

УДК 621.384.326

В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВОГО РОЗДІЛЕННЯ КОСМІЧНОГО СКАНЕРА

Вступ

Оптично-електронні системи спостереження знайшли широке застосування як космічні сканери для дистанційного зондування Землі. Однією з важливих характеристик космічних сканерів є просторове розділення, яке визначається мінімальним розміром елемента поверхні Землі, що здатний відтворити сканер [1, 2]. Існує значна кількість методів визначення і розрахунку просторового розділення оптичних і оптично-електронних систем, які формують зображення, але всі вони ґрунтуються лише на певних моделях об'єктива і приймача випромінювання [3]. У даній статті наведено методику визначення просторового сканера, в якому модуляційна передавальна функція (МПФ) об'єктива визначається експериментально у вигляді табличних цифрових даних.

Постановка задачі

Головними складовими космічного сканера є об'єктив, приймач випромінювання (ПВ) у вигляді лінійного приладу зарядового зв'язку (ПЗЗ) і електронний блок обробки відеосигналу [4]. Кожна з цих складових впливає на просторове розділення сканера, тобто на його здатність розділити (розрізнити) два близько розташованих точкових джерела випромінювання однакової інтенсивності [5].

Для ідеального об'єктива просторове розділення δV визначається проекцією чутливої площадки (пікселя) ПЗЗ-лінійки на поверхню Землі (рис. 1) [6]:

$$\delta V = h_f \frac{V_D}{f'_o}, \quad (1)$$

де h_f – висота польоту супутника; V_D – розмір пікселя; f'_o – фокусна відстань об'єктива.

Просторова роздільна здатність реального об'єктива визначається дифракцією на вхідній зіниці і аберациями. Для таких об'єктів їх роздільна здатність, тобто величина, обернена до подвійної найменшої відстані між двома точ-

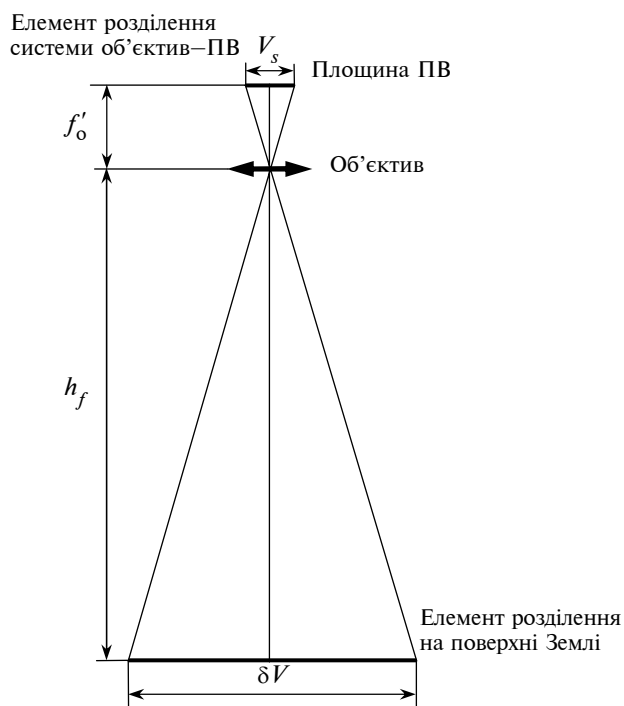


Рис. 1. До визначення просторового розділення космічного сканера

ками, що формуються роздільно, визначається [3, 7]:

1) *критерієм Релея*, згідно з яким дві точки зображення спостерігаються роздільно, якщо центр дифракційного зображення однієї точки збігається з першим мінімумом дифракційного зображення другої точки. З цього критерію випливає, що відстань між зображеннями двох точок, які спостерігаються роздільно, дорівнює радіусу кружка Ері:

$$r_E = 1,22 \frac{f'_o}{D_p} \lambda, \quad (2)$$

де D_p – діаметр вхідної зіниці об'єктива; λ – довжина хвилі;

