

І.А. Беспалко, к.т.н.

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова

В.П. Кравчик, н.с.

Д.В. Пекарєв, к.т.н., с.н.с.

*Секція прикладних проблем**Президії Національної академії наук України*

Визначення максимального кута відхилення знімальної апаратури космічного апарата дистанційного зондування Землі при забезпеченні необхідної просторової розрізненості матеріалів космічного знімання

У статті отримано та обґрунтовано математичні вирази, що уточнюють оцінку можливостей космічних апаратів дистанційного зондування Землі з оптико-електронною апаратурою знімання щодо спостереження земної поверхні із необхідною (заданою) просторовою розрізненістю матеріалів космічного знімання при відхиленні оптичної осі бортового інформаційного комплексу. Доведено достовірність отриманих виразів шляхом порівняння результатів розв'язку прямої та зворотної задач визначення просторової розрізненості матеріалів космічного знімання при відхиленні оптичної осі бортового інформаційного комплексу космічного апарата дистанційного зондування Землі.

Врахування погіршення просторової розрізненості залежно від кута відхилення знімальної апаратури бортового інформаційного комплексу космічного апарата та кривизни поверхні Землі забезпечує підвищення точності визначення смуг захоплення космічних апаратів при моделюванні стану та змін космічної обстановки, а також оцінюванні їх можливостей щодо знімання земної поверхні. Проведено оцінювання можливостей космічних апаратів дистанційного зондування Землі з оптико-електронною апаратурою та доведено, що матеріали космічного знімання, які ними отримуються, не можуть бути застосовані для виявлення та розпізнавання (до виду, класу, типу) об'єктів спостереження у межах усієї смуги захоплення знімальної апаратури за умови забезпечення заявленої просторової розрізненості матеріалів космічного знімання.

Перспективами подальших досліджень є уточнення розв'язання практичних задач щодо планування використання бортового ресурсу космічних апаратів дистанційного зондування Землі, вдосконалення алгоритмів урахування можливого спостереження вітчизняної території (об'єктів) за допомогою іноземних космічних засобів та вдосконалення методик оцінювання можливостей космічних апаратів параметричного спостереження і дистанційного зондування Землі з радіолокаційною апаратурою.

Ключові слова: бортовий інформаційний комплекс; просторова розрізненість; матеріали космічного знімання; смуга захоплення; дистанційне зондування Землі.

Актуальність теми. Питання різноманітного інформаційного забезпечення центральних органів виконавчої влади, силових структур та відповідних установ і організацій державного та приватного секторів – одне з важливих завдань сучасного світу. Потужним джерелом інформації є орбітальні космічні засоби, які, не порушуючи державних кордонів та міжнародних договорів, здатні отримати матеріали космічного знімання (МКЗ) важливих (визначених) територій та об'єктів. Використання вітчизняних космічних апаратів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), а за їх відсутності – орендованого бортового ресурсу космічних апаратів, що належать країнам-партнерам, міжнародним операторам та приватним компаніям, або застосування іноземних космічних апаратів ворожими державами для вирішення розвідувальних завдань потребує оцінки їх можливостей при плануванні зйомки або заходів з протидії технічним засобам спостереження космічного базування.

При здійсненні знімання земної поверхні та відхиленні бортового інформаційного комплексу (БІК) космічного апарата (КА) ДЗЗ (знімальної апаратури КА ДЗЗ) від знімання у надир буде погіршуватися якість матеріалів, що отримуються, – просторова розрізненість МКЗ.

Розрахунок погіршення просторової розрізненості МКЗ при відхиленні БІК КА від знімання у надир не викликає труднощів та є достатньо простою геометричною задачею, тоді як зворотна задача щодо визначення максимального кута відхилення БІК КА ДЗЗ при забезпеченні необхідної просторової розрізненості МКЗ більш складна.

Таким чином, уточнення оцінки можливостей космічних апаратів ДЗЗ за умови забезпечення необхідної просторової розрізненості МКЗ є важливим та актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Аналіз вітчизняних та закордонних наукових праць [1–5] показав, що більшість з них присвячені методам та способам виправлення геометричних викривлень, що виникають на МКЗ під впливом різноманітних чинників (метеорологічні умови, освітленість, відхилення БІК КА тощо). Деякі роботи присвячені врахуванню цих викривлень у процесі створення ортофотопланів [6–8].

