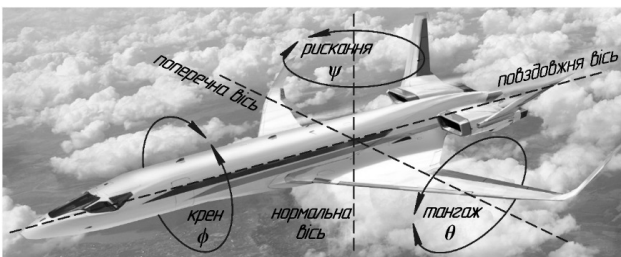


Рис. 1. Кути візування (спостереження) літального апарата

Згідно з рис. 1 і 2, після визначення напрямку польоту (вісь Ox) можна вказати осі та кути візування. Крен ϕ – це кут повороту ЛА навколо поздовжньої осі, напрямком якої збігається з

напрямком польоту. Аналогічно, тангаж θ – це кут повороту навколо поперечної осі, а рискання ψ – кут повороту навколо нормальної осі. Прилади для визначення орієнтації, такі як гіроскоп, строго прив'язуються до вказаних вище осей, а результати кутів розраховуються відносно них. Тому в подальшому всі розрахунки опиратимуться на цю систему координат (СК). Узгодимося, що поздовжня вісь – вісь Ox , поперечна вісь – вісь Oy , а вісь рискання – вісь Oz .

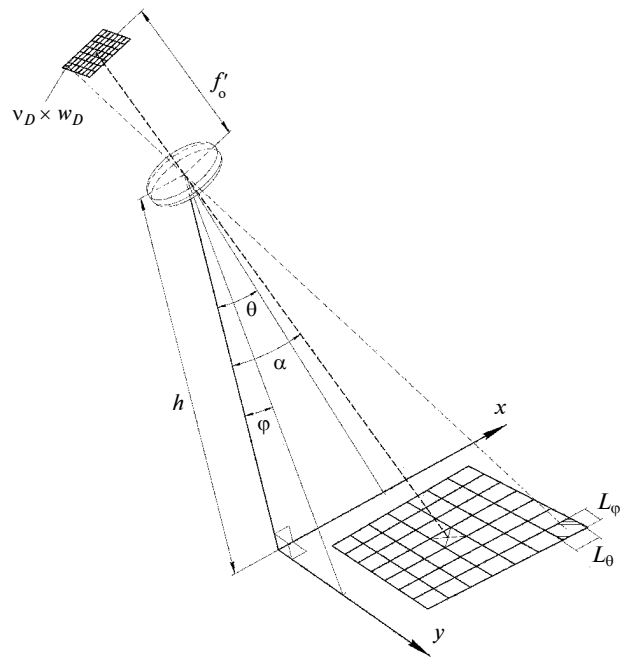


Рис. 2. Геометрична схема ДЗЗ

Приклад проєкції матричного приймача випромінювання на земній поверхні

Звернемо увагу на СК, де основні параметри орієнтації задають, опираючись на глобальну СК, але в реальних умовах КА змінює кути візування в локальних СК. Наприклад, спочатку глобальна СК збігається з локальною СК, тоді КА відхилився за тангажем і змінив локальну СК (кут відхилення однаковий для обох СК), далі КА відхиляється за креном, але у власній локальній СК (кути відхилення відрізняються для обох СК), аналогічно і для кута рискання. Відповідно, при зміні кутів візування КА нормальна вісь глобальної СК (яка проходить через надир) не збігається з нормальною віссю локальної СК, тому при обертанні за кутом рискання змінюються форма проєкції пікселів, їх площі та просторова роздільна здатність.

Розглянемо, наприклад, МПВ (див. рис. 2), який встановлений на КА з параметрами: p_D і q_D – кількість активних елементів розкладу (пікселів) по вертикалі (осі Ox) і по горизонталі (осі Oy) відповідно; а для ПЗЗ-лінійки, в цьому випадку, можна записати $p_D = TDI$ [5]; $v_D \times w_D$ – розмір чутливого елемента пікселя, а $V_D \times W_D$ – період чутливих елементів; f'_0 – фокусна відстань об'єктива ТСС; h – висота, на якій знаходиться ЛА. При зміні ЛА кутів візування, під час сканування ЗП, проєкції пікселів у вигляді квадратів (якщо $v_D = w_D$) перетворюються в опуклі несиметричні дельтоїди (рис. 3).

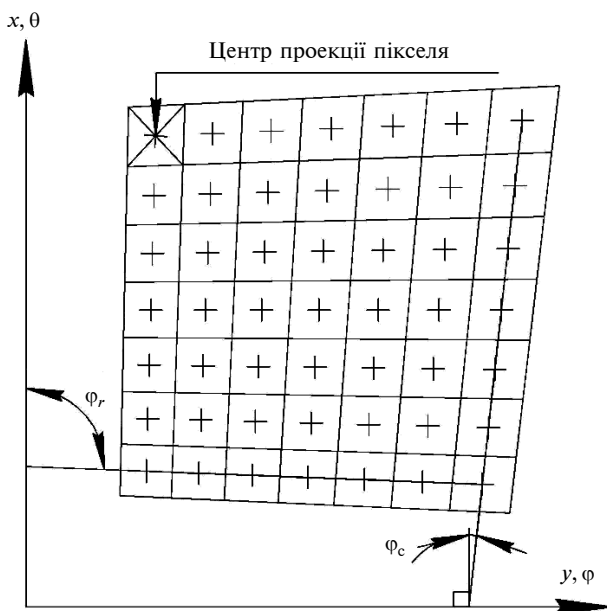


Рис. 3. Проєкція МПВ на ЗП

На рис. 3 зображені осі координат ЗП і біля них позначені кути візування, по яких відбувається відхилення. Центр проєкції пікселя визначається перетином діагоналей, проведених від кутів проєкції пікселя. Утворені при цьому кути до осі Ox визначають відхилення рядка φ_r (колонки φ_c) від напрямку польоту.

Теорія кутового руху

Візьмемо піксель, центральна точка якого знаходиться на оптичній осі ТСС ЛА. Цей піксель проєктується на ЗП, причому кути візування дорівнюють нулю. Отже, за відсутності нахилу ЛА або самої ТСС на ЛА, тобто коли кути спостереження дорівнюють нулю, центр проєкції цього пікселя знаходитиметься в точці O (рис. 4).