2) роздільною здатністю, що відповідає певній частці концентрації світлової енергії в зображенні точкового джерела з радіусом r_e . Якщо розподіл освітленості в зображенні точкового джерела описується функцією $E(r)$, то радіус r_e визначається з інтегрального рівняння

$$\frac{\int_0^{r_e} E(r) r dr}{\int_0^{\infty} E(r) r dr} = k_e, \quad (3)$$

де k_e – частка світлової енергії, яка зосереджена в зображенні точкового джерела в межах кружка з радіусом r_e ;

3) роздільною здатністю v_{res}^c , що відповідає зменшенню контрасту зображення до певної величини C_0 .

Нехай ОС характеризується одновимірною МПФ $M_o(v_x)$. Якщо тест-об'єкт має контраст, який дорівнює одиниці, то роздільна здатність буде визначатися з рівняння

$$M_o(v_{res}^c) = C_0. \tag{4}$$

При цьому радіус кружка розсіювання об'єктива будемо обчислювати за формулою

$$r_c = \frac{1}{2v_{res}^c}. \tag{5}$$

Для оптично-електронних систем, до яких належить космічний сканер, роздільну здатність визначатимемо за рівнянням (4), до якого входить МПФ системи об'єктив-ПВ. За умов малого поля зору сканера і незначних контрастах яскравості об'єктів спостереження систему об'єктив-ПВ можна розглядати як лінійну інваріантну систему, для якої загальна МПФ системи $M_S(v_x)$ дорівнює добутку МПФ об'єктива $M_o(v_x)$ і МПФ ПВ $M_D(v_x)$.

Для математичного моделювання об'єктивів використовуються аналітичні апроксимації МПФ. В табл. 1 наведено три таких апроксимації МПФ [4]. Використання тієї чи іншої формули залежить від вигляду МПФ.

Таблиця 1. Функції для апроксимації МПФ об'єктива

Апроксимація	$M_o(v_x)$	a
1	$1 - a v_x$	$1,218 \frac{f'_o}{D_p} \lambda$
2	$(1 - a v_x)^n$	$\frac{1}{v_{x1}} (1 - \sqrt[n]{M_{o1}})$
3	$\exp \left[- \left(a \frac{v_x}{v_{x1}} \right)^2 \right]$	$\sqrt{\ln \left(\frac{1}{M_{o1}} \right)}$

Апроксимація 1 є лінійним наближенням дифракційно обмеженої системи, а апроксимації 2 і 3 описують МПФ, які задані окремими парами значень (v_{x1}, M_{o1}) . При цьому параметр n вибирається довільно. Апроксимація 3 МПФ

функцією Гаусса дає можливість легко виконати перетворення Фур'є. Проте при такій апроксимації відбувається не типове для ОС падіння контрасту, оскільки при $v_x \rightarrow 0$ $\partial M_o / \partial v_x \rightarrow 0$.

Модуляційна передавальна функція ПВ у вигляді ПЗЗ-лінійки, яка має пікселі прямокутної форми, визначається функцією [4]

$$M_D(v_x) = \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x}. \tag{6}$$

Методика розрахунку просторового розділення космічного сканера Egypt Sat

Оптичну схему сканера Egypt Sat, розробленого підприємством «Центральне конструкторське бюро «Арсенал»», зображено на рис. 2.

