

**В.І. Лялько<sup>1</sup>, М.О. Попов<sup>1</sup>,  
С.А. Станкевич<sup>1</sup>, С.В. Шкляр<sup>1</sup>, В.М. Подорван<sup>1</sup>,  
М.І. Лихоліт<sup>2</sup>, В.М. Тягур<sup>2</sup>, К.В. Добровольська<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, Київ

<sup>2</sup> Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал» ДКА України, Київ

## **ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ІНФРАЧЕРВОНОГО СПЕКТРОРАДІОМЕТРА З ПІДВИЩЕННЯМ ПРОСТОРОВОЇ РОЗРІЗНЕНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ СУБПІКСЕЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ**



*Наведено математичну та фізичну моделі нового кадрового інфрачервоного спектрорадіометра на основі мікроболометричного матричного приймача із субпіксельною реєстрацією зображень. Спектрорадіометр планується включити до складу бортового обладнання перспективної супутникової системи «Січ» для одержання фізичних характеристик об'єктів земної поверхні за матеріалами інфрачервоної космічної зйомки з підвищенням просторової розрізненості.*

*Ключові слова: інфрачервона космічна зйомка, кадровий мікроболометричний спектрорадіометр, субпіксельна реєстрація зображень, підвищення просторової розрізненості.*

Аерокосмічна зйомка у видимому та інфрачервоному діапазонах електромагнітного спектра є важливим засобом ефективного вирішення природоресурсних і спеціальних задач: пошук корисних копалин і енергоносіїв, контроль екологічного стану та виявлення забруднень навколишнього середовища, оцінка міських і промислових тепловтрат, моніторинг стану сільськогосподарських та лісових насаджень, спостереження зон надзвичайних ситуацій, виявлення замаскованих об'єктів та ін. [1].

Значна частина тематичних задач потребує для свого вирішення даних про фізичні параметри спостережуваних об'єктів і покриттів земної поверхні, таких, як температура та власний коефіцієнт теплового випромінювання. Такі дані може забезпечити лише зйомка в да-

льньому інфрачервоному (тепловому) діапазоні 7–14 мкм [2], однак на сьогодні точність визначення температури та коефіцієнта теплового випромінювання об'єктів за її матеріалами далеко не завжди відповідає вимогам та умовам тематичної задачі, яку потрібно вирішити. Тому у світі активно ведуться роботи як у напрямку удосконалення технічних засобів інфрачервоної зйомки, так і з розробки ефективних алгоритмів обробки матеріалів теплової зйомки та відбудови дійсних величин означених фізичних параметрів [3].

Метою цього дослідження є розробка математичної та фізичної моделей нового кадрового інфрачервоного спектрорадіометра на основі мікроболометричного матричного приймача із субпіксельною реєстрацією зображень, який забезпечить одержання необхідних для вирішення багатьох тематичних задач дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) фізичних харак-

теристик об'єктів земної поверхні за матеріалами космічної зйомки.

### ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ЗЙОМКИ

Процес дистанційного вимірювання таких фізичних параметрів об'єктів і покриттів земної поверхні, як температура та власний коефіцієнт теплового випромінювання, ускладнюється двома обставинами. *По-перше*, у випадку реальних (не абсолютно чорних) тіл ці параметри знаходяться в нерозривному зв'язку. *По-друге*, обчислювана величина коефіцієнта теплового випромінювання об'єкта залежить від спектрального діапазону, в якому реєструється інфрачервоне випромінювання. З останнього випливає, що в разі багатоспектральної інфрачервоної зйомки кількість невідомих у рівняннях радіаційного переносу завжди на одиницю перевищує кількість рівнянь у системі. Отже, задача розділення фізичної температури і спектральних коефіцієнтів теплового випромінювання в загальному випадку є некоректною [4].

Слід також зазначити, що практичні дистанційні вимірювання фізичних характеристик земної поверхні виконуються як усереднені, зважені частками покриттів різних типів, в умовах суттєвої негомогенності покриття цієї поверхні в межах пікселя інфрачервоного зображення. Тому величини коефіцієнта теплового випромінювання будуть різнитися для різних пікселів, навіть якщо відомі його лабораторно виміряні значення для всіх типів покриттів. Тобто задача визначення температури  $T$  і коефіцієнта теплового випромінювання  $\varepsilon$  має розв'язуватися для кожного пікселя інфрачервоного зображення окремо.

Можливість дистанційного визначення температури базується на законі теплового випромінювання Планка:

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) M(\lambda, T) = \frac{\varepsilon(\lambda) c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}, \quad (1)$$

де  $L(\lambda, T)$  – спектральна щільність енергетичної яскравості земної поверхні;  $\varepsilon(\lambda)$  – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання;  $M(\lambda, T)$  – спектральна щільність енергетичної яскравості абсолютно чорного тіла;  $c_1 = 2hc^2 = 1,191 \cdot 10^{-16}$  Вт · м<sup>2</sup> і  $c_2 = \frac{hc}{k} = 1,439 \cdot 10^{-2}$  м × К – перша і друга константи закону Планка;  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – стала Планка;  $c = 2,998 \times 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі;  $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана;  $\lambda$  – довжина хвилі електромагнітного випромінювання [5].

Температуру можна знайти оберненням (1):

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\frac{\varepsilon(\lambda)c_1}{\lambda^5 L} + 1\right)}. \quad (2)$$

Теплове випромінювання підпорядковане закону зміщення Віна:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (3)$$

де  $\lambda_{\max}$  – довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної щільності енергетичної яскравості теплового випромінювання (1);  $b = 2898$  мкм · К – стала Віна. Для типової температури земної поверхні  $T = 25$  °С максимум випромінювання відповідає  $\lambda_{\max} = 9,72$  мкм, тобто саме дальньому інфрачервоному діапазону.

Спектральна щільність енергетичної яскравості  $L_i$  на апертурі інфрачервоного сенсора в спектральному каналі  $i$  на верхній межі атмосфери описується інтегральним рівнянням радіаційного переносу:

$$L_i = \varepsilon_i \tau_i \int M(\lambda, T) S_i(\lambda) d\lambda + L_i^\uparrow + (1 - \varepsilon_i) \tau_i L_i^\downarrow, \quad (4)$$

де  $\varepsilon_i$  – коефіцієнт теплового випромінювання в  $i$ -му спектральному каналі;  $\tau_i$  – коефіцієнт пропускання атмосфери в  $i$ -му спектральному каналі;  $S_i(\lambda)$  – нормована спектральна чутливість сенсора в  $i$ -му спектральному каналі;  $L_i^\uparrow$  і  $L_i^\downarrow$  – спектральна щільність енергетичної яск-

равості наростаючого та спадаючого випромінювання в  $i$ -му спектральному каналі [6].