Назвемо лінію OD проєкційною лінією центра пікселя (ПЛЦП), тобто це умовна лінія, яка з'єднує центр проєкції пікселя на площині і точку D . Точка D – це точка, де знаходиться ЛА. Якщо ЛА чи ТСС нахилиться тільки на кут тангажу θ , то ПЛЦП перебуватиме в положенні DC , а якщо тільки на кут крену φ – то в положенні DA , і в положенні DB при відхиленні на обидва кути.

Як можна помітити, в такому випадку краще розглядати систему в кутових координатах для знаходження відповідної проєкційної точки. Виходячи з цього, всі розрахунки проводитимуться в кутових величинах, що позбавляє залежності від деяких лінійних параметрів (наприклад, висоти). Лінійні розміри є результатом розрахунків для оцінки спотворень проєкції. Теорія отримала назву *теорія кутового руху*, оскільки до уваги беруться кутові координати проєкційних точок. В основі цієї теорії покладено прямокутний тетраедр.

У літературі відсутні формули, які описують співвідношення сторін і кутів прямокутного тетраедра (рис. 4), але виведення їх просте, тому запишемо лише результати отриманих формул. Спочатку позначимо, що: $h = DO$ – висота; $AB = OC$ і $AO = BC$ та $AB \parallel OC$ і $AO \parallel BC$, звідси можна сказати, що $AOCB$ – прямокутник, а всі умовно утворені трикутники – прямокутні. Кут нахилу системи (ЛА) α визначається формулами

$$\operatorname{tg}^2(\alpha) = \operatorname{tg}^2(\theta) + \operatorname{tg}^2(\varphi),$$

$$\sin^2(\alpha) = \sin^2(\theta'') + \sin^2(\varphi''), \quad (1)$$

$$\cos(\alpha) = \cos\left(\frac{\theta''}{\varphi''}\right) \cos\left(\frac{\theta}{\varphi}\right).$$

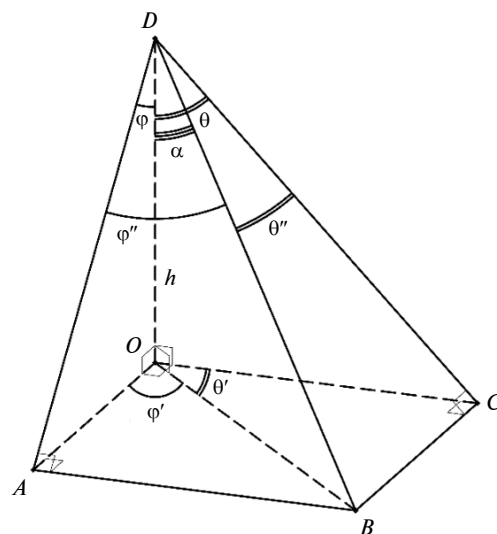


Рис. 4. Прямокутний тетраедр, схема візування

У зв'язку із насиченістю матеріалу та обмеженням по обсягу статті наводитимуться лише результати та ключові формули, необхідні для їх отримання. Також, для спрощення запису, скористаємося формулами вигляду (1), у цьому випадку посилення (1.1) відповідатиме $\cos(\alpha) = \cos(\theta'')\cos(\theta)$, а (1.2) – $\cos(\alpha) = \cos(\varphi'')\cos(\varphi)$.

На рис. 4 можна помітити, що $\theta' + \varphi' = 90^\circ$. Отже, запишемо основні пропорції та співвідношення:

$$\begin{aligned} \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{\operatorname{tg}(\theta)} &= \frac{\sin(\theta')}{\sin(\varphi')} = \frac{\cos(\varphi')}{\cos(\theta')} = \frac{\sin(\theta'')}{\sin(\varphi'')}, \\ \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{\varphi}\right) &= \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi'}{\theta'}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{\theta}\right) = \operatorname{tg}(\alpha) \sin\left(\frac{\varphi'}{\theta'}\right), \\ \frac{\cos(\theta)}{\cos(\varphi)} &= \frac{\cos(\varphi'')}{\cos(\theta'')}, \\ \sin\left(\frac{\theta''}{\varphi''}\right) &= \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{\theta}\right) \cos(\alpha) = \sin\left(\frac{\theta'}{\varphi'}\right) \sin(\alpha), \\ \operatorname{tg}\left(\frac{\theta''}{\varphi''}\right) &= \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{\theta}\right) \cos\left(\frac{\theta}{\varphi}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

Важливою для виведення формул є перевірка правильності отриманих результатів, тобто створення умов, деякою мірою близьких до реальних. Одним із варіантів моделювання умов проєціювання пікселів на ЗП є створення моделі в режимі 3D за допомогою програм, які є системою автоматизованого проєктування і креслення.

Якщо центр проєкції матриці знаходиться в надирі, то розмір проєкції пікселя по одній із осей розраховується як

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ W_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_D \\ w_D \end{pmatrix} \frac{h}{f'_0}. \quad (3)$$

Важливою є формула визначення кута нахилу ПЛЦП відносно осі Oz . На рис. 5, *a* цей кут позначено α_i .

Попередні формули (1) отримані лише для визначення проєкції центрального пікселя, який знаходиться на оптичній осі OC . Тому розглянемо випадок для позаосьового пікселя. Рис. 5, *a* зроблений по аналогії з рис. 4 за умови відсутності кутів візування, причому DC – це ПЛЦП, який розміщений у МПВ по осі Ox , DA – це ПЛЦП, який розміщений у МПВ по осі Oy , або ж DC і DA – це проєкції лінії DB (ПЛЦП позаосьового пікселя) на площини XZ і YZ відповідно. Далі припустимо, що в нас OC відхилилася на кути θ і φ , тому добудуємо лише одну лінію $A'D$ так, щоб вона відображала результат переміщення ПЛЦП для осьового пікселя, і нехай $A'D = h$. Причому точка A'

знаходиться в площині $OABC$, а кут α – це і є кут нахилу OC . У результаті деяких перетворень і підстановок запишемо формулу для визначення α_i :

$$\begin{aligned} \cos(\alpha_i) &= \cos(\alpha) \cos(W_\alpha) \times \\ &\times [1 - \operatorname{tg}(W_x) \operatorname{tg}(\theta) - \operatorname{tg}(W_y) \operatorname{tg}(\varphi)], \end{aligned} \quad (4)$$

де W_α розраховується аналогічно α за формулами (1)–(3), причому замість θ підставляємо W_x , а замість φ – W_y .