Оптично-електронна схема багатоспектрального сканера складається із дзеркально-лінзового об'єктива 1–6, клинів термобарокомпенсатора 7, 8, спектроділильного приземного блока 9 і чотирьох ПЗЗ-лінійок 10–13 (рис. 2). Об'єктив складається з лінзового компенсатора 1 і 2, сферичних дзеркал 3 і 4 та дволінзового компенсатора, що має дві одиночні лінзи, – від'ємну 5 і додатну 6. Перші дві лінзи 1 і 2 виготовлені із скла К108, лінзи 5 і 6 – із скла ТК102 і ТК116. Призматичний спектроділильний блок зроблений із скла БК110, а клини термобарокомпенсатора – із скла К108. Для усунення прямого засвічення площини ПЗЗ-лінійки об'єктив має дві конічні бленди 14 і 15, розміщені між сферичними дзеркалами 3 і 4. Для зменшення величини світлорозсіювання перед об'єктивом, а також між лінзовими компенсаторами 1, 2 і дзеркалом 3, і між лінзами другого компенсатора 5 і 6 розміщені світлозахисні діафрагми так, щоб розсіяне світло від прямих засвічень внутрішніх поверхонь оправ не потрапляло на фоточутливі елементи ПЗЗ-лінійок.

Розроблений і виготовлений оптично-механічний блок сканера на базі об'єктива Кассарена має такі параметри [8]:

- фокусну відстань 860,1 мм;
- діаметр вхідної зіниці 170 мм;
- кутове поле зору 4°8';
- спектральні діапазони по рівню $0,5\tau_{max}$:

канал I – $\Delta\lambda = 0,50\text{--}0,59$ мкм; канал II – $\Delta\lambda = 0,61\text{--}0,68$ мкм; канал III – $\Delta\lambda = 0,79\text{--}0,89$ мкм; канал IV – $\Delta\lambda = 0,50\text{--}0,89$ мкм.

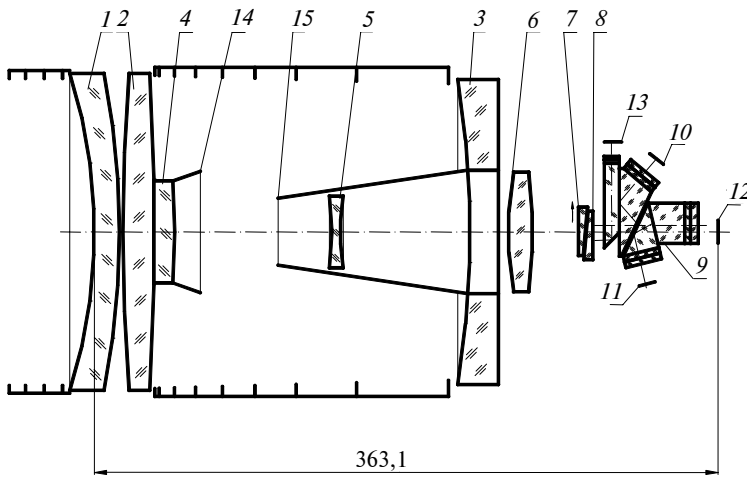


Рис. 2. Оптична схема оптично-механічного блока сканера Egypt Sat

За допомогою експериментальної установки [9] було визначено МПФ об'єктива сканера, числові значення якої наведено в табл. 2 для частоти Найквіста $v_x = 50 \text{ мм}^{-1}$.

Як ПВ в сканері використовується ПЗЗ-лінійка з розмірами пікселя $V_D \times W_D = 10 \times 10 \text{ мкм}^2$.

Будемо визначати МПФ об'єктива за формулою, що наведена у другому стовпці табл. 1 при $n = 1$, використовуючи експериментальні дані з табл. 2, тобто

$$M_o(v_x) = 1 - \frac{1 - M_{o1}}{v_{x1}} v_x, \quad (7)$$

де $M_{o1} = 0,62$ при $v_{x1} = 50 \text{ мм}^{-1}$ (для каналу II).