Основним чинником, що обумовлює атмосферний вплив на радіаційний перенос в дальньому інфрачервоному діапазоні, виступає вміщена водяна пара. Крім того,  $\tau_i$  та  $L_i^{\uparrow}$ , а відповідно і зареєстрована яскравісна температура, залежать від кута візування сенсора. Отже, при визначенні фізичних характеристик земної поверхні за матеріалами інфрачервоної зйомки мають враховуватися атмосферні, кутові та емісійні невизначеності в рівнянні радіаційного переносу. І якщо два перші можуть бути усунені чи послаблені за допомогою додаткових орбітальних або наземних вимірювань, то невизначеність спектрального коефіцієнта теплового випромінювання завжди потребує певних апріорних припущень [7].

Вся різноманітність відомих методів визначення температури та коефіцієнта теплового випромінювання поділяється на дві принципово різні групи: 1) методи, що використовують моделі радіаційного переносу в тому чи іншому вигляді, та 2) методи, що використовують моделі відокремлення температури та коефіцієнта теплового випромінювання. Обидві групи потребують знання або безпосередньо коефіцієнта теплового випромінювання поверхні, що спостерігається, або певних інших характеристик земної поверхні, які дозволяють його оцінити. Першу групу методів може бути реалізовано навіть для одного робочого спектрального діапазону; друга, як правило, потребує не менше двох різних спектральних діапазонів [8].

Оскільки матричний спектрорадіометр, що досліджується, планується ввести до складу бортового оптико-електронного комплексу перспективної супутникової системи ДЗЗ «Січ» водночас зі знімальною апаратурою МСУ видимого і ближнього інфрачервоного діапазонів [9], доцільно розробити дві незалежні моделі визначення температури і коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні за матеріалами інфрачервоної зйомки: перша — для випадку комплексного застосування інфра-

рачервоного спектрорадіометра зі знімальною апаратурою МСУ, друга — для випадку самостійного застосування інфрачервоного спектрорадіометра. Обидві моделі додатково потребують розроблення допоміжних моделей — моделі бортового калібрування інфрачервоного спектрорадіометра та моделі урахування впливу атмосфери. Також для інформаційної підтримки моделей визначення фізичних характеристик земної поверхні за матеріалами інфрачервоної зйомки потрібна база даних (спектральна бібліотека) спектральних коефіцієнтів теплового випромінювання типових земних покривів і матеріалів в дальньому інфрачервоному діапазоні [10].

Найбільш точним та достовірним слід вважати метод визначення коефіцієнта теплового випромінювання на основі класифікації покриттів земної поверхні та застосування відповідних баз даних з наступним перерахуванням радіаційної температури земної поверхні, вимірної інфрачервоном радіометром, на термодинамічну [11]. Проте створення і валідація величезних баз даних спектральних коефіцієнтів теплового випромінювання та інших необхідних характеристик земних покриттів навіть на відносно невеликій території потребують значних витрат матеріальних ресурсів і часу [12]. Тому більш придатним для оперативної реалізації та урахування поточних умов зйомок здається метод визначення коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні на основі спеціального вегетаційного індексу VARI (Variable Atmospherically Resistant Index) [13]:

$$\varepsilon(\lambda) \approx a + b \ln \text{VARI}, \quad (5)$$

де  $\text{VARI} = \frac{\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{red}} - \rho_{\text{blue}}}$ ;  $\rho$  — спектральні коефіцієнти відбиття земної поверхні у відповідних діапазонах;  $a \approx 1,1011$  і  $b \approx 0,0857$  — коефіцієнти регресії.

При застосуванні інфрачервоного спектрорадіометра без підтримки матеріалами багатоспектральної зйомки у видимому та ближньо-

му інфрачервоному діапазонах (напр., вночі) задачу розділення фізичної температури та коефіцієнта теплового випромінювання можна розв'язати за рахунок спільної обробки інфрачервоних зображень, зареєстрованих в декількох спектральних діапазонах водночас. Оскільки розроблюваний інфрачервоний спектро радіометр передбачається обладнати 3–5-ма окремими спектральними каналами [14], то для обробки матеріалів його зйомки доцільно застосувати метод TES (Temperature and Emission Separation) [15], який здається найбільш досконалим серед інших методів розділення температури та коефіцієнта теплового випромінювання в багатоспектральних інфрачервоних системах [16].

Алгоритм TES послідовно комбінує три групи операцій:

1) нормалізацію коефіцієнтів теплового випромінювання в різних спектральних каналах:

$$\beta_i = \frac{\epsilon_i}{\sum_j \epsilon_j}, \quad (6)$$

де  $\beta_i$  – нормалізований коефіцієнт теплового випромінювання в  $i$ -му спектральному каналі;

2) обчислення максимальної нормалізованої різниці MMD (Minimum Maximum Difference)  $\Delta\beta_{\max} = \max_i \beta_i - \min_i \beta_i$ ;

3) визначення абсолютної величини мінімального значення коефіцієнта теплового випромінювання  $\epsilon_{\min}$ , виходячи з емпіричної залежності виду

$$\epsilon_{\min} \approx a + b (\Delta\beta_{\max})^r, \quad (7)$$

де  $a$ ,  $b$  і  $r$  – коефіцієнти показової регресії, які одержують експериментально для кожного конкретного багатоспектрального інфрачервоного радіометра окремо [17].

Після отримання ключової величини  $\epsilon_{\min}$  стає можливим зворотне обчислення абсолютних значень коефіцієнтів теплового випромінювання із (6):

$$\epsilon_i = \beta_i \frac{\epsilon_{\min}}{\min_j \beta_j}. \quad (8)$$

За допомогою (6)–(8) проведено розділення фізичної температури та коефіцієнта теплового випромінювання. Тепер температуру можна легко обчислити за оберненою формулою Планка (2).

### КАЛІБРУВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО СПЕКТРОРАДІОМЕТРА

Задачею калібрування інфрачервоного спектро радіометра є визначення коефіцієнтів перерахунку цифрових значень  $DN$  градацій сигналу вихідних зображень на абсолютну фізичну величину – спектральну щільність енергетичної яскравості  $L$  на апертурі сенсора, виміряну у Вт/(м<sup>2</sup> · мкм · ср). Важливішою вимогою до калібрування спектро радіометричної апаратури є забезпечення лінійності [18]. Лінійну калібрувальну характеристику можна описати залежністю між вхідною  $DN$  і вихідною  $L$  величинами у вигляді [19]

$$L = bDN + a, \quad (9)$$

де  $b$  і  $a$  – калібрувальні коефіцієнти, підсилення та зміщення.