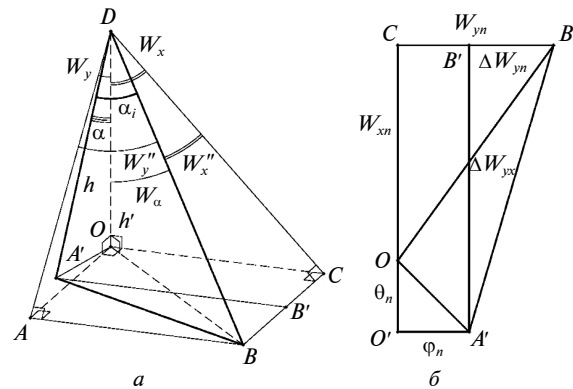


Рис. 5. Кут нахилу ПЛЦП відносно осі Oz : *a* – схема візування для позаосьового пікселя; *б* – розміщення позаосьового пікселя на ЗП

Маючи основні формули для моделювання і перевірки правильності розрахунків, опишемо теорію кутового руху. Спочатку розглянемо рис. 5, *a*, беручи до уваги лише кути W_x , W_y , W_x'' і W_y'' , які є кутовими координатами деякої ПЛЦП. Припустимо, що DB – це ПЛЦП, коли кути візування дорівнюють нулю, тобто для деякого позаосьового пікселя МПВ. W_x'' – це кут між ПЛЦП і проєкцією його на площину XZ , а W_y'' – це кут між ПЛЦП і проєкцією його на площину YZ ; W_x – це проєкція кута нахилу ПЛЦП на площину XZ , а W_y – це проєкція кута нахилу ПЛЦП на площину YZ . Зауважимо, що у відповідний момент рухатися можна лише по одному із кутів візування, тому що одночасний рух за двома кутами візування відповідав би наявності точки в декількох місцях одночасно, що суперечить законам фізики. Змоделюємо ситуацію, при якій OC рухається лише по тангажу, тобто вздовж польоту, де в результаті кут $W_x = \text{const}$, а інші кути перераховуються залежно від величини кута нахилу по тангажу. Аналогічно і з рухом по крену, де $W_y = \text{const}$.

Опишемо траєкторію переміщення точки центра проєкції пікселя. Оскільки гіроскоп та інші прилади видають кінцевий результат орієн-

тації ОС чи ЛА, то постає задача: вирішити, на які кути необхідно відхилитися спочатку по тангажу, а тоді по крену (або навпаки), щоб результуючі кути відповідали необхідним θ і φ .

Розглянемо рис. 6: маємо дві криві a і b , тобто два пікселі МПВ, із яких a – осьовий піксель, а b – позаосьовий. У процесі зміни кутів візування кути між самими ПЛЦП залишаються сталими. Звідси випливає, що якщо проекції на осьову ПЛЦП у площинах XZ і YZ змінюються, то одночасно на такий же кут змінюються і проекції всіх інших пікселів, якщо сканер нахилиться по тангажу або крену. Отже, задача спрощується, і в результаті необхідно розв'язати поставлену задачу лише тільки для осьової ПЛЦП. Можна помітити, що підказка для розв'язання цієї задачі знаходиться у формулі (1), залежно від того, по якому із кутів візування спочатку рухатиметься ОС.

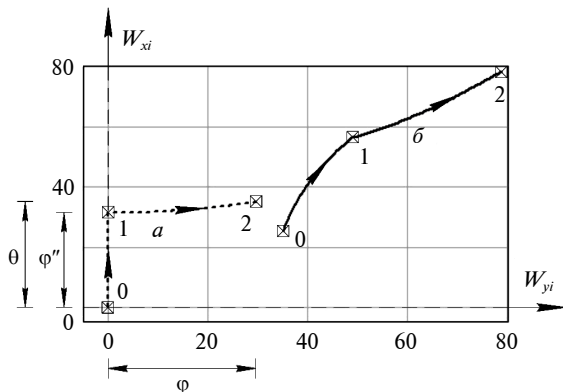


Рис. 6. Траєкторії переміщення точок центрів проекцій пікселів

Отже, розпишемо алгоритм руху центральної точки проекції відповідного пікселя спочатку по тангажу, а тоді по крену (див. рис. 5 і 6).

Крок 0. Кути візування дорівнюють нулю, а координати позаосьової точки (W_x ; W_y) і осьової (0; 0). Запишемо: $\theta_0 = W_x$, $\theta_0'' = W_x''$, $\varphi_0 = W_y$, $\varphi_0'' = W_y''$.

Крок 1. Рухаємося по тангажу на кут φ'' , де точки переміщуються по траєкторії. Скористаємося наведеними вище зауваженнями і формулами (2):

$$\begin{aligned} \theta_1'' &= \theta_0'' = W_x'', \quad \theta_1 = W_x + \varphi'', \\ \varphi_1 &= \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(\theta_1'')}{\cos(\theta_1)}\right) = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(W_x'')}{\cos(W_x + \varphi'')}\right), \\ \varphi_1'' &= \arctg(\operatorname{tg}(\theta_1) \cos(\varphi_1)) = \\ &= \arctg(\operatorname{tg}(W_x + \varphi'') \cos(\varphi_1)). \end{aligned}$$

Крок 2. Аналогічно рухаємося по крену на кут φ :

$$\begin{aligned} \varphi_2'' &= \varphi_1'' = \arctg(\operatorname{tg}(W_x'' + \varphi'') \cos(\varphi_1)), \\ \varphi_2 &= \varphi_1 + \varphi = \varphi + \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(W_x'')}{\cos(W_x + \varphi'')}\right), \\ \theta_2 &= \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(\varphi_2'')}{\cos(\varphi_2)}\right) = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(W_x + \varphi'') \cos(\varphi_1)}{\cos(\varphi_2)}\right), \\ \theta_2'' &= \arctg(\operatorname{tg}(\varphi_2) \cos(\theta_2)). \end{aligned}$$