МПФ ПЗЗ-лінійки визначимо за формулою (6) як

$$M_D(v_x) = \sin c(V_D v_x) = \sin c(0,01 v_x). \quad (8)$$

Просторове розділення системи об'єктив–ПЗЗ-лінійка будемо знаходити з рівняння (4) при зменшенні контрасту зображення удвічі, тобто $C_0 = 0,5$:

$$M_o(v_x) M_D(v_x) = (1 - 0,0076 v_x) \times$$

$$\times \sin c(0,01 v_x) = 0,5. \quad (9)$$

Розв'язком цього рівняння є значення просторової частоти (роздільної здатності) $v_{\text{res}} = 42 \text{ мм}^{-1}$. Тоді просторове розділення у площині ПЗЗ-лінійки буде таким: $V_S = 1/2 v_x = 11,9 \text{ мкм}$. Просторове розділення на поверхні Землі визначимо за формулою (1)

$$\delta V = h_f \frac{V_S}{f'_o} = 9,4 \text{ м}, \quad (10)$$

де $h_f = 680 \text{ км}$ – висота польоту супутника; $f'_o = 860 \text{ мм}$ – фокусна

відстань об'єктива.

Проаналізуємо рівняння (9) для різних розмірів пікселя V_D . На рис. 3 зображено графіки МПФ системи об'єктив–ПВ для різних розмірів пікселя. При розв'язанні рівняння (4) для різних значень розміру пікселя отримано залежність просторового розділення δV космічного сканера, об'єктив якого показано на рис. 2, від розміру пікселя V_D , зображеного на рис. 4.

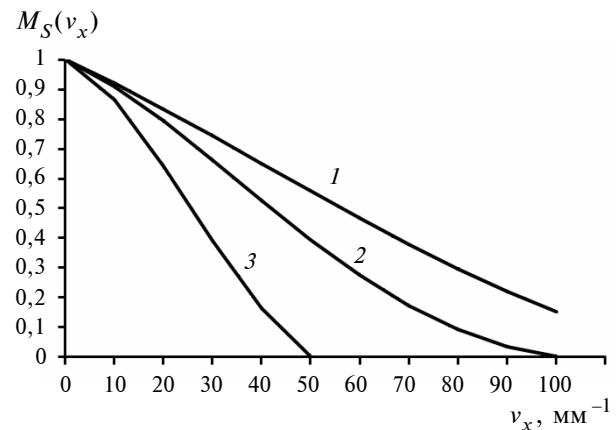


Рис. 3. Модуляційна передавальна функція оптично-електронної системи сканера для ПЗЗ-лінійки з розміром пікселя V_D , мкм: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 20

Таблиця 2. Значення МПФ розробленого об'єктива

σ	y' , мм	Переріз	Канал I	Канал II	Канал III	Канал IV
0°	0	–	0,59	0,62	0,53	0,59
$1^\circ 02'$	15,5	Меридіональний	0,59	0,55	0,46	0,49
		Сагітальний	0,58	0,56	0,45	0,51
$1^\circ 28'$	21,9	Меридіональний	0,60	0,56	0,45	0,50
		Сагітальний	0,57	0,54	0,42	0,49
$2^\circ 04'$	31	Меридіональний	0,52	0,50	0,41	0,46
		Сагітальний	0,55	0,51	0,41	0,46

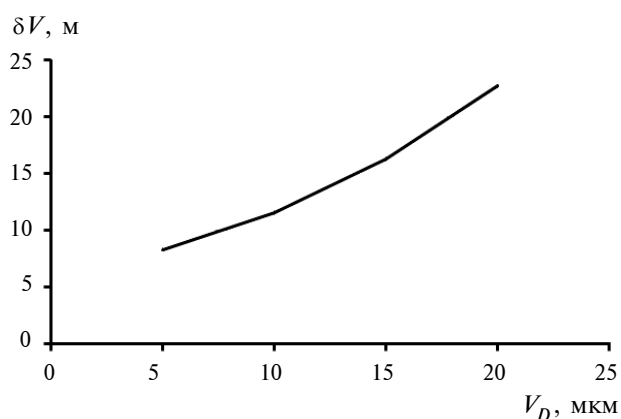


Рис. 4. Залежність просторового розділення космічного сканера на поверхні Землі від розміру пікселя ПЗС-лінійки

Аналіз отриманої залежності $\delta V(V_D)$ показав, що збільшення розміру пікселя вдвічі (до 20 мкм) призводить до погіршення просторового розділення на 68 %, а його зменшення вдвічі

(до 5 мкм) веде до покращення просторового розділення лише на 26 %.