На даний час більшість практичних завдань з визначення можливостей щодо знімання земної поверхні з космосу вирішується шляхом розрахунку смуги захоплення КА ДЗЗ з урахуванням здатності КА перенацілювати миттєве поле зору БІК на деякий максимальний кут, відповідно до якого визначається проекція миттєвої зони огляду КА на поверхню Землі у вигляді кола або прямокутника. При розв'язанні деяких задач застосовується підхід до визначення необхідної просторової розрізненості, що забезпечується відомим значенням кута відхилення БІК КА [8, 9]. Але геометричні викривлення, що обумовлені як відхиленням БІК КА так і кривизною поверхні Землі, впливають на якість МКЗ, що отримуються космічними апаратами, і призводять до погіршення просторової розрізненості та знижують можливості щодо виявлення, класифікації та розпізнавання об'єктів на таких МКЗ.

Таким чином, визначення максимального кута відхилення БІК КА ДЗЗ (у межах, що допускаються тактико-технічними характеристиками КА) при забезпеченні необхідної просторової розрізненості МКЗ для вирішення завдань планування космічного знімання та моделювання стану і змін космічної обстановки (визначення можливостей іноземних космічних апаратів, що належать ворожим державам) не знайшло відображення у публікаціях.

Метою статті є визначення залежності, що характеризує максимально можливе відхилення оптичної осі БІК КА ДЗЗ при забезпеченні необхідної просторової розрізненості МКЗ.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо викривлення зображення через нахилення оптичної осі БІК КА та кривизни поверхні Землі. Так в уявному зображенні просторова розрізненість БІК КА прийнята однаковою в межах смуги захоплення КА, тоді як у реальному зображенні мають місце викривлення (збільшення) елементарного пікселя у перпендикулярному $d_{КАЛ}$ та паралельному $d_{КАП}$ напрямках відносно траси КА ДЗЗ (рис. 1).

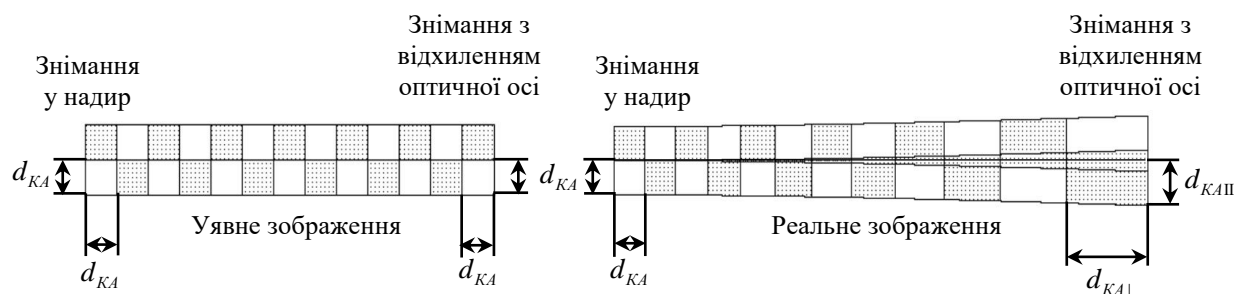


Рис. 1. Викривлення зображення через нахилення оптичної осі БІК КА та кривизни поверхні Землі

Для визначення залежності, що характеризує максимально можливе відхилення оптичної осі БІК КА ДЗЗ при забезпеченні необхідної просторової розрізненості МКЗ, перевірки достовірності отриманого результату та демонстрації його практичного застосування вирішення поставленого завдання доцільно здійснити за чотирма кроками:

- розв'язок зворотної задачі – отримання виразу для розрахунку максимального кута відхилення оптичної осі БІК КА ДЗЗ при забезпеченні необхідної просторової розрізненості МКЗ;
- розв'язок прямої задачі – визначення залежності просторової розрізненості МКЗ від відхилення оптичної осі БІК КА ДЗЗ;
- порівняння результатів розв'язку зворотної та прямої задач;
- розрахунок зменшення смуг захоплення космічних апаратів з урахуванням погіршення розрізненості МКЗ при відхиленні оптичної осі БІК КА ДЗЗ.

1. Отримання виразу для розрахунку максимального кута відхилення оптичної осі БІК КА ДЗЗ при забезпеченні необхідної просторової розрізненості МКЗ.

Дано:

висота польоту КА над поверхнею Землі H_0 ;

радіус Землі R_3 ;

просторова розрізненість БІК КА при зніманні в надир (найкраща просторова розрізненість) $d_{КА}$ та/або кут поля зору знімальної апаратури БІК КА ν ;

необхідна просторова розрізненість МКЗ d_{OB} .

Необхідно знайти максимальний кут відхилення оптичної осі знімальної апаратури БІК КА (у допустимих тактико-технічних характеристиках КА межах) α , що забезпечить необхідну просторову розрізненість МКЗ d_{OB} .