Отже, ми отримали формули, які вираховують кутові координати точки центра проекції пікселя при відхиленні спочатку по тангажу, а тоді по крену. В результаті запишемо формули для обох випадків руху:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_2}{\theta_2}\right) &= \\ &= \operatorname{tg}\left(\left(\frac{\varphi}{\theta}\right) + \arctg\left(\operatorname{tg}\left(\frac{W_x''}{W_y''}\right) / \cos\left(\frac{W_x + \varphi''}{W_y + \theta''}\right)\right)\right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\theta_2}{\varphi_2}\right) = \operatorname{tg}\left(\frac{W_x + \varphi''}{W_y + \theta''}\right) \cos\left(\frac{\varphi_2 - \varphi}{\theta_2 - \theta}\right) / \cos\left(\frac{\varphi_2}{\theta_2}\right). \quad (6)$$

Розв'язок цієї задачі можна побачити на рис. 6, крива a . Також для прикладу наведено і траєкторію позаосьової точки b , яка переміщала одночасно з точкою траєкторії a . Відповідно, для руху по “тангажу–крену” (порядок відхилення) необхідно користуватися формулами (5.1) і (6.1), а для руху по “крену–тангажу” – (5.2) і (6.2). Важливо сказати про те, що вибір порядку відхилення суттєво впливає на результати розрахунків. Формула (4) наведена для аналізу отриманих значень за формулами (5), (6), які підставляються в (1).

Математична модель розрахунку проекції пікселів на земній поверхні

Маємо ТССЛА з такими параметрами: $p_D \times q_D$, $v_D \times w_D$ і $V_D \times W_D$, f_o' і h . Різниця між $v_D \times w_D$ і $V_D \times W_D$ характеризує коефіцієнт заповнення пікселів [6], який враховує ця модель. Оскільки МПВ має роздільну здатність $p_D \times q_D$, необхідно сформулювати порядкову нумерацію для кожного елемента, записавши дані у вигляді масиву. Задаємо порядок нумерації: $i = \overline{0, p_D - 1}$ 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 $dL_{p,q}$ – це лінійне зміщення центра МПВ по відповідних осях координат.

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 кутів:

$$\begin{pmatrix} W_{xi} \\ W_{yj} \end{pmatrix} = \arctg \left(\frac{1}{f'_o} \begin{pmatrix} L_{pi} \\ L_{qj} \end{pmatrix} \right).$$

Уточнимо, що W_{xi} – це той же кут, що і W_x , який використовувався в раніше описаних формулах, де індекс i – порядковий номер кута відповідного пікселя вздовж осі Ox , аналогічно і для осі Oy .

Визначення просторового розділення схематично можна показати на геометричній схемі (рис. 7). Важливою складовою подальших розрахунків є $\omega_{x,y}$ – проекція $\omega'_{x,y}$ реального кутового розміру чутливого елемента МПВ (миттєве поле зору) на одну із осей для будь-якого пікселя:

$$\operatorname{ctg} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{pmatrix} = f'_o \begin{pmatrix} 1/(v_D \cdot \cos^2(W_x)) \\ 1/(w_D \cdot \cos^2(W_y)) \end{pmatrix} - \frac{1}{4f'_o} \begin{pmatrix} v_D \\ w_D \end{pmatrix}. \quad (7)$$

При цьому реальне кутове розділення позаосьового пікселя визначатиметься як

$$\operatorname{ctg} \begin{pmatrix} \omega'_x \\ \omega'_y \end{pmatrix} = f'_o \begin{pmatrix} 1/(v_D \cdot \cos^2(W'_x) \cdot \cos(W'_y)) \\ 1/(w_D \cdot \cos^2(W'_y) \cdot \cos(W'_x)) \end{pmatrix} - \frac{1}{4f'_o} \begin{pmatrix} v_D \cdot \cos(W'_y) \\ w_D \cdot \cos(W'_x) \end{pmatrix}.$$

Окрім миттєвого поля зору, необхідно визначити різницю кутів ω_{lx} і ω_{rx} (див. рис. 7), що дасть нам змогу розрахувати крайні точки проєкцій пікселів:

$$\begin{pmatrix} \Delta\omega_x \\ \Delta\omega_y \end{pmatrix} = \operatorname{sign} \begin{pmatrix} W_x \\ W_y \end{pmatrix} \times \arccos \left(\frac{1}{2f'_o} \begin{pmatrix} v_D \\ w_D \end{pmatrix} \cos^2 \begin{pmatrix} W_x \\ W_y \end{pmatrix} \sin \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{pmatrix} + \cos \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{pmatrix} \right), \quad (8)$$

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

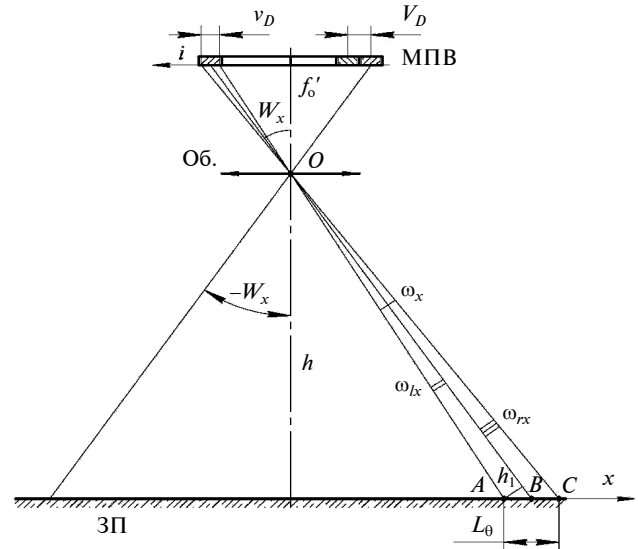


Рис. 7. Геометрична схема для визначення просторового розділення

Розглянемо принцип розрахунку точок пікселя, які дадуть змогу визначити просторове розділення та проєкцію відповідного пікселя (рис. 8).

