



УКРАЇНА

ДЕРЖАВНЕ  
ПАТЕНТНЕ  
ВІДОМСТВО

(19) UA (11) 17856 (13) A

(51) G 01 J 1/10

ОПИС ДО ПАТЕНТУ  
НА ВІНАХІДбез проведення експертизи по суті  
на підставі Постанови Верховної Ради України  
№ 3769-XII від 23.XII. 1993 рПублікується  
в редакції заявника

(54) СПОСІБ КАЛІБРУВАННЯ ЯСКРАВОСТІ ПРОТЯЖНИХ ЗААТМОСФЕРНИХ ОБ'ЄКТІВ

1

(21) 94042123  
 (22) 04.04.94  
 (24) 03.06.97  
 (46) 31.10.97. Бюл. № 5  
 (47) 03.06.97  
 (72) Євтушевський Олександр Михайлович,  
 Міліневський Геннадій Петрович, Кравченко  
 Володимир Олексійович  
 (73) Київський університет ім. Тараса Шев-  
 ченка (UA)  
 (57) Спосіб калібрування яскравості протяж-  
 них заатмосферних об'єктів, який включає  
 реєстрацію послідовності позафокальних зоб-  
 ражень точкового заатмосферного стандарту  
 яскравості в досліджуваній ділянці спектра і  
 визначення енергетичної яскравості, що  
 відповідає кожному позафокальному зобра-  
 женню, який відрізняється тим, що

2

яскравості стандарту розширюють за межі,  
 властиві зоряним стандартам шляхом ство-  
 рення штучного заатмосферного стандарту  
 яскравості – дзеркально відбиваючої соняч-  
 не випромінювання сфери, а значення мак-  
 симальної енергії в розширеному діапазоні  
 встановлюють за співвідношенням

$$E_{\text{ш}} = \Delta E \cdot k \cdot d^2 / 16 L^2,$$

де  $\Delta E$  – значення енергії сонячного вип-  
 ромінювання в досліджуваній ділянці спек-  
 тра,  $d$  – діаметр сфери,  $k$  – коефіцієнт відбиття  
 її поверхні,  $L$  – відстань "пункт спостере-  
 жень – сфера", при цьому для конкретної  
 відстані  $L$  необхідне значення  $E_{\text{ш}}$  забезпечу-  
 ють вибором діаметра сфери  $d$ .

Винахід відноситься до спектрофото-  
 метрії в астрофізиці і космічній геофізиці і  
 може бути використаний для вимірювань яс-  
 кравості протяжних заатмосферних об'єктів  
 в окремих ділянках спектра.

Відомий спосіб вимірювання яскравості  
 зареєстрованих зображень заатмосферних  
 протяжних об'єктів, що включає прив'язку до  
 поверхневої яскравості позафокальних зоб-  
 ражень зірок ([1], с. 312, 320, 331), які слугують  
 стандартами яскравості. Недоліком способу є  
 обмеження діапазону яскравості, яка може  
 бути прокалібрована, значеннями, характер-  
 ними для найбільш яскравих зірок.

Відомий спосіб, що включає порівняння  
 з яскравістю лабораторних еталонних дже-  
 рел світла ([2], с. 54).

Недоліком способу є недостовірність  
 калібрування, оскільки відсутні параметри,  
 що характеризують стан атмосфери в кон-  
 ретний момент реєстрації об'єкта. Яск-  
 равість об'єкта визначають з урахуванням  
 деяких імовірних значень цих параметрів  
 ([2], с. 56, коефіцієнт  $\sigma(\lambda_0)$  у формулі (10)).

Відомий спосіб-прототип [3], що вклю-  
 чає прив'язку яскравості об'єкта до яскра-  
 вості позафокальних зображень однієї  
 зірки. Він значно точніший порівняно з пер-

(19) UA (11) 17856 (13) A

шим аналогом, проте недоліком залишається обмеженість діапазону яскравості, який забезпечується відомими зірками-стандартами.

Так, зірка Вега – основний спектрофотометричний стандарт (ї одна з найбільш яскравих зірок), створює у видимій ділянці спектра 400–800 нм заатмосферну освітленість  $1.3 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$  [4]. При калібруванні за допомогою її позафокальних зображень, одержаних з фільтром, їх максимальна поверхнева яскравість знаходиться на рівні  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ср}$  [4], тоді як, наприклад, яскравість штучної іоносферної хмари у лінії випромінювання нейтрального літію може досягати  $10 \cdot 10^{-5} - 10 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ср}$  (див. [2], рисунок на с. 56). Використання зірок-стандартів для достовірного калібрування поверхневої яскравості багатьох інших яскравих об'єктів (полярні сніга, метеори, комети) також виявляється неможливим.