Для підтримки уточнення калібрувальних коефіцієнтів у польоті конструкцією перспективного супутникового інфрачервоного спектро радіометра передбачено спеціальний калібрувальний пристрій в складі металевого випромінювального елемента дальнього інфрачервоного діапазону, обладнаного системою електропідігріву та прецизійним вбудованим термометром [20]. Підсистема бортового калібрування дозволяє при закритій вхідній апертурі одержувати інфрачервоні зображення випромінювального елемента у всьому полі огляду спектро радіометра при відомій фізичній температурі випромінювача. За наявності декількох (не менше трьох) вимірювань при різних температурах випромінювального елемента стає можливим розв'язати невизначеність калібрувальних коефіцієнтів та коефіцієнта теплового випромінювання випромінювача.

Отже, бортове калібрування інфрачервоного спектро радіометра здійснюється за набором

з не менше трьох вимірювань фізичної температури випромінювального елемента, відповідних значень зареєстрованої спектральної густини енергетичної яскравості  $L$  та зареєстрованих значень  $DN$ . Оскільки безпосередня реєстрація величини  $L$  на борту суттєво ускладнена або зовсім неможлива, то вона обчислюється за формулою (4), для чого також необхідна інформація про відносну спектральну чутливість сенсора в робочому спектральному діапазоні  $S(\lambda)$ .

Алгоритм калібрування виконується у два етапи:

На першому визначається коефіцієнт теплового випромінювання калібрувального випромінювача, виходячи із співвідношення (1):

$$\varepsilon = \frac{\Omega L}{M(\lambda, T)}, \quad (10)$$

де  $M(\lambda, T)$  — планківська спектральна густина енергетичної світності абсолютно чорного тіла;  $\Omega$  — залежний від внутрішньої геометрії калібрувального пристрою тілесний кут, в межах якого розповсюджується випромінювання.

На другому етапі за відліками відомих  $L$  і  $DN$  відновлюються значення калібрувальних коефіцієнтів  $a$  і  $b$  в надмірній системі рівнянь (9) методом найменших квадратів [21].

### ПІДВИЩЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ РОЗРІЗНЕННОСТІ ІНФРАЧЕРВОНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Нині просторова розрізненість мікроболометричних спектро радіометрів дальнього інфрачервоного діапазону визначається, в основному, технологічними обмеженнями при виготовленні фотоприймальних матриць і на сьогодні є явно недостатньою. У світі активно ведуться наукові дослідження, відпрацьовуються науково-технічні рішення і технології з субпіксельної реєстрації цифрових зображень, які потенційно можуть забезпечити підвищення просторової розрізненості знімальної апаратури без зміни характеристик фотоприймальної матриці [22]. Субпіксельна реєстрація зображень значно послабляє вимоги до кількості

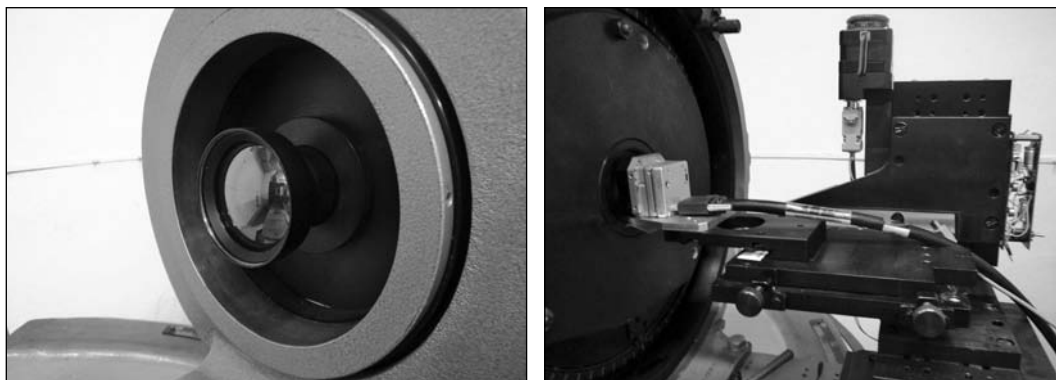
фотодетекторів багатоелементного фотоприймального пристрою за рахунок збільшення часу реєстрації та певного ускладнення конструкції знімальної апаратури. Критичним показником процесу тут виступає час формування одного кадру, обмежений з одного боку вимогою безперервності знімання в умовах руху платформи-носія знімальної апаратури, а з іншого — можливою частотою формування і зчитування кадрів матричного фотоприймача [23].

У запропонованій фізичній моделі інфрачервоного спектро радіометра забезпечується підвищення просторової розрізненості шляхом відновлення результуючого зображення за двома зображеннями меншої просторової розрізненості зміщеними одне відносно іншого. Вважається, що зміщення є поступальним, на неціле число пікселів [24]. Реалізовано метод гауссівської регуляризації на основі перетворення в ковзаючому вікні. Для зменшення зашумленості зображення використано метод ітеративної реконструкції зображення [25]. Метод полягає у почерговій регуляризації відновленого зображення та усуненні нев'язок — похибок, які отримуються при підстановці відновленого зображення з одночасним придушенням шумів за допомогою медіанної фільтрації на етапі зменшення розрізненості відновленого зображення [26].

Алгоритм обробки вхідних зображень низької розрізненості забезпечує суміщення фрагментів вхідних зображень, їх центрування, обчислення автоковаріаційних матриць, обчислення операторів віконної обробки та вищезазначену ітеративну регуляризацію.