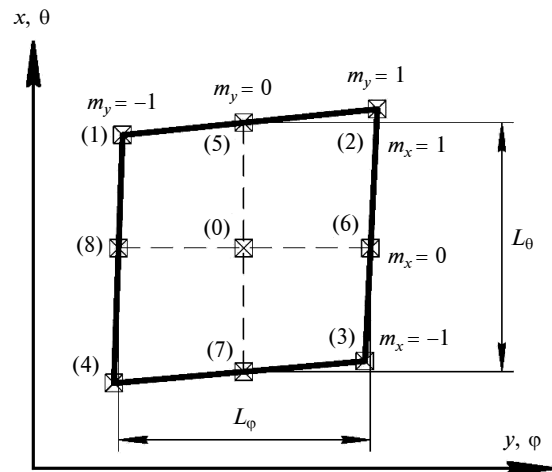


Рис. 8. Проєкція пікселя на ЗП

На рис. 8 зображені 9 точок, і всі точки умовно розділені на рівні їх розміщення $m_{x,y}$. Запишемо через $W^1_{x,y}$ нові значення координат точок пікселя:

$$\begin{pmatrix} W^1_x(m_x) \\ W^1_y(m_y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_x \\ W_y \end{pmatrix} + 0,5 \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\omega_x \\ \Delta\omega_y \end{pmatrix} \right). \quad (9)$$

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

Відповідно до рис. 8, просторова роздільна здатність L_θ (величина проєкції пікселя вздовж осі Ox) визначається точками $\{5, 7\}$, L_φ (величина проєкції пікселя вздовж осі Oy) – $\{6, 8\}$, а проєкція пікселя – $\{1-4\}$. Зауважимо, що проєкція пікселя описується активною частиною пікселя $v_D \times w_D$, а просторове розділення визначається періодом МПВ $V_D \times W_D$, тому для розрахунку просторової роздільної здатності в (7) і (8) слід зробити заміну: $v_D = V_D$ і $w_D = W_D$.

Як зазначалося вище, значний вклад у деформацію проєкції пікселя вносить і кут рискання ψ . Оскільки поворот за кутом рискання відбувається по "нормальній осі" в локальній СК, то в такому випадку це можна інтерпретувати як поворот МПВ навколо оптичної осі, тобто це можна представити як зміну координат пікселів. Вплив цього кута на розміщення (орієнтацію) проєкцій пікселів можна розрахувати, використовуючи формули повороту, які описані за допомогою афінних перетворень [7]. Після повороту значення координат точок пікселя $W_{x,y}^2$ дорівнюватимуть

$$\begin{pmatrix} W_x^2(m_x, m_y) \\ W_y^2(m_x, m_y) \end{pmatrix} = \arctg \left[\begin{matrix} \operatorname{tg} \left(\frac{W_x^1(m_x)}{W_y^1(m_y)} \right) \cos(\psi) + \\ + \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} \operatorname{tg} \left(\frac{W_y^1(m_y)}{W_x^1(m_x)} \right) \sin(\psi) \end{matrix} \right]. \quad (10)$$

У результаті залишається врахувати лише вплив двох інших кутів. Для прикладу запишемо рух по "тангажу-крену", скориставшись (2), (5.1), (6.1):

$$\begin{aligned} \varphi_2(m_x, m_y) &= \varphi + \\ &+ \arctg \left(\frac{\operatorname{tg}(W_y^2(m_x, m_y)) \cos(W_x^2(m_x, m_y))}{\cos(W_x^2(m_x, m_y) + \varphi)} \right), \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_2(m_x, m_y) &= \arctg \left(\frac{\operatorname{tg}(W_x^2(m_x, m_y) + \varphi)}{\cos(\varphi_2(m_x, m_y))} \right) \times \\ &\times \cos(\varphi_2(m_x, m_y) - \varphi). \quad (12) \end{aligned}$$

Для руху по "крену-тангажу" використовуються формули (2), (5.2), (6.2). Знаючи кутові координати точок проєкцій пікселів, можемо перейти до лінійних координат. Позначимо лінійні координати точок уздовж осі Ox – M_θ , а вздовж осі Oy – M_φ . У загальному кутові координати перераховуються в лінійні як

$$\begin{pmatrix} M_\varphi(m_x, m_y) \\ M_\theta(m_x, m_y) \end{pmatrix} = h \cdot \operatorname{tg} \begin{pmatrix} \varphi_2(m_x, m_y) \\ \theta_2(m_x, m_y) \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Згідно з рис. 8, для визначення координат точок пікселя ми повинні задавати правильні значення розміщення $m_{x,y}$. Дані по вибору $m_{x,y}$ наведені в табл. 1 з використанням рис. 8.

Таблиця 1. Координати точок проєкції пікселя

Роздільна здатність			Проєкція пікселя		
Координати	m_x	m_y	Координати	m_x	m_y
$(M_{\theta 5}, M_{\varphi 5})$	+1	0	$(M_{\theta 1}, M_{\varphi 1})$	+1	-1
$(M_{\theta 7}, M_{\varphi 7})$	-1	0	$(M_{\theta 2}, M_{\varphi 2})$	+1	+1
$(M_{\theta 6}, M_{\varphi 6})$	0	+1	$(M_{\theta 3}, M_{\varphi 3})$	-1	+1
$(M_{\theta 8}, M_{\varphi 8})$	0	-1	$(M_{\theta 4}, M_{\varphi 4})$	-1	-1

У результаті, користуючись табл. 1 і формулами (9)–(13), визначаємо точки $\{5-8\}$, які необхідні для визначення просторового розділення відповідного пікселя. Просторове розділення проєкції пікселя на ЗП являє собою відстань між відповідними точками (рис. 8), яку можна визначити за формулою

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} L_\theta \\ L_\varphi \end{pmatrix} &= \\ &= \sqrt{\left(\begin{pmatrix} M_{\theta 5} \\ M_{\theta 6} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} M_{\theta 7} \\ M_{\theta 8} \end{pmatrix} \right)^2 + \left(\begin{pmatrix} M_{\varphi 5} \\ M_{\varphi 6} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} M_{\varphi 7} \\ M_{\varphi 8} \end{pmatrix} \right)^2}. \quad (14) \end{aligned}$$

Просторова роздільна здатність при цьому визначається як

$$\begin{pmatrix} v_\theta \\ v_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/(2L_\theta) \\ 1/(2L_\varphi) \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Приклади розрахунку просторового розділення

Розглянемо ТСС, що встановлена на борту КА, який знаходиться на орбіті висотою в $h = 668$ [км], ОС має фокусну відстань $f'_0 = 112,8$ [мм]; приймачем випромінювання є ПЗЗ-лінійка, в якій $q_D = 4097$ [пікселів] і $p_D = TDI = 33$ [регістра], період пікселів становить $V_D \times W_D = 17 \times 17$ [мкм], коефіцієнт заповнення пікселя 100 %; поворот на кут рискання $\psi = 0$ – не здійснюється; центр приймача знаходиться на оптичній осі; порядок відхилення за кутами "тангаж-крен".