Заатмосферним зоряним стандартом яскравості є також Сонце, проте створювана сонячним випромінюванням освітленість на межі земної атмосфери ( $668,11 \text{ Вт/м}^2$  в інтервалі 400–800 нм, див. [5], с. 367) перевищує вказане значення для Веги на 10 порядків.

Таким чином, на сьогодні існують опорні джерела випромінювання, що забезпечують заатмосферну освітленість на двох рівнях, значно віддалених один від одного. Досить коректне калібрування можливо здійснити поблизу цих значень та на 2–3 порядки нижче кожного з них. Отже, діапазон приблизно від  $2 \cdot 10^{-8}$  до  $7 \cdot 10^{-1} \text{ Вт/м}^2$  не заповнений природними джерелами випромінювання, які могли б слугувати надійними стандартами яскравості.

Задача, на вирішення якої спрямовано спосіб, що заявляється як винахід, полягає в забезпеченні можливості калібрування енергії оптичного випромінювання протяжних заатмосферних об'єктів (штучні утворення, полярні сніга, метеори, комети) в окремих ділянках спектра видимого випромінювання за межами діапазону яскравості, властивого зоряним стандартам.

Це досягається тим, що у відомому способі калібрування яскравості протяжних заатмосферних джерел оптичного випромінювання, який включає реєстрацію послідовності позафокальних зображень точкового заатмосферного стандарту яскравості в досліджуваній ділянці спектра і визначення енергетичної яскравості, що відповідає кожному позафокальному зображенню, згідно з винаходом, діапазон яскравості стандарту розширюють за межі, властиві зоряним стандартам, шляхом створення штучного заатмос-

ферного стандарту яскравості – дзеркально відбиваючої сонячне випромінювання сфери, а значення максимальної енергії в розширеному діапазоні встановлюють за співвідношенням  $E_{\text{ш}} = \Delta E \cdot k \cdot d^2 / 16 L^2$ , де  $E$  – значення енергії сонячного випромінювання в досліджуваній ділянці спектра,  $d$  – діаметр сфери,  $k$  – коефіцієнт відбиття її поверхні,  $L$  – відстань "пункт спостережень – сфера", при цьому для конкретної відстані  $L$  необхідне значення  $E_{\text{ш}}$  забезпечують вибором діаметра сфери  $d$ .

Технічний результат, що досягається завдяки вирішенню цієї задачі, полягає в забезпеченні достовірних вимірювань яскравості в новому діапазоні її значень, не досяжному для прототипа.

Крім розширення діапазону яскравості, що калібрується, новою ознакою запропонованого способу є стійка відтворюваність спектральних характеристик випромінювання при розмноженні чи відновленні штучного стандарту яскравості, оскільки ці характеристики тотожні спектральним характеристикам сонячного випромінювання. Застосування ж прототипа пов'язане з використанням зірок різних спектральних класів і з існуванням пов'язаних з цим похибок калібрування.

Нові ознаки способу обумовлюють нові властивості, відсутні у прототипі:

- стандарти яскравості, створені запропонованим способом, завжди мають єдиний розподіл енергії в спектрі, що сприяє однорідності вимірювань;

- керованість діапазону яскравості, що калібрується, з боку максимальних її значень, оскільки ці значення задають шляхом вибору діаметра сфери;

- можливість калібрування штучних і природних точкових об'єктів в межах розширеного діапазону яскравості.

Приклади реалізації.

В декількох ракетних експериментах, які проводилися на полігоні Капустин Яр в умовах сутінок, для досліджень іоносфери застосовувались сферичні оболонки. За 1–2 хвилини до інжекції плазмоутворюючої суміші від контейнера з апаратурою відокремлювалася оболонка з тонкої плівки, що мала дзеркально відбиваюче покриття. Вона розправлялась і набирала форму кулі за рахунок тиску залишкового повітря, що знаходилося в об'ємі оболонки, складеної в наземних умовах і герметизованої. Яскравість освітленого Сонцем сферичного відбивача, в залежності від його діаметра (3 та 10 метрів в експериментах 4 та 5 квітня 1990 р. відповідно) та від відстані до пункту спостережень, згідно з попередніми розрахунками мала бути близько 0-ї та 2-ї зоряної величини.