Обмеження та припущення:

Земля має форму сфери з радіусом R_3 ;

найкраща просторова розрізненість МКЗ, що отримані за допомогою БІК КА ДЗЗ, $d_{КА}$ – заявлена оператором КА ДЗЗ просторова розрізненість на краю кадру при зніманні у надир;

вплив на просторову розрізненість МКЗ турбулентності атмосфери, зсуву зображення, залишкового дефокусування, дифракції та дискретності фотоприймача є незначним, порівняно із викривленнями зображень при відхиленні оптичної осі БІК КА від знімання у надир з урахуванням кривизни поверхні Землі, та не враховується.

Визначимо викривлення МКЗ у перпендикулярному трасі КА напрямі. У зв'язку з тим, що максимальне збільшення (розтягування) зображення при відхиленні БІК КА з урахуванням кривизни земної поверхні має місце саме у напрямі перпендикулярному трасі КА, потрібно знайти максимальне значення $d_{КА\perp}$, за якого забезпечується необхідна просторова розрізненість МКЗ d_{OB} , тобто $d_{КА\perp} = d_{OB}$ (рис. 2).

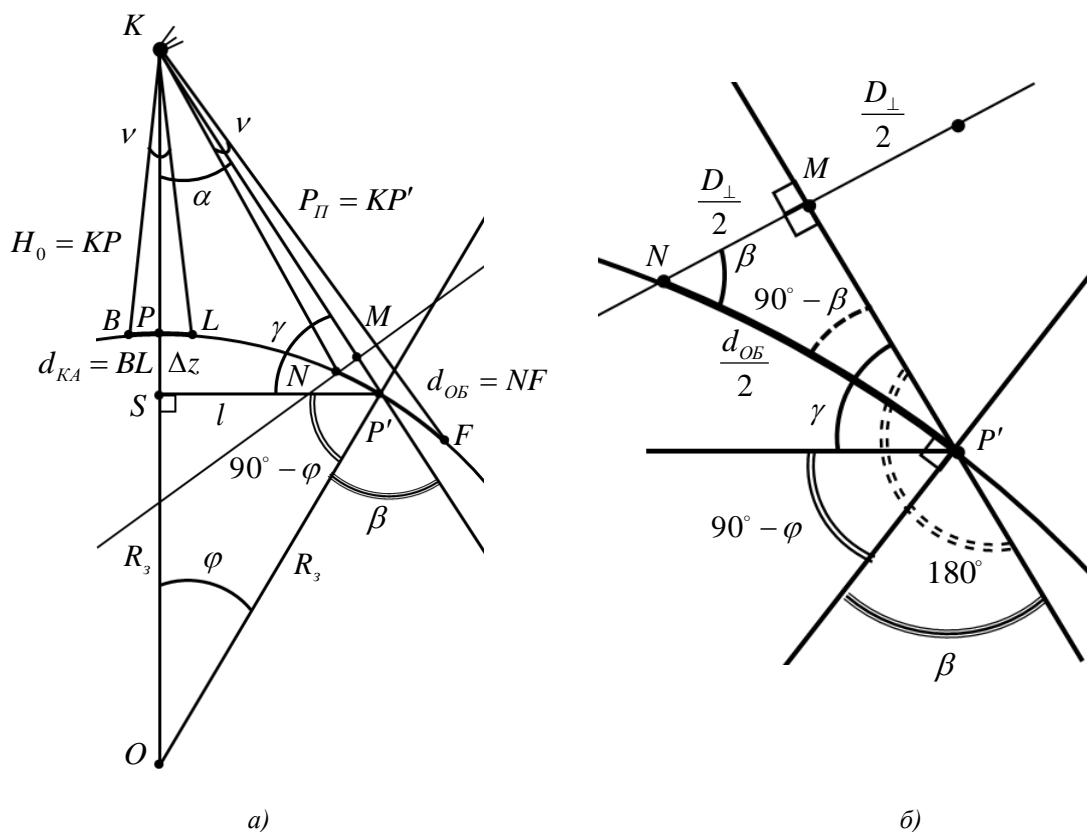


Рис. 2. Схема до розрахунку кута відхилення оптичної осі знімальної апаратури БІК КА (а) та її збільшений фрагмент (б)

З трикутника $\triangle OSP'$ отримаємо значення відстані l :

$$l = SP' = R_3 \sin \varphi, \quad (1)$$

де φ – центральний кут відхилення знімальної апаратури БІК КА.