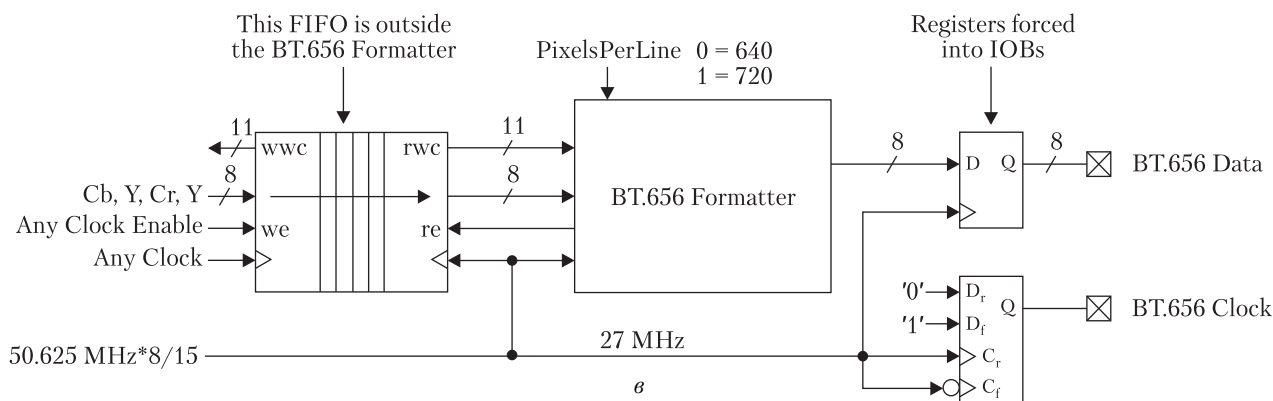
### ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ

Перевірка та відлагодження прийнятих технічних рішень щодо конструкції і функціональності матричного інфрачервоного спектро радіометра здійснювалися на створеній фахівцями Казенного підприємства спеціального приладобудування (КП СПБ) «Арсенал» фізичній моделі (рис. 1, а, б). Модель містить мікроболометричну фотоприймальну збірку, інфрачервоний об'єктив, світлоподільчий пристрій на

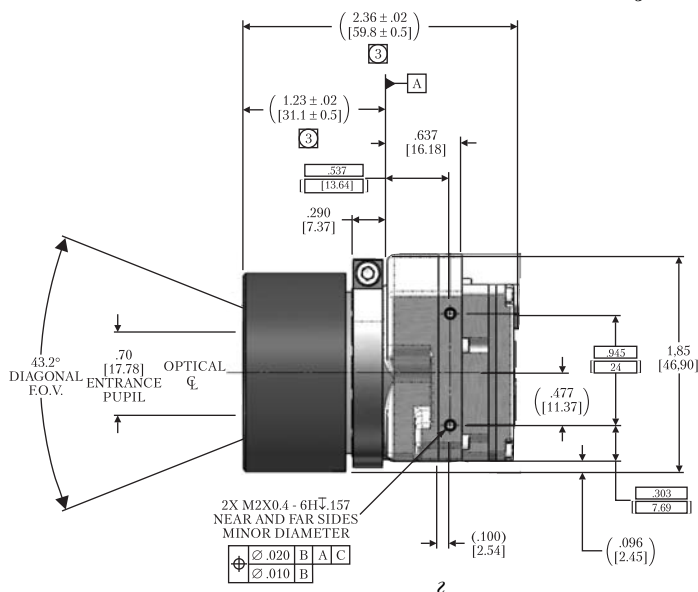


a

b



в

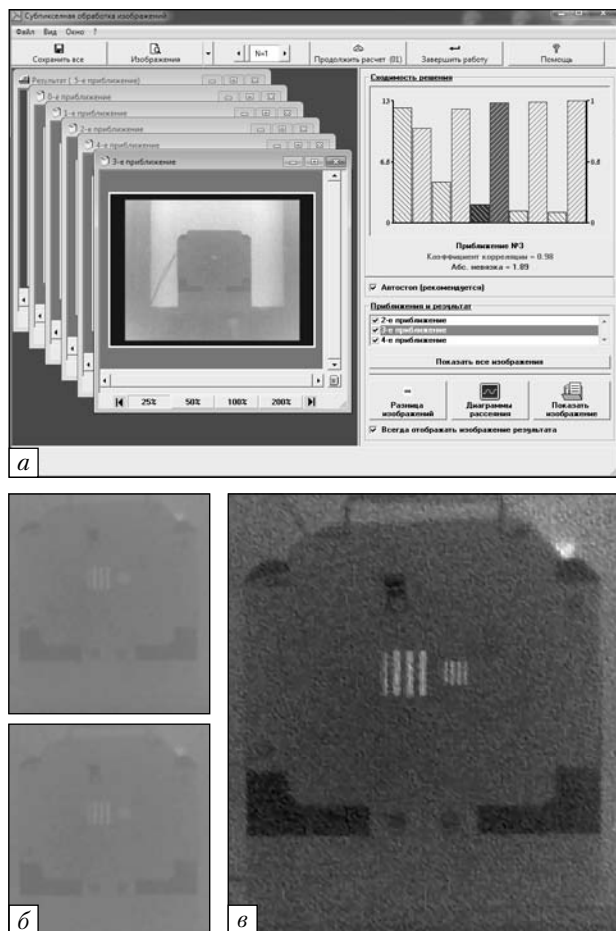


г

Рис. 1. Обладнання та схеми фізичної моделі інфрачервоного спектрорадіометра: а – оптичний об'єктив; б – фотоприймальна збірка; в – схема цифрового інтерфейсу фотоприймальної збірки, г – механічно-кріпильна схема оптичної головки

основі системи інфрачервоних світлофільтрів, який дозволяє утворювати 3–5 робочих спектральних діапазонів спектрорадіометра, а також всю необхідну оброблювальну та допомі-

жну електроніку [27]. Експериментальні дослідження фізичної моделі проводилися на спеціально розробленому в КП СПБ «Арсенал» випробувальному стенді в складі теплового бло-



**Рис. 2.** Графічний інтерфейс користувача (а) розробленого програмного забезпечення субпіксельної обробки інфрачервоних зображень і фрагменти вхідних цифрових зображень низької розрізненості (б) з тестовими мірами та результуючого цифрового зображення підвищеної розрізненості (в)

ку тестових зображень. Як тестові зображення використовувалися 4-шпальні інфрачервоні міри Фуко з різними значеннями просторової частоти і теплового контрасту, дзеркального оптичного коліматора і прецизійного позиціювального столика.

Модель була реалізована на основі OEM-продукту неохолоджуваної мікроболометричної камери дальнього інфрачервоного діапазону серії Tau (<http://www.flir.com/cores/display/?id=51981>) виробництва відомої корпорації FLIR Systems, Inc. Схеми цифрового інтерфейсу і

механічну схему фотоприймальної збірки показано на рис. 1, в, г. Продукти FLIR Systems широко застосовуються в світі, в т. ч. для авіаційних і спеціальних інфрачервоних систем. Розроблена фізична модель відрізняється від сучасних відомих [28] наявністю підсистеми субпіксельної обробки отримуваних цифрових інфрачервоних зображень, що потенційно спроможне забезпечити суттєво кращу розрізненість приладу. Субпіксельну реєстрацію інфрачервоних зображень на борту буде здійснено завдяки спеціальному технічному рішення [29], яке є частиною загальної запропонованої технології.