Висновки

1. Запропонований метод дає можливість визначити просторове розділення космічного сканера, об'єктив якого має довільну модуляційну передавальну функцію, задану певним її значенням зменшення контрасту зображення, отриманим експериментальним способом.

2. Аналіз отриманої залежності просторового розділення сканера від розміру пікселя ПЗС-лінійки показав, що використання в сканері Egypt Sat ПЗС-лінійки з розміром пікселя 10 мкм є обґрунтованим.

3. Для подальшого дослідження необхідно розглянути просторове розділення вздовж напрямку руху супутника, яке залежить також і від швидкості польоту супутника, і від періоду зчитування сигналу з ПЗС-лінійки.

В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО СКАНЕРА

Предложен способ определения пространственной разрешающей способности космического сканера при уменьшении в два раза контраста изображения, которое формирует система объектив-ПЗС-линейка. Получено уравнение для расчета пространственного разрешения космического сканера, в котором модуляционная передаточная функция объектива задана в виде отдельной точки, определенной экспериментально. Исследовано влияние размера пикселя ПЗС-линейки на пространственное разрешение сканера.

V.G. Kolobrodov, M.I. Liholit

DETERMINATION OF SPATIAL RESOLUTION OF THE SPACE SCANNER

In this paper, we propose to determine spatial resolution of the space scanner when the image contrast, formed by the objective lens-CCD-array's system, is decreased twice. The obtained expression enables calculating spatial resolution of the space scanner. In this expression the modulation transfer function of the objective lens is represented by an experimentally obtained separate point. Furthermore, the influence of the pixel size of the CCD-array on spatial resolution of the scanner is studied.

1. *Зубко В.П., Іськов П.Я., Подолок І.Я., Стефанідин Я.І.* Огляд стану та тенденцій розвитку дистанційного зондування Землі // *Космічна наука і технологія*. – 1998. – 4, № 5/6. – С. 67–87.
2. *Тягур В.М., Лихолит М.І., Колобродов В.Г.* Оптичні системи космічних багатоспектральних сканерів // *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. – 2006. – № 6. – С. 125–132.
3. *Колобродов В.Г., Шустер Н.* Геометрична шумова сму- га пропускання – новий критерій визначення роз-

- дільної здатності оптичних та оптико-електронних приладів // Там же. – 2003. – № 2. – С. 97–101.
4. *Колобродов В.Г., Лихолит М.І.* Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 364 с.
5. *Колобродов В.Г.* О пространственном разрешении космических ИК-систем дистанционного зондирования Земли // *Космічна наука і технологія*. – 1997. – 3, № 5/6. – С. 55–87.

6. *Колобродов В.Г.* Проектирование оптической системы ПЗС-камеры космического базирования // Там же. – 1996. – 2, № 3-4. – С. 82–87.
7. *Проектирование оптических систем* / Под ред. Р. Шеннона и Дж. Вайанта; Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 432 с.
8. *Лихолит Н.И., Гринюк И.Е., Тягур В.М. и др.* Оптические системы многоспектрального сканера и сканера среднего ИК-диапазона // Тези доп. конф. “Приладобудування-2005: стан і перспективи”. – К.: НТУУ “КПІ”, 2005. – С. 68–69.
9. *Лихолит М.І., Тягур В.М., Кучеренко О.К. та ін.* Вимірювально-обчислювальний комплекс для контролю якості об’єктів // Вісн. НТУУ “КПІ”. Сер. Приладобудування. – 2003. – Вип. 25. – С. 38–45.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
13 листопада 2008 року