Відстань Δz визначається як:

$$\Delta z = PS = OP - SO = R_3 - R_3 \cos \varphi = R_3 (1 - \cos \varphi). \quad (2)$$

З трикутника $\Delta KSP'$ отримаємо:

$$P_{II} = KP' = \sqrt{l^2 + (H_0 + \Delta z)^2} = \sqrt{R_3^2 \sin^2 \varphi + (H_0 + R_3(1 - \cos \varphi))^2}, \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{KP + PS}{SP'} = \frac{H_0 + \Delta z}{l} \Rightarrow \gamma = \operatorname{arctg} \left(\frac{H_0 + R_3(1 - \cos \varphi)}{R_3 \sin \varphi} \right), \quad (4)$$

де P_{II} – похила дальність від КА до центра кадру на поверхні Землі при відхиленні знімальної апаратури КА.

Оскільки $\gamma + (90^\circ - \varphi) + \beta = 180^\circ$, то $\beta = 90^\circ + \varphi - \gamma$.

Виразимо з трикутників ΔKPB та ΔKMN кут ν та прирівняємо результати:

$$\operatorname{tg} \frac{\nu}{2} = \frac{BP}{KP} = \frac{d_{KA}/2}{H_0} \Rightarrow \nu = 2 \operatorname{arctg} \frac{d_{KA}}{2H_0}, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\nu}{2} = \frac{NM}{KM} = \frac{D_{\perp}/2}{H_1} \Rightarrow \nu = 2 \operatorname{arctg} \frac{D_{\perp}}{2H_1}, \quad (6)$$

$$2 \operatorname{arctg} \frac{d_{KA}}{2H_0} = 2 \operatorname{arctg} \frac{D_{\perp}}{2H_1} \Rightarrow \frac{d_{KA}}{H_0} = \frac{D_{\perp}}{H_1}, \quad (7)$$

де H_1 – відстань KM (рис. 2, а).

Використавши (7), з трикутника $\Delta NMP'$ знайдемо відстань, що відповідає необхідній просторовій розрізненості МКЗ d_{OB} (рис. 2, б):

$$KM = KP' - MP', \quad \sin \beta = \frac{MP'}{NP'}, \quad \cos \beta = \frac{NM}{NP'} \Rightarrow d_{OB} = \frac{H_1 d_{KA}}{H_0 \cos \beta}. \quad (8)$$

Наведемо (8) у вигляді:

$$d_{OB} = \frac{\left(P_{II} - \frac{d_{OB} \sin \beta}{2} \right) d_{KA}}{H_0 \cos(90^\circ + \varphi - \gamma)} = \frac{\left(P_{II} - \frac{d_{OB} \sin(90^\circ + \varphi - \gamma)}{2} \right) d_{KA}}{H_0 \cos(90^\circ + \varphi - \gamma)}. \quad (9)$$

Використавши тригонометричні рівняння та вираз (4), отримаємо знаменник виразу (9) у вигляді:

$$H_0 \cos(90^\circ + \varphi - \gamma) = H_0 \left(\frac{(H_0 + R_3(1 - \cos \varphi)) \cos \varphi - R_3 \sin^2 \varphi}{P_{II}} \right). \quad (10)$$

Частина чисельника (9) після перетворень матиме вигляд:

$$\sin(90^\circ + \varphi - \gamma) = \frac{(H_0 + R_3) \sin \varphi}{P_{II}}. \quad (11)$$

Повернувшись до (9), після перетворень отримаємо:

$$d_{OB} = \frac{d_{KA} \left(R_3^2 \sin^2 \varphi + (H_0 + R_3(1 - \cos \varphi))^2 \right) - (d_{KA} d_{OB} (H_0 + R_3) \sin \varphi) / 2}{H_0 (H_0 \cos \varphi + R_3 \cos \varphi - R_3)}. \quad (12)$$

Провівши заміну у (12) $\cos \varphi = a$, $\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - a^2}$ та здійснивши перетворення, отримаємо:

$$\begin{aligned} \sqrt{1-a^2} \left(\frac{d_{KA} d_{OB} (H_0 + R_3)}{2} \right) = \\ = -a (d_{OB} H_0^2 + d_{OB} H_0 R_3 + 2d_{KA} H_0 R_3 + 2d_{KA} R_3^2) + \\ + d_{OB} H_0 R_3 + 2d_{KA} R_3^2 + d_{KA} H_0^2 + 2d_{KA} H_0 R_3. \end{aligned} \quad (13)$$

У (13) позначимо:

$$\begin{aligned} b = \frac{d_{KA} d_{OB} (H_0 + R_3)}{2}; \\ c = d_{OB} H_0^2 + d_{OB} H_0 R_3 + 2d_{KA} H_0 R_3 + 2d_{KA} R_3^2; \\ e = d_{OB} H_0 R_3 + 2d_{KA} R_3^2 + d_{KA} H_0^2 + 2d_{KA} H_0 R_3. \end{aligned} \quad (14)$$