Субпіксельну обробку вхідної послідовності інфрачервоних зображень було реалізовано за допомогою створеного фахівцями Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі (ЦАКДЗ) Інституту геологічних наук (ІГН) НАН України спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє швидко та зручно одержувати інфрачервоні зображення підвищеної розрізненості. Програмне забезпечення має модульну архітектуру та сучасний багатовіконний графічний інтерфейс користувача (рис. 2), підтримує розповсюджені формати цифрових зображень. Загалом структура програмного забезпечення включає 10 окремих розрахункових модулів [30].

## ОДЕРЖАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОЦІНКИ

Експериментальна перевірка розробленої фізичної моделі інфрачервоного спектрорадіометра виконувалася шляхом одержання декількох серій тестових інфрачервоних зображень з різними параметрами — робочими спектральними діапазонами, температурами, складом оптичних мір тощо — та наступною їх обробкою і оцінкою основних забезпечуваних характеристик — просторової розрізненості, теплового контрасту, що забезпечує впевнене виявлення тест-об'єктів, калібрувальних коефіцієнтів та точності відтворення фізичних характеристик температури і коефіцієнта теплового випромінювання.

У процесі експериментальних досліджень створеної фізичної моделі оцінювалися ступінь підвищення просторової розрізненості за рахунок субпіксельної обробки, мінімальна різниця температур, що виявляється (MDTD), та мінімальна різниця температур, що розрізняється (MRTD).

Статистичне оцінювання просторової розрізненості  $r^*$  за тестовими зображеннями інфрачервоних мір ґрунтується на обчисленні достовірності розділення відповідних областей цифрового знімка [31]:

$$r^* = \frac{1}{v^*} \cong \frac{a \sigma}{|\Delta x|} \Phi^{-1}(P^*), \quad (11)$$

де  $v^*$  — порогова просторова частота зображення, на якій тест-об'єкт розпізнається з достатньою, наперед заданою імовірністю  $P^*$ ;  $a$  — фізичний розмір фотодетектора багатоеlementного фотоприймального пристрою;  $\sigma$  — сумарне середньоквадратичне відхилення шумів у зображенні;  $\Delta x$  — різниця середніх значень сигналу в зображеннях шпал та проміжків міри;  $\Phi(x)$  — таблицна функція Лапласа [32].

Одержані статистичні оцінки свідчать про підвищення просторової розрізненості фізичної моделі не менш ніж в 1,66 рази з 95%-ою достовірністю та збільшення MRTD у середньому в 1,41 рази [33].

Точність визначення температури та коефіцієнта теплового випромінювання за матеріалами інфрачервоної зйомки залежить від багатьох факторів, зокрема від похибок, що обумовлені неточностями визначення типів земного покриття, оцінювання параметрів атмосфери, застосованого методу і обчислювальних алгоритмів. Достовірно врахувати більшість цих невизначеностей не уявляється можливим. Але точність власне радіометра визначається, в основному, похибками калібрування і її можна теоретично оцінити, простеживши поширення наявних похибок через обчислювальний тракт визначення фізичних характеристик земної поверхні.

Аналітичний розв'язок розповсюдження похибок в рівняннях радіаційного переносу (1)–(4) для оцінювання точності визначення температури земної поверхні ускладнений, тому було застосовано статистичне моделювання методом Монте-Карло. Середньоквадратичні відхилення температури, обумовлені похибками калібрування фізичної моделі спектрорадіометра, знаходяться в межах 0,08–0,37 К. Точне визначення коефіцієнта теплового випромінювання проводилося за алгоритмом TES, співвідношення якого (6)–(8) допускають аналітичний розв'язок відносно похибок [34]. Обчислені похибки визначення коефіцієнта теплового випромінювання склали від 0,005 до 0,02.

## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Таким чином, в ході виконання проекту було створено та досліджено фізичну модель кадрового інфрачервоного спектрорадіометра на основі мікроболометричного матричного приймача із субпіксельною реєстрацією зображень, призначеного для одержання кількісних фізичних характеристик об'єктів земної поверхні за матеріалами космічної зйомки із застосуванням супутникового інфрачервоного спектрорадіометра при вирішенні тематичних задач ДЗЗ.

У процесі виконання проекту були розроблені математична модель та алгоритми визначення термодинамічної температури і зональних коефіцієнтів теплового випромінювання, алгоритми та демонстраційне програмне забезпечення для субпіксельної обробки інфрачервоних зображень, створено випробувальний стенд фізичної моделі інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненості та проведено експериментальну перевірку розробленої фізичної моделі інфрачервоного спектрорадіометра.

Впровадження одержаних у результаті виконання проекту результатів забезпечить підвищення просторової розрізненості інфрачервоної зйомки за рахунок субпіксельної обробки зображень в 1,4–1,8 рази без суттєвого



ускладнення конструкції інфрачервоного спектрорадіометра.

Отже, розроблена фізична модель є експериментальним підтвердженням можливості створення перспективного супутникового матричного інфрачервоного спектрорадіометра з технічними характеристиками, що не поступаються кращим світовим зразкам.

У результаті виконання проекту були забезпечені технологічні можливості для впровадження програмних і технічних рішень, які будуть використані при створенні першого вітчизняного супутникового інфрачервоного спектрорадіометра. На сьогодні результати виконання проекту впроваджено в КП СПБ «Арсенал» при розробці та виготовленні діючого зразка матричної знімальної камери для перспективної космічної системи ДЗЗ в межах завдань, поставлених державною цільовою науково-технічною космічною програмою України на 2013–2017 роки.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на удосконалення моделей і алгоритмів визначення фізичних характеристик земної поверхні за матеріалами інфрачервоної зйомки з метою підвищення точності вимірювань температури та коефіцієнта теплового випромінювання; розробку нових методів і схем субпіксельної реєстрації та відновлення інфрачервоних зображень з метою подальшого підвищення їх просторової розрізненості та покращення MRTD; створення інженерного макету та дослідного конструктивного зразка перспективного супутникового інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненості за допомогою субпіксельної обробки зображень. Також потрібно провести модернізацію випробувального стенда для дослідження фізичної моделі спектрорадіометра у зв'язку з необхідністю додаткової перевірки методик калібрування вимірювань температури та коефіцієнтів теплового випромінювання тест-об'єктів в умовах, наближених до реальних.

Дослідження виконувалося в рамках інноваційного науково-технічного проекту «Цільова

комплексна програма НАН України з наукових космічних досліджень на 2012–2016 рр.» за фінансової підтримки НАН України (постанова Президії НАН України № 142 від 05.03.2014 р., проектний грант № 13).