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 на-

прямку польоту. Порядок нумерації “(i, j)”: для колонок “i” – знизу доверху, а для рядків “j” – зліва направо.

На рис. 9, 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: $\theta = 35^\circ, \varphi = 35^\circ$.

Дані для кількісної оцінки впливу кутів візування на проєкцію пікселів залежно від кутів візування можна проаналізувати в табл. 2.

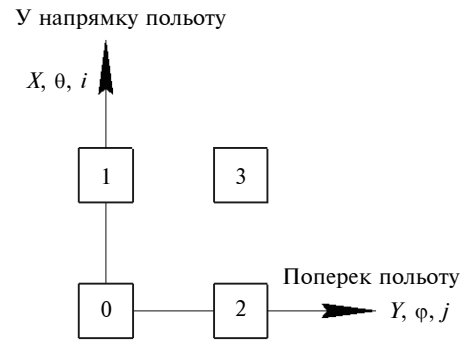


Рис. 9. Схема розглянутих випадків відхилень космічного апарата

Таблиця 2. Просторове розділення пікселів залежно від кутів візування

(i, j) ↓	Випадок							
	№ 0		№ 1		№ 2		№ 3	
	$L_\theta, \text{ м}$	$L_\varphi, \text{ м}$	$L_\theta, \text{ м}$	$L_\varphi, \text{ м}$	$L_\theta, \text{ м}$	$L_\varphi, \text{ м}$	$L_\theta, \text{ м}$	$L_\varphi, \text{ м}$
(1, 1)	100,67	100,67	151,85	122,69	101,06	101,45	125,56	116,53
(1, 2049)	100,67	100,67	149,53	122,69	122,90	150,03	162,88	181,73
(1, 4097)	100,67	100,67	151,85	122,69	156,78	244,17	240,70	322,05
(17, 1)	100,67	100,67	152,37	122,90	101,06	101,45	125,84	116,69
(17, 2049)	100,67	100,67	150,03	122,90	122,90	150,03	163,33	182,08
(17, 4097)	100,67	100,67	152,37	122,90	156,78	244,17	241,58	322,96
(33, 1)	100,67	100,67	152,88	123,11	101,06	101,45	126,12	116,85
(33, 2049)	100,67	100,67	150,54	123,11	122,90	150,03	163,79	182,43
(33, 4097)	100,67	100,67	152,88	123,11	156,78	244,17	242,48	323,89