Розв'язавши рівняння (13) із врахуванням заміни (14), матимемо рішення:

$$a_{1,2} = \frac{ce \pm b\sqrt{c^2 + b^2 - e^2}}{c^2 + b^2}. \quad (15)$$

Враховавши, що $b \ll e$ та $b \ll c$, (15) набуде вигляду:

$$a_{1,2} \approx \frac{ce}{c^2} = \frac{e}{c} = \frac{R_3 (d_{OB} H_0 + 2d_{KA} (H_0 + R_3)) + d_{KA} H_0^2}{R_3 (d_{OB} H_0 + 2d_{KA} (H_0 + R_3)) + d_{OB} H_0^2} = a. \quad (16)$$

Враховавши, що з введеної заміни

$$\varphi = \arccos a, \quad (17)$$

та використавши результат (16), знайдемо значення P_{II} за (3). Тоді шуканий кут відхилення оптичної осі знімальної апаратури БІК КА ДЗЗ при забезпеченні необхідної розрізненості МКЗ – α , можна отримати за виразом:

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{R_3 \sin \varphi}{P_{II}} \right). \quad (18)$$

При задоволенні умови (18) розміри елементарного пікселя у перпендикулярному та паралельному напрямках відносно траси КА будуть мати вигляд:

$$d_{KA\perp} = d_{OB}, \quad d_{KA\parallel} = \frac{P_{II} d_{KA}}{H_0}. \quad (19)$$

2. Визначення залежності просторової розрізненості МКЗ від відхилення оптичної осі БІК КА ДЗЗ.

Дано:

кут відхилення оптичної осі знімальної апаратури БІК КА ДЗЗ α ;

висота польоту КА над поверхнею Землі H_0 ;

радіус Землі R_3 ;

просторова розрізненість БІК КА при зніманні у надир (найкраща просторова розрізненість) d_{KA} та/або кут поля зору знімальної апаратури БІК КА ν .

Необхідно знайти розмір елементарного пікселя у перпендикулярному відносно траси КА напрямі $d_{KA\perp}$ при відхиленні оптичної осі знімальної апаратури БІК КА на кут α .

Обмеження та припущення візьмемо як у пункті 1.

Для розв'язання зазначеної задачі використаємо рисунок 2. Розглянемо $\triangle OKP'$. Приймемо кут $\angle KP'O = \psi$, тоді, за теоремою синусів та з урахуванням того, що кут $\psi > 90^\circ$, матимемо:

$$\psi = 180^\circ - \arcsin \left(\frac{(H_0 + R_3) \sin \alpha}{R_3} \right). \quad (20)$$

Враховавши, що

$$\varphi = 180^\circ - \alpha - \psi, \quad (21)$$

з трикутників $\triangle OSP'$, $\triangle KP'S$, $\triangle NMP'$ та $\triangle KNM$ отримаємо:

$$KP' = \frac{SP'}{\sin \alpha} = \frac{R_3 \sin \varphi}{\sin \alpha}; \quad (22)$$

$$MN = MP' \operatorname{tg}(\psi - 90^\circ), \quad MN = KM \operatorname{tg} \frac{\nu}{2} \Rightarrow MP' = \frac{KP'}{\frac{\operatorname{tg}(\psi - 90^\circ)}{\operatorname{tg}(\nu/2)} + 1}; \quad (23)$$

$$d_{КАЛ} = NF = 2NP' = \frac{2MP'}{\cos(\psi - 90^\circ)}. \quad (24)$$

3. Порівняння результатів розв'язку зворотної та прямої задач.

З метою перевірки правильності отриманих математичних виразів порівняємо результати розв'язку зворотної та прямої задач.

Для прикладу обрано: $H_0 = 800$ км, $R_3 = 6371$ км, $d_{КА} = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ та $1,0$ м.

Для зворотної задачі скористаємося отриманими виразами у такій послідовності: (14), (16), (17), (3), (18) та (19), для прямої – (20–24).

Результати розрахунків надано у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння результатів розв'язку зворотної та прямої задач

$d_{КА},$ м	Зворотна задача (при забезпеченні необхідної просторової розрізненості МКЗ $d_{ОБ} = 1$ м)			Пряма задача (для відхилення знімальної апаратури БІК КА α зі зворотної задачі)	
	α , град	$d_{КАЛ} = d_{ОБ},$ м	$d_{КАП},$ м	$d_{КАЛ},$ м	$d_{КАП},$ м
0,4	44,95966396	1,0	0,606168	1,000001413	0,606168
0,5	40,20358717		0,687103	1,000001073	0,687103
0,6	35,28518528		0,759780	1,000000815	0,759780
0,7	30,02918934		0,826266	1,000000606	0,826266
0,8	24,12471449		0,887895	1,000000428	0,887895
0,9	16,80267166		0,945585	1,000000263	0,945585
1,0	0,00052385		1,000000	1,000000000	1,000000

4. Розрахунок зменшення смуг захоплення космічних апаратів з урахуванням погіршення розрізненості МКЗ при відхиленні оптичної осі БІК КА ДЗЗ.