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В.І. Лялько та М.О. Попова. – К.: Наук. думка, 2006. – 360 с.
2. Станкевич С.А. Виявлення додаткових розпізнавальних ознак об'єктів за результатами багатозонального дистанційного спостереження в інфрачервоному спектральному діапазоні // Труды академії. – Вип. 23. – К.: НАО України, 1999. – С. 92–99.
3. Dash P., Gottsche F.-M., Olesen F.-S., Fischer H. Retrieval of land surface temperature and emissivity from satellite data: Physics, theoretical limitations and current methods // J. of the Indian Society of Remote Sensing. – 2001. – V. 29. – № 1–2. – P. 23–30.
4. Баранов В.Л., Водоп'ян С.В., Гришук Р.В. Алгоритм автоматизованого оцінювання спектрального коефіцієнта теплового випромінювання // Вісник ЖДТУ. – 2006. – № 4(39). – С. 77–83.
5. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Советское радио, 1978. – 400 с.
6. Tang H., Li Z.-L. Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications / Berlin: Springer-Verlag, 2014. – 281 p.
7. Kealy P.S., Hook S.J. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: Implications for recovering land surface temperatures // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1993. – V. 31. – № 6. – P. 1155–1164.
8. Wan Z., Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1996. – V. 34. – № 4. – P. 892–905.
9. Попов М.А., Лихолит Н.И., Станкевич С.А. и др. Обоснование технического облика бортового оптико-электронного комплекса среднего пространственного разрешения перспективного спутника дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 2. – № 7. – С. 293–299.
10. Li Z., Li J., Jin X. et al. An objective methodology for infrared land surface emissivity evaluation // J. of Geophysical Research. – 2010. – V. 115. – № D22. – P. 308–322.
11. Snyder W.C., Wan Z., Zhang Y., Feng Y.-Z. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement

- from space // Intern. J. of Remote Sensing. — 1998. — V. 19. — № 14. — P. 2753–2774.
12. *Hulley G.C., Hook S.J., Baldrige A.M.* ASTER Land Surface Emissivity Database of California and Nevada // Geophysical Research Letters. — 2008. — V. 35. — № L 13. — P. 401–406.
  13. *Jiménez-Muñoz J.C., Sobrino J.A., Guaner L. et al.* Fractional vegetation cover estimation from Proba/CHRIS data: Methods, analysis of angular effects and application to the land surface emissivity retrieval // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> ESA CHRIS/Proba Workshop. — Frascati: ES-RIN, 2005. — P. 161–170.
  14. *Попов М.О., Ліхоліт М.І., Станкевич С.А. та ін.* Мікроболометрична матрична камера дальнього інфрачервоного діапазону для космічної зйомки // Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи». — К.: НТУУ «КПІ», 2012. — С. 68–69.
  15. *Liang S.* An optimization algorithm for separating land surface temperature and emissivity from multispectral thermal infrared imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2001. — V. 39. — № 2. — P. 264–274.
  16. *Payan V., Royer A.* Analysis of Temperature Emissivity Separation (TES) algorithm applicability and sensitivity // Intern. J. of Remote Sensing. — 2004. — V. 25. — № 1. — P.15–37.
  17. *Liu H., Zhang C., Ye F., Zhang J.* Temperature and emissivity separation methods based on TASI data // Proceedings of International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013). — Nanjing: Atlantis Press, 2013. — P. 685–688.
  18. *Панфилов А.С., Бурдакин А.А., Гаврилов В.Р. и др.* Качество радиометрических данных оптической аппаратуры наблюдения Земли и построение российской системы обеспечения единства радиометрических измерений этой аппаратурой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т. 9. — № 2. — С. 152–159.
  19. *Попов М.О., Станкевич С.А., Зелик Я.І. та ін.* Калібрування спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи «Січ-2» за наземними спектрометричними вимірюваннями: попередні результати // Космічна наука і технологія, 2012. — Т. 18. — № 5. — С. 59–65.
  20. *Лихоліт Н.І., Тягур В.М., Харитоненко Е.В.* ИК-камера космического базирования с микроболометрической матрицей // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Авіа–2013». — К.: НАУ, 2013. — С. 61–63.
  21. *Балько И.А., Левашов С.В., Холодов Д.В., Балько А.К.* Решение системы линейных уравнений с избыточным числом уравнений // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC-2012). — Ч. 7. — М.: МИРЭА, 2012. — С. 136–138.
  22. *Super-Resolution Imaging* / Ed. by P. Milanfar. — Boca Raton: CRC Press, 2010. — 490 p.
  23. *Stankevich S.A., Shklyar S.V., Tyagur V.M.* Subpixel resolution satellite imaging technique // Proceedings of the Ninth International Conference on Digital Technologies (DT'2013). — Žilina: University of Žilina, 2013. — P. 81–84.
  24. *Станкевич С.А., Шкляр С.В., Лубський М.С.* Підвищення просторової розрізненості аерознімання на основі субпіксельної реєстрації зображень // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації.— Вип.9(16). — К.: ДНДІА, 2013. — С. 110–117.
  25. *Bannore V.* Iterative-Interpolation Super-Resolution Image Reconstruction: A Computationally Efficient Technique. — Berlin: Springer, 2009. — 113 p.
  26. *Попов М.А., Станкевич С.А., Шкляр С.В.* Алгоритм підвищення розрешення субпіксельно смещених зображень // Математичні машини та системи. — 2015. — № 1. — С. 29–36.
  27. *Попов М.А., Станкевич С.А., Шкляр С.В. et al.* Functional model of the new multiband infrared radiometer for «Sich» Earth observation satellite system // Тези доповідей 14-ої Української конференції з космічних досліджень. — Ужгород: Інститут електронної фізики НАН України, 2014. — С. 72.
  28. *Tatsumi K., Sakuma F., Kikuchi M. et al.* A compact thermal infrared imaging radiometer with high spatial resolution and wide swath for a small satellite using a large format uncooled infrared focal plane array // Proceedings SPIE 9241, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVIII. — Amsterdam: SPIE, 2014. — 92411F.
  29. *Пат. № 109181, Україна, МПК6 G01C 3/08, G01V 8/20, G06K 9/00, G06K 9/32, H04N 5/225.* Спосіб підвищення просторової розрізненості при дистанційній зйомці з використанням субпіксельної реєстрації зображень та пристрій для його здійснення / М.І. Ліхоліт, В.І. Лялько, М.О. Попов, С.А. Станкевич, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко.— № 201311086; заявл. 17.09.2013; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.— 8 с.
  30. *Попов М.А., Станкевич С.А., Тягур В.М. и др.* Повышение пространственного разрешения путём субпиксельной обработки изображений // Матеріали Восьмої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій–2014» (ПТ-2014). — К.: ІТС НТУУ «КПІ», 2014. — С. 57–60.
  31. *Станкевич С.А.* Статистичний підхід до визначення порогової модуляції цифрових аерокосмічних зображень // Космічна наука і технологія. — 2005. — Т. 11. — № 3/4. — С. 81–84.