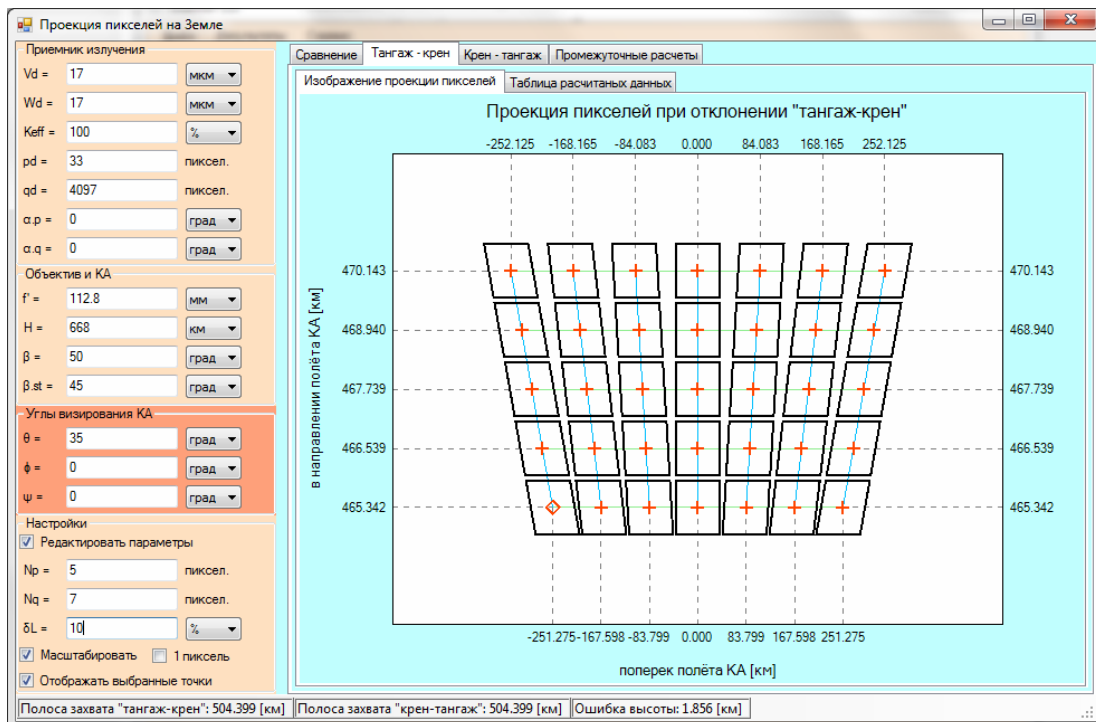


Рис. 10. Проекция пікселів для випадку № 1

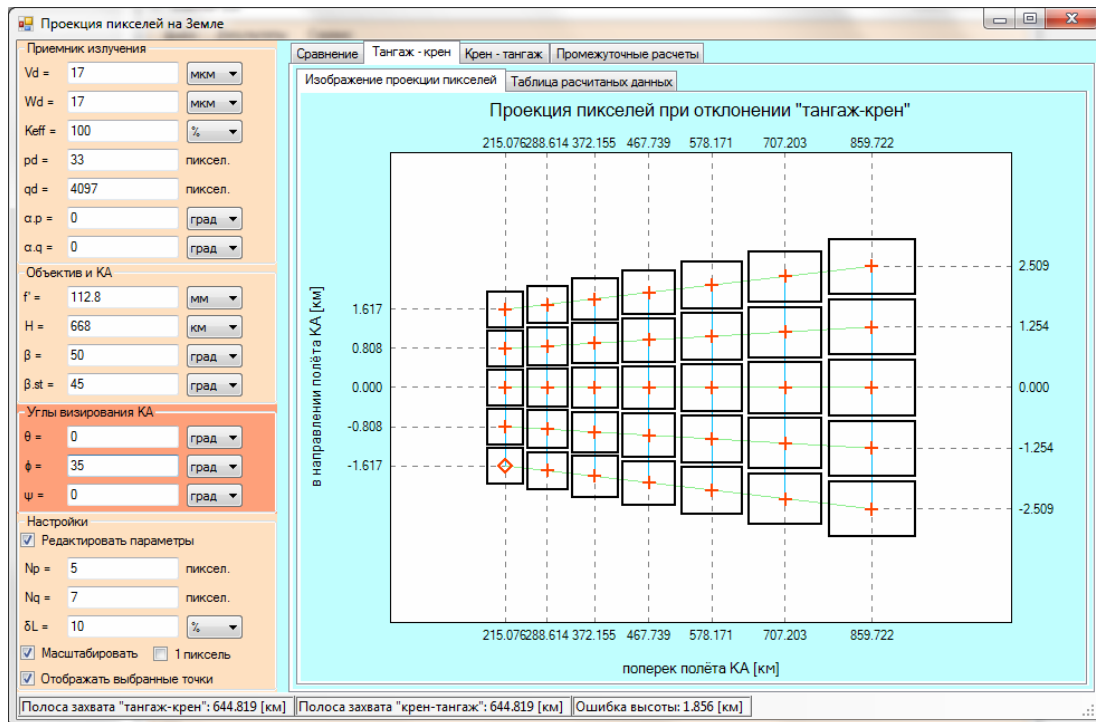


Рис. 11. Проекція пікселів для випадку № 2

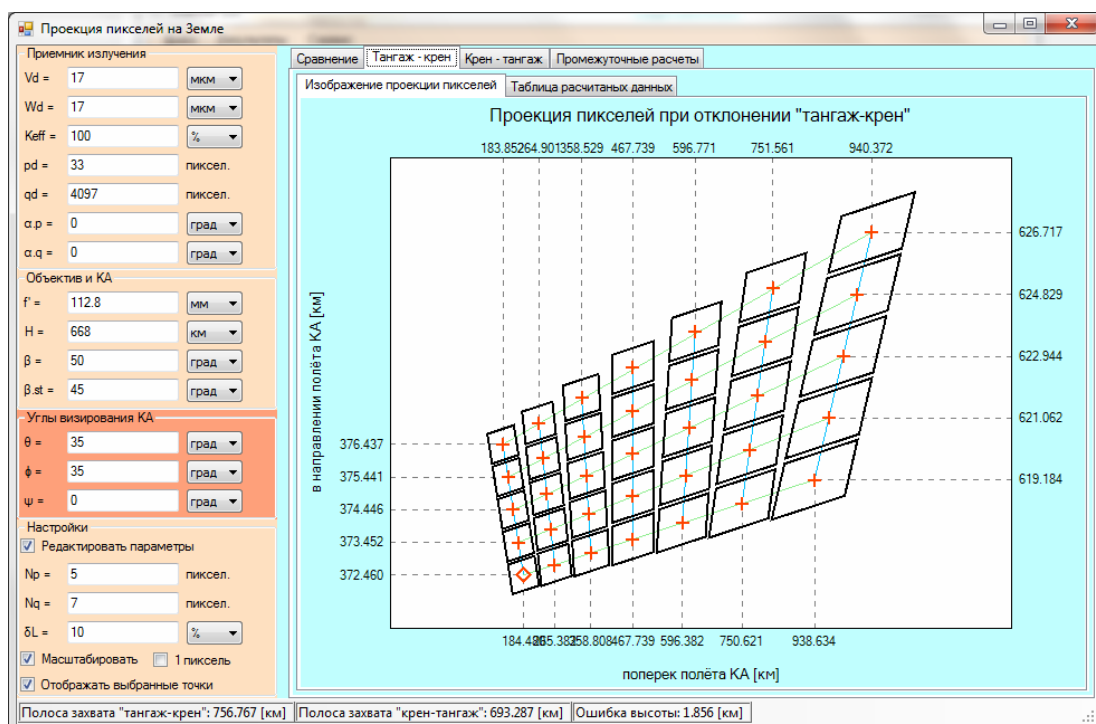


Рис. 12. Проекція пікселів для випадку № 3

У табл. 2 взято 9 основних точок для аналізу, тобто деяка матриця опорних пікселів 3×3 ; а для більш інформативного відображення результатів нижче наведені зображення 3-х випадків із матрицею опорних пікселів 5×7 .

На рис. 10–12 подані зображення проєкцій пікселів МПВ за допомогою власноруч розробленої програми “Scanner 1.6”. У цій програмі реалізований особливий алгоритм, який дає змогу позбутися проміжків між вибраними пікселями

(навіть якщо МПВ була б повернута, наприклад, на 50° навколо центрального пікселя), при цьому алгоритм зберігає пропорцію форм і кутів нахилу колонок і рядків. Також на графіках із 4-х сторін наведені дані координат центрів проєкцій крайніх пікселів, відповідно до напрямків польоту, відносно точки надиру.

Висновки

Розрахунок проєкції пікселів МПВ ТСС, що встановлена на КА, є важливою задачею для визначення просторового розділення, яке характеризуватиме якість отриманого зображення [3, 5]. У відомій науково-технічній літературі розрахунки проводяться лише для пікселя, який розміщений на оптичній осі, а його проєкція в надири, лише в декількох джерелах описуються розрахунки з урахуванням одного кута візування і лише для центрального пікселя [3, 5, 8, 9].

У нашій статті описана теорія кутового руху, на основі якої побудована математична модель. Запропоновано математичну модель розрахунку проєкції пікселів на ЗП, яка дає змогу визначити

просторове розділення та лінійні координати точок проєкцій для кожного елемента, враховуючи зміщення МПВ у площині зображень ОС.

Наведена практична частина, в якій представлені приклади розрахунку на основі реальних даних, що застосовуватимуться в КА ДЗЗ. У наведених прикладах за допомогою табл. 2 і рис. 10–12 показано вплив кутів візування на форму проєкцій вибраних пікселів. Зауважимо, що зміна форми проєкції пікселів на ЗП і нахил відносно напрямку польоту впливають на просторову роздільну здатність, МПФ системи та лінійне розширення на місцевості, що визначає якість отриманого зображення.

З урахуванням отриманих у роботі результатів подальші дослідження будуть спрямовані на: дослідження впливу кутів візування на енергетичну роздільну здатність ТСС; розрахунок кутів нахилу для рядків і колонок МПВ; розрахунок просторового розділення, що враховує кривизну Землі та положення КА; застосування методів математичної оптимізації для визначення оптимального кута довороту КА, при якому якість отриманого зображення буде максимальною.