Оцінювання можливостей КА ДЗЗ з оптико-електронною апаратурою щодо спостереження земної поверхні полягає у розрахунку максимально можливої ширини смуги захоплення знімальної апаратури КА L_3^{OE} , що обмежується її тактико-технічними характеристиками α_{\max} та уточнюється величиною максимального кута відхилення оптичної осі знімальної апаратури α (18) за умови забезпечення необхідного значення просторової розрізненості отриманих МКЗ для виявлення, класифікації та розпізнавання (до виду, класу, типу) об'єктів спостереження (рис. 3):

$$L_3^{OE} = 2R_3 \left(\arcsin \left[\left(1 + \frac{H_0}{R_3} \right) \sin \left(\alpha + \frac{\nu}{2} \right) \right] - \left(\alpha + \frac{\nu}{2} \right) \right). \quad (25)$$

Використовуючи залежності (25) та (18), розрахуємо просторову розрізненість знімальної апаратури БІК КА ДЗЗ при різних кутах відхилення на прикладі угруповання космічних апаратів ДЗЗ РФ (табл. 2).

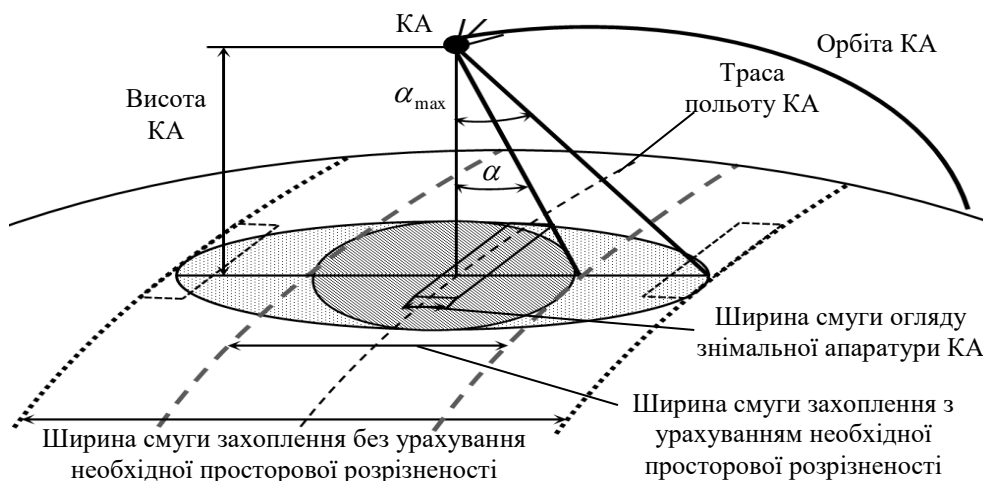


Рис. 3. Схема формування зони огляду КА ДЗЗ з оптико-електронною апаратурою БІК

Таблиця 2
Просторова розрізненість МКЗ при зніманні з різними кутами відхилення оптичної осі БІК КА ДЗЗ

Назва КА	Висота КА, км	Найкраща розрізненість у надир, м	Просторова розрізненість МКЗ для кутів відхилення БСА від 0 до 55 град., м											
			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Персона-2	750	0,30	0,30	0,30	0,31	0,33	0,35	0,38	0,43	0,49	0,59	0,74	1,00	1,51
Ресурс-П1	475	0,70	0,70	0,71	0,72	0,76	0,80	0,87	0,97	–	–	–	–	–
Барс-М1	700	1,10	1,10	1,11	1,14	1,19	1,27	1,39	1,56	1,79	2,14	2,67	–	–
Канопус-В1	510	2,10	2,10	2,12	2,17	2,27	2,42	2,63	2,92	3,33	3,92	–	–	–

Аналіз розрахунків, що наведені у таблиці 2, показує, що збільшення кутів відхилення знімальної апаратури БІК КА ДЗЗ призводить до погіршення просторової розрізненості МКЗ. Це обумовлює неможливість застосування КА для виявлення, класифікації та розпізнавання (до виду, класу, типу) об'єктів спостереження в межах усієї смуги захоплення знімальної апаратури КА, що визначена його тактико-технічними характеристиками, із заявленою власником КА просторовою розрізненістю (рис. 4).