32. Станкевич С.А., Шкляр С.В. Удосконалений алгоритм визначення перехідної функції на цифровому аерокосмічному зображенні // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. — 2005. — Т. 18(57). — № 2. — С. 97–102.
33. Лялько В.І., Попов М.О., Станкевич С.А. та ін. Фізична модель інфрачервоного спектродіометра із субпіксельним підвищенням просторової розрізненості // Матеріали Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування». — К.: КП СПБ «Арсенал», 2014. — С. 33–35.
34. Sabol Jr. D.E., Gillespie A.R., Abbott E., Yamada G. Field validation of the ASTER Temperature–Emissivity Separation algorithm // Remote Sensing of Environment. — 2009. — V. 113. — № 11. — P. 2328–2344.

#### REFERENCES

1. Bagatospektral'ni metody dystancijnogo zonduvannja Zemli v zadachah pryrodokorystuvannja. Za red. V.I. Ljal'ko ta M.O. Popova. Kyiv: Nauk. dumka, 2006 [in Ukrainian].
2. Stankevych S.A. Vyjavlennja dodatkovyh rozpoznaval'nyh oznak ob'ektiv za rezul'tatamy bagatozonal'nogo dystancijnogo sposterezhennja v infrachervonomu spektraln'omu diapazoni. *Trudy akademii*. Vyp.23. Kyiv: NAO Ukrainy, 1999: 92–99 [in Ukrainian].
3. Dash P., Gottsche F.-M., Olesen F.-S., Fischer H. Retrieval of land surface temperature and emissivity from satellite data: Physics, theoretical limitations and current methods. *J. of the Indian Society of Remote Sensing*. 2001, 29(1–2): 23–30.
4. Baranov V.L., Vodop'jan S.V., Gryshhuk R.V. Algoritm avtomatyzovanogo ocinjuvannja spektral'nogo koeficienta teplovogo vyprominjuvannja. *Visnyk ZhDTU*. 2006, N 4(39): 77–83 [in Ukrainian].
5. Kriksunov L.Z. *Spravochnik po osnovam infrakrasnoj tehniki*. Moskva: Sovetskoe radio, 1978 [in Russian].
6. Tang H., Li Z.-L. *Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2014.
7. Kealy P.S., Hook S.J. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: Implications for recovering land surface temperatures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1993, 31(6): 1155–1164.
8. Wan Z., Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1996, 34(4): 892–905.
9. Popov M.A., Liholit N.I., Stankevich S.A. i dr. Obosnovanie tehničeskogo oblika bortovogo optiko-jelektronogo kompleksa srednego prostranstvennogo razreshennja perspektivnogo sputnika distancionnogo zondirovanija Zemli. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2010, 2(7): 293–299 [in Russian].
10. Li Z., Li J., Jin X. et al. An objective methodology for infrared land surface emissivity evaluation. *J. of Geophysical Research*. 2010. V. 115. N D22: 308–322.
11. Snyder W.C., Wan Z., Zhang Y., Feng Y.-Z. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *Intern. J. of Remote Sensing*. 1998, 19(14): 2753–2774.
12. Hulley G.C., Hook S.J., Baldridge A.M. ASTER Land Surface Emissivity Database of California and Nevada. *Geophysical Research Letters*. 2008. V. 35. N L13: 401–406.
13. Jiménez-Muñoz J.C., Sobrino J.A., Guaner L. et al. Fractional vegetation cover estimation from Proba/CHRIS data: Methods, analysis of angular effects and application to the land surface emissivity retrieval. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> ESA CHRIS/Proba Workshop*. Frascati: ESRIN, 2005: 161–170.
14. Popov M.O., Liholit M.I., Stankevych S.A. ta in. Mikrobolometryčna matryčna kamera dal'nogo infrachervonogo diapazonu dlja kosmičnoj' zjomky. *Tezy dopovidej XI Mizhnarodnoi' nauково-tehničnoj' konferencii' «Pryladobuduvannja: stan i perspektivy»*. Kyiv: NTUU «KPI», 2012 [in Ukrainian].
15. Liang S. An optimization algorithm for separating land surface temperature and emissivity from multispectral thermal infrared imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001, 39(2): 264–274.
16. Payan V., Royer A. Analysis of Temperature Emissivity Separation (TES) algorithm applicability and sensitivity. *Intern. J. of Remote Sensing*. 2004, 25(1): 15–37.
17. Liu H., Zhang C., Ye F., Zhang J. Temperature and emissivity separation methods based on TASI data. *Proceedings of International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013)*. Nanjing: Atlantis Press, 2013: 685–688.
18. Panfilov A.S., Burdakin A.A., Gavrilo V.R. i dr. Kachestvo radiometričeskikh dannyh optičeskoj apparatury nabljudenija Zemli i postroenie rossijskoj sistemy obespečenija edinstva radiometričeskikh izmerenij jetoj apparaturoj. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2012, 9(2): 152–159 [in Russian].
19. Popov M.O., Stankevych S.A., Zjelyk Ja.I. ta in. Kalibruvannja spektral'noi' chutlyvosti sensora bagatospektral'noi' sputnykovoï systemy «Sich-2» za nazemnymi spektrometryčnymi vymirjuvannjamy: poperedni rezul'taty. *Kosmična nauka i tehnologija*. 2012, 18(5): 59–65 [in Ukrainian].
20. Liholit N.I., Tjagur V.M., Haritonenko E.V. IK-kamera kosmičeskogo bazirovanija s mikrobolometričeskoj matricej. *Materiali XI Mizhnarodnoi' nauково-tehničnoj' kon-*