References

- [1] I. Dowman *et al.*, *High Resolution Optical Satellite Imagery*. Dunbeath, UK: Whittles Publishing, 2012. doi: 10.1080/01431161.2012.748512
- [2] Shen-En Qian, *Optical Satellite Signal Processing and Enhancement*. SPIE Press, 2013. doi: 10.1117/3.1000981
- [3] 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
- [4] Qin Deng *et al.*, “Study on MTF of remote sensing imaging under arbitrary known vibration”, *Proc. SPIE*, vol. 8420, pp. 84200W-1–84200W-6, 2012. doi: 10.1117/12.966412
- [5] V.G. Kolobrodov and M.I. Lykholyt, *Design of Thermal Imaging and Television Observation Systems*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2007 (in Ukrainian).
- [6] V.G. Kolobrodov *et al.*, “The influence of fill-factor by pixels of an infra-red matrix detector on the quality thermal images”, *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 1, pp. 135–139, 2010 (in Ukrainian).
- [7] E.V. Shikin and A.V. Boreskov, *Computer Graphics: Dynamics, Realistic Images*. Moscow, Russia: Dialog-MIFI, 1995 (in Russian).
- [8] R.R. Auelmann. (2012). *Image Quality Metrics* [Online]. Available: <http://www.techarchive.org/wp-content/themes/boilerplate/largerdocs/Image%20Quality%20Metrics.pdf>
- [9] B. Felipe-Garcia *et al.*, “Analysis of the ground sample distance on large photogrammetric surveys”, *Appl. Geomat.*, vol. 4, iss. 4, pp. 231–244, 2012. doi: 10.1007/s12518-012-0084-2

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

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УГЛА ВИЗИРОВАНИЯ

Проблематика. Системы дистанционного зондирования Земли широко применяются для наблюдения земной поверхности (ЗП) авиационными и космическими средствами, оснащенными тепловизионными системами наблюдения (ТСН). Полученные данные используются для решения экологических и природоресурсных задач, развития фундаментальных исследований в интересах безопасности и обороны страны. Эффективность работы ТСН на летательных аппаратах характеризуется разрешающей способностью на местности, которая определяется пространственным разделением системы.

Цель исследования. Разработка физико-математической модели ТСН для расчета проєкций всех пикселов матричного приемника излучения (МПИ) на ЗП при различных углах визирования.

Методика реалізації. На основі аналізу фізико-математическої моделі пропонується розраховувати деформовану проекцію всіх пікселів МПІ на ЗП з допомогою теорії кутового руху.

Результати дослідження. Практичні результати дають уявлення про те, наскільки відрізняється просторове роздільне здаття проєкцій опорних пікселів при кутах визирювання (случ. № 1–3) від проєкцій, коли МПІ знаходиться в надирі (случ. № 0). Згідно з розглянутим прикладом маємо:

- при відхиленні тільки по тангажу на 35° просторове роздільне здаття збільшується від 1,22 до 1,57 разів – случ. № 1;
- при відхиленні тільки по крену на 35° просторове роздільне здаття збільшується від 1,01 до 2,44 разів – случ. № 2;
- при відхиленні по тангажу і крену на 35° просторове роздільне здаття збільшується від 1,17 до 3,24 разів – случ. № 3.

Результати проєктування показують, що при відхиленні по кутах визирювання розміри і форми проєкцій пікселів МПІ збільшуються і сильніше деформуються при віддаленні від надирі. Важливо те, що проєкції строк і стовпців МПІ відхиляються на різні кути, що суттєво впливає на якість зображення, яке формується з допомогою ПЗС-лінійки.

Висновки. Аналіз запропонованої фізико-математическої моделі показав, що висота не впливає на форму деформації проєкції пікселів, а є лише масштабуючим коефіцієнтом при переході від кутових координат до лінійних. Крім того, крім інших параметрів, які впливають на форму проєкцій пікселів, своє вплив вносять і послідовність відхилення по кутах визирювання "тангаж–крен" і "крен–тангаж".

Ключові слова: дистанційне зондування Землі; тепловізор; просторове роздільне здаття; кути визирювання; проєкція пікселів; теорія кутового руху.

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

SPATIAL RESOLUTION OF THE REMOTE SENSING SYSTEM WHEN CHANGING THE ANGLE OF SIGHTING

Background. The Earth remote sensing systems are widely used to monitor the Earth's surface (ES) by aviation and space vehicles equipped with thermal infrared systems (TIRS) for surveillance. The obtained data are used for solving environmental and nature-resource problems, development of fundamental research in the interest of the country security and defense. The effectiveness of the TIRS on aircraft is characterized by the resolution of the terrain which is determined by the spatial resolution of the system.

Objective. The aim of the paper is the development of TIRS physico-mathematical model for calculation of projections of all pixels of the focal plane array (FPA) on the ES at different angles of sighting.

Methods. On the basis of the analysis of the physico-mathematical model, it is proposed to calculate the deformed projection of all pixels of the FPA on the ES using the theory of angular motion.

Results. Practical results give an idea of how much the spatial resolution of the projection of reference pixels at the angles of sighting (cases № 1–3) differs from the projections when the FPA is located in nadir (case № 0). There are three cases according to the considered example:

- when only the pitch is deviated by 35° , the spatial resolution increases from 1.22 to 1.57 times (case № 1);
- when only the roll is deviated by 35° , the spatial resolution increases from 1.01 to 2.44 times (case № 2);
- when both pitch and roll are deviated by 35° , the spatial resolution increases from 1.17 to 3.24 times (case № 3).

The results of the design show that at a deviation in the angles of sighting, the size and shape of the projections of the pixels of the FPA increase and deform more when they move away from the nadir. It is also important that the projections of rows and columns of the FPA deviate to different angles which significantly affects the image quality, formed by the linear CCD array.

Conclusions. The analysis of the proposed physico-mathematical model showed that the height doesn't affect the shape of the deformation of the projection of pixels, but is only a scaling coefficient in the transition from angular to linear coordinates. At the same time, among other parameters that affect the shape of the projections of pixels, the sequence of deviation in the angles of sighting "pitch–roll" and "roll–pitch" also get its effect.

Keywords: Earth remote sensing; thermal imager; spatial resolution; angles of sighting; pixel projection; theory of angular motion.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
10 жовтня 2017 року

Прийнята до публікації
08 лютого 2018 року