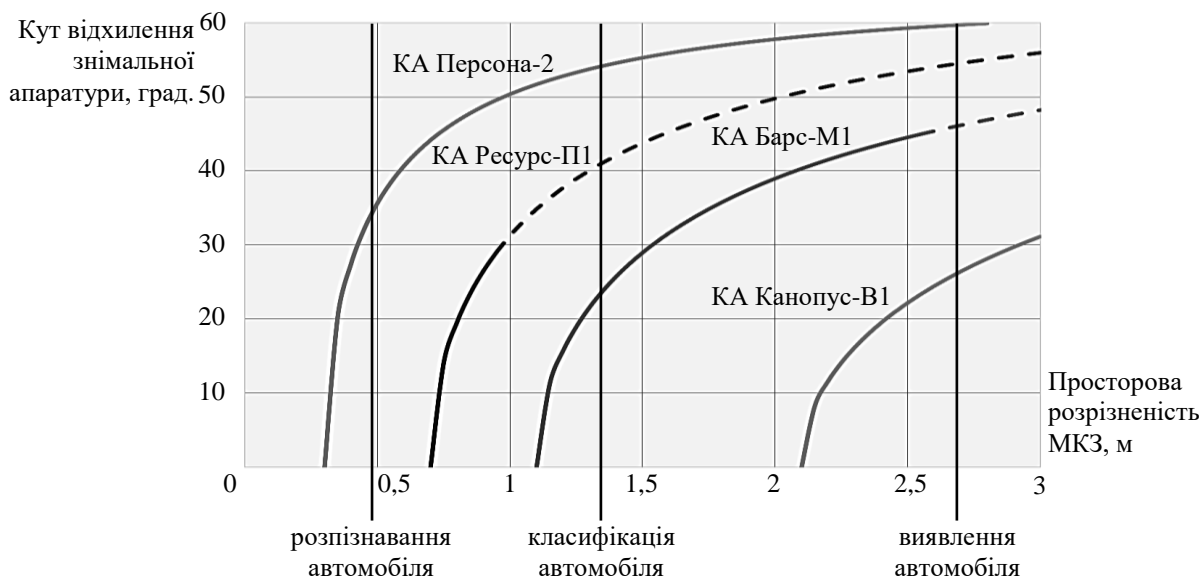


Рис. 4. Залежність просторової розрізненості МКЗ від кута відхилення знімальної апаратури БІК КА ДЗЗ на прикладі угруповання космічних апаратів РФ

На рисунку 4 можливості виконання завдань угрупованням космічних апаратів Російської Федерації з розпізнавання, класифікації та виявлення військової техніки наведені з використанням значень розрізненості, що необхідна для інтерпретації об'єктів з імовірністю 0,9 [11].

Висновки та перспективи подальших досліджень. У статті отримано залежності, за якими визначається максимально можливе відхилення оптичної осі БІК КА ДЗЗ при забезпеченні необхідної просторової розрізненості МКЗ. Достовірність отриманого результату доведено шляхом його порівняння із результатом розв'язку прямої задачі з визначення просторової розрізненості МКЗ при відхиленні оптичної осі БІК КА ДЗЗ.

Наукова новизна отриманого результату полягає в уточненні оцінки можливостей космічних апаратів ДЗЗ щодо знімання земної поверхні, яка відрізняється від відомих забезпеченням умови отримання МКЗ необхідної або заданої просторової розрізненості (у межах тактико-технічних характеристик БІК КА ДЗЗ). Врахування погіршення просторової розрізненості залежно від кута відхилення знімальної апаратури БІК КА ДЗЗ та кривизни поверхні Землі забезпечує підвищення точності визначення ширини смуги захоплення КА при моделюванні стану та змін космічної обстановки.

Перспективами подальших досліджень є вдосконалення: алгоритмів розв'язання практичних задач щодо планування використання бортового ресурсу космічних апаратів ДЗЗ, алгоритмів врахування можливого спостереження території України іноземними космічними засобами, методик оцінювання можливостей космічних апаратів параметричного спостереження та ДЗЗ з радіолокаційною апаратурою.