- ferencii «Avia–2013». Kyiv: NAU, 2013: 61–63 [in Russian].
21. Balyko I.A., Levashov S.V., Holodov D.V., Balyko A.K. Reshenie sistemy linejnyh uravnenij s izbytochnym chislom uravnenij. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroenija» (INTERMATIC-2012)*. Ch. 7. Moskva: MIRJeA, 2012 [in Russian].
  22. *Super-Resolution Imaging*. Ed. by P. Milanfar. Boca Raton: CRC Press, 2010.
  23. Stankevich S.A., Shklyar S.V., Tyagur V.M. Subpixel resolution satellite imaging technique. *Proceedings of the Ninth International Conference on Digital Technologies (DT'2013)*. Žilina: University of Žilina, 2013: 81–84.
  24. Stankevych S.A., Shklyar S.V., Lubs'kyj M.S. Pidvyshennja prostoroivoi' rozrizenosti aeroznimannja na osnovi subpiksel'noi' rejestracii' zobrazhen'. *Zbirnyk naukovykh prac' Derzhavnogo naukovo-doslidnogo instytutu aviacii'*. Vyp.9(16). Kyiv: DNDIA, 2013: 110–117 [in Ukrainian].
  25. Bannore V. *Iterative-Interpolation Super-Resolution Image Reconstruction: A Computationally Efficient Technique*. Berlin: Springer, 2009.
  26. Popov M.A., Stankevich S.A., Shklyar S.V. Algoritm povyshenija razreshenija subpiksel'no smeshhjonnyh zobrazhenij. *Matematichni mashini ta sistemi*. 2015, N 1: 29–36 [in Russian].
  27. Popov M.A., Stankevich S.A., Shklyar S.V. et al. Functional model of the new multiband infrared radiometer for «Sich» Earth observation satellite system. *Tezy dopovidej 14-oi' Ukrai'ns'koi' konferencii' z kosmichnyh doslidzhen'*. Uzhgorod: Instytut elektronnoi' fizyky NAN Ukrai'ny, 2014: 72.
  28. Tatsumi K., Sakuma F., Kikuchi M. et al. A compact thermal infrared imaging radiometer with high spatial resolution and wide swath for a small satellite using a large format uncooled infrared focal plane array. *Proceedings SPIE 9241, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVIII*. Amsterdam: SPIE, 2014: 92411F.
  29. *Pat. № 109181, Ukrai'na, MPK6 G01C 3/08, G01V 8/20, G06K 9/00, G06K 9/32, H04N 5/225*. Sposib pidvyshennja prostoroivoi' rozrizenosti pry dystancijnij zjombci z vykorystannjam subpiksel'noi' rejestracii' zobrazhen' ta prystrij dlja jogo zdijsnennja. M.I. Lyholit, V.I. Ljal'ko, M.O. Popov, S.A. Stankevych, V.M. Tjagur, E.V. Harytonenko [in Ukrainian].
  30. Popov M.A., Stankevych S.A., Tjagur V.M. y dr. Povishenje prostranstvennogo razreshenija putem subpiksel'noj obrabotky vobrazhenyj. *Materialy Vos'moi' Mizhnarodnoi' naukovo-tehnichnoi' konferencii' «Problemy telekomunikacij–2014» (PT-2014)*. Kyiv: ITS NTUU «KPI», 2014: 57–60 [in Ukrainian].
  31. Stankevych S.A. Statystychnyj pidhid do vyznachennja porogovoivoi' moduljacii' cyfrovnyh aerokosmichnyh zobrazhen'. *Kosmichna nauka i tehnologija*. 2005, 11(3/4): 81–84 [in Ukrainian].
  32. Stankevych S.A., Shklyar S.V. Udoskonalenyj algoritm vyznachennja perehidnoivoi' funkcii' na cyfrovomu aerokosmichnomu zobrazheni. *Uchenie zapysky Tavrycheskogo nacyonal'nogo unyversyteta im. V.Y. Vernadskogo*. 2005. T. 18(57). N 2: 97–102 [in Ukrainian].
  33. Ljal'ko V.I., Popov M.O., Stankevych S.A. ta in. Fizychna model' infrachervonogo spektrodiametra iz subpiksel'nym pidvyshennjam prostoroivoi' rozrizenosti. *Materialy Ukrai'ns'koi' naukovo-tehnichnoi' konferencii' «Aviakosmichne prykladobuduvannja»*. Kyiv: KP SPB «Arsenal», 2014: 33–35 [in Ukrainian].
  34. Sabol Jr. D.E., Gillespie A.R., Abbott E., Yamada G. Field validation of the ASTER Temperature–Emissivity Separation algorithm. *Remote Sensing of Environment*. 2009, 113(11): 2328–2344.

В.И. Лялько<sup>1</sup>, М.А. Попов<sup>1</sup>,

С.А. Станкевич<sup>1</sup>, С.В. Шкляр<sup>1</sup>, В.Н. Подорван<sup>1</sup>,  
Н.И. Лихолит<sup>2</sup>, В.М. Тягур<sup>2</sup>, Е.В. Добровольская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научный центр аэрокосмических исследований  
Земли ИГН НАН Украины, Киев

<sup>2</sup> Казённое предприятие специального приборостроения  
«Арсенал» ГКА Украины, Киев

#### ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНФРАКРАСНОГО СПЕКТРОРАДИОМЕТРА С ПОВЫШЕНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ СУБПИКСЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлены математическая и физическая модели нового кадрового инфракрасного спектродиаметра на основе микроболометрического матричного приёмника с субпиксельной регистрацией изображений. Спектродиаметр планируется включить в состав бортового оборудования перспективной спутниковой системы «Січ» для получения физических характеристик объектов земной поверхности по материалам инфракрасной космической съёмки с повышением пространственного разрешения.

*Ключевые слова:* инфракрасная космическая съёмка, субпиксельная регистрация изображений, кадровый микроболометрический спектродиаметр, повышение пространственного разрешения.

*V.I. Lyalko<sup>1</sup>, M.A. Popov<sup>1</sup>, S.A. Stankevich<sup>1</sup>, S.V. Shklyar<sup>1</sup>,  
V.N. Podorvan<sup>1</sup>, N.I. Likholiit<sup>2</sup>, V.M. Tiagur<sup>2</sup>, C.V. Dobrovolska<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Scientific Centre for Aerospace Research  
of the Earth, NAS of Ukraine, Kyiv

<sup>2</sup> «ARSENAL» SDP SE, State Space Agency of Ukraine, Kyiv

PHYSICAL SIMULATOR OF INFRARED  
SPECTRORADIOMETER WITH SPATIAL  
RESOLUTION ENHANCEMENT USING SUBPIXEL  
IMAGE REGISTRATION AND PROCESSING

The mathematical and physical models of the new frame  
infrared spectroradiometer based on microbolometer array

sensor with subpixel image registration are presented. It is  
planned to include the radiometer into onboard instrumen-  
tation of the future «Sich» satellite system for the land sur-  
face physical characterization by enhanced spatial resolu-  
tion infrared space imagery.

*Keywords:* infrared satellite imaging, frame microbo-  
lometer array spectroradiometer, subpixel image registra-  
tion, spatial resolution enhancement.

Стаття надійшла до редакції 02.06.15