Список використаної літератури:

1. Гуменюк М.О. Достатня умова інформативності параметра діагностики складної радіотехнічної системи / М.О. Гуменюк // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2012. – № 2 (61). – С. 75–80.
2. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии / П.Кронберг; пер. с нем. – М.: Мир, 1988. – 343 с.
3. Геометрическая коррекция спутниковых изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.nrcgit.ru/aster/methods/geom_correct.htm.
4. Вельцер В. Аэроснимки в военном деле / В.Вельцер; пер. с нем. Л.А. Молчановой. – М.: Воениздат, 1990. – 288 с.
5. Кашкин В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учеб. пособ. / В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин. – М.: Логос, 2001. – 264 с.
6. Мышляев В.А. Влияние измерительных и изобразительных свойств космических снимков на масштаб создаваемых по ним ортофотопланов / В.А. Мышляев // Геодезия и картография. – 2014. – № 6. – С. 50–54.
7. Книжников Ю.Ф. Аэрокосмические методы географических исследований : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Ю.Ф. Книжников, В.И. Кравцов, О.В. Тутурбалына – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.
8. Мышляев В.А. Влияние углов наклона съёмочной камеры на разрешение космических снимков / В.А. Мышляев // Геодезия и картография. – 2015. – № 2. – С. 48–52.
9. Мышляев В.А. Влияние кривизны Земли на пространственное разрешение космических снимков / В.А. Мышляев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2016. – № 2. – С. 65–68.
10. Ковбасюк С.В. Методичні підходи до процесу дешифрування даних дистанційного зондування Землі середньої розрізненості в інтересах національної безпеки й оборони / С.В. Ковбасюк, Д.Л. Федорчук, Г.Д. Носова // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. – 2015. – Вип. 10. – С. 87–94 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Psvz_2015_10_12/.
11. Карпович И.Н. Военное дешифрирование аэроснимков / И.Н. Карпович. – М.: Воениздат, 1990. – 544 с.

References:

1. Humeniuk, M.O. (2012), «Dostatnia umova informatyvnosti parametra diahnostyky skladnoi radiotekhnichnoi systemy», *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky*, No. 2 (61), pp. 75–80.
2. Kronberh, P. (1988), «Dystantsyonnoe izuchenye Zemly: Osnovy i metody dystantsyonnykh issledovanyi v heolohyy», Myr, Moskva, 343 p.
3. «Neometrycheskaia korrektsiya sputnykovykh izobrazheniy», [Online], available at: http://www.nrcgit.ru/aster/methods/geom_correct.htm
4. Veltser, V. (1990), «Aerosnymky v voennom dele», Voennyatd, Moskva, 288 p.
5. Kashkyn, V.B. and Sukhynyn, A.Y. (2001), «Dystantsyonnoe zondirovanye Zemly yz kosmosa. Tsyfrovaia obrabotka yzobrazheniy», Lohos, Moskva, 264 p.
6. Myshliaev, V.A. (2014), «Vlyaniye izmerytelnykh i izobrazytelnykh svoystv kosmycheskykh snymkov na masshtab sozdavaemykh po nym ortofotoplanov», *Heodezyia y kartohrafiya*, No. 6, pp. 50–54.
7. Knyzhnykov, Yu.F., Kravtsov, V.Y. and Tuturbalya, O.V. (2004), «Aerokosmycheskiye metody heohrafycheskykh yssledovanyi», Yzdatelskiy tsentr «Akademyia», Moskva, 336 p.
8. Myshliaev, V.A. (2015), «Vlyaniye uhlov naklona syemochnoi kamery na razresheniye kosmycheskykh snymkov», *Heodezyia y kartohrafiya*, No. 2, pp. 48–52.

9. Myshliaev, V.A. (2016), «Vliyaniye krivizny Zemly na prostranstvennoe razresheniye kosmicheskikh snimkov», *Yzvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka*. No. 2, pp. 65–68.
10. Kovbasiuk, S.V., Fedorchuk, D.L. and Nosova, H.D. (2015), «Metodychni pidkhody do protsesu deshyfruvannya danykh dystantsiinoho zonduvannya Zemli serednoi rozrzhennosti v interesakh natsionalnoi bezpeky y oborony», *Problemy stvorennia, vyprobuvannya, zastosuvannya ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system*, No. 10, pp. 87–94.
11. Karpovych, Y.N. (1990), «Voennoe deshifirovanie aerosnimkov», Voennydat, Moskva, 544 p.

Беспалко Ірина Анатоліївна – кандидат технічних наук, науковий співробітник наукового центру Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- дослідження функціонування та застосування космічних систем;
- методи ідентифікації та класифікації космічних систем.

<https://orcid.org/0000-0002-7197-7324>

Кравчик Вадим Петрович – провідний науковий співробітник Секції прикладних проблем Президії Національної академії наук України.

Наукові інтереси:

- використання оптико-електронних пристроїв для задач космічного зондування Землі.

<https://orcid.org/0000-0002-3202-4926>

Пекарєв Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Секції прикладних проблем Президії Національної академії наук України.

Наукові інтереси:

- дослідження та врахування загроз у космічній сфері;
- моделювання застосування та оцінювання можливостей космічних систем і засобів.

<https://orcid.org/0000-0002-5056-4993>

Стаття надійшла до редакції 07.10.2019.