Одержані нами з оптичних спостережень дані показали стійкість яркісних і спектральних характеристик випромінювання, що відбивалося сферою, і лягли в основу запропонованого способу. На рисунку показано телевізійне зображення 3-метрової сфери в експерименті 04.04.90 р. Трек одержано завдяки тривалій (1 хвилина) експозиції при фотографуванні відеозапису з екрана монітора. Знімок демонструє стабільність яскравості сфери після початкового періоду її наповнення. В полі зору телевізійної камери сфера є найяскравішим об'єктом. Треки зірок, які видно на знімку, відображують кутове зміщення зоряного неба за вказаний час експозиції, найяскравіші з них +3-ї – +5-ї зоряної величини.

Наводимо методику і результати розрахунків яскравості дзеркально відбиваючої сфери для двох згаданих експериментів, а також яскравості тридцятиметрової сфери для оцінки можливостей калібрування більш високих рівнів інтенсивності випромінювання іоносферних об'єктів у майбутніх експериментах.

Частка спектрофотометричної сонячної сталої  $\Delta E$  в інтервалі 400–800 нм, згідно з [5], дорівнює 48,793 % або  $\Delta E = 668,11 \text{ Вт/м}^2$ .

Площа поперечного перерізу потоку сонячного випромінювання, яке падає на сферу діаметром  $d$ ,

$$s = \pi d^2/4.$$

Енергія сонячного випромінювання, що перетинає таку площу,

$$E_s = \Delta E \cdot s.$$

Враховуючи коефіцієнт відбиття щойно нанесеної відбиваючої плівки алюмінію  $k = 0,9$  (для інтервалу довжин хвиль 400–800 нм, див. [6], с. 88), відбита сферою енергія  $E_s' = E_s \cdot k$ . Відбита енергія розподіляється в тілесному куті  $4\pi$ . Для наземного спостерігача, що знаходиться на відстані  $L$  від відбиваючої сфери, площа поверхні, на яку падає відбита енергія,  $S = \pi(2L)^2$ .

Тоді освітленість, створювана в точці спостережень відбитим випромінюванням,

$$E_w = E_s'/S$$

або, враховуючи попередні співвідношення,

$$E_w = \Delta E \cdot k \cdot d^2/16 L^2.$$

Зауважимо, що коефіцієнт відбиття при кутах падіння променів близько  $80^\circ$  знижується для алюмінію приблизно на 10%. У

названих експериментах кут падіння сонячних променів ( $< 60^\circ$ ) знаходився в межах, де коефіцієнт відбиття не зазнає істотних змін, тому у виразі для  $E_w$  цей ефект не враховуємо.

Співставивши значення частки сонячної сталої для видимого діапазону довжин хвиль ( $\Delta E = 668,11 \text{ Вт/м}^2$ ) з зоряною величиною Сонця  $m_o = -26,75$  [5], знайдемо зоряну величину сфери  $m_{cf}$  із співвідношення

$$\lg(E_w/\Delta E) = \lg(K \cdot d/16 L) = -0,4 \Delta m,$$

де  $\Delta m = m_{cf} - m_o$ . Різниця зоряних величин Сонця і штучного стандарту яскравості  $\Delta m$ , як бачимо, визначається діаметром сфери та відстанню до неї.

Результати розрахунків наведені в таблиці.

З таблиці видно, що триметрова сфера за яскравістю наближається до Веги, десятиметрова створює освітленість на порядок вищу, ніж Вега (для потреб оптичних спостережень в активних експериментах поглинання атмосфери не враховуємо як у випадку зоряних стандартів яскравості, так і у випадку сфери, вважаючи її заатмосферним джерелом випромінювання), а тридцятиметрова – на два порядки. Таким чином, дзеркальні сферичні відбивачі в ракетних експериментах забезпечують значне розширення діапазону калібрувань яскравості штучних іоносферних утворень по відношенню до випадку використання однієї з найяскравіших зірок – Веги.

Похибка вимірювань абсолютних значень потоку сонячного випромінювання у видимому діапазоні довжин хвиль близька до 2% [5]. Значення  $d$ ,  $k$  і  $L$  відомі з точністю 0,5–1%. Отже, можлива сумарна похибка наведених у таблиці значень  $E_w$  складає щонайбільше 5%. Враховуючи, що для яскравих зірок розподіл енергії в спектрі відомий із середньою квадратичною похибкою близько 3% (граничні значення похибки 1,8–4,5%) [4], побудована за ними калібрувальна крива може бути доповнена даними вимірювань штучного стандарту яскравості практично без порушень однорідності вимірів. Використання методики [3] дозволяє розширити діапазон калібрувань яскравості протяжних об'єктів за рахунок реєстрації серії позафокальних зображень одного штучного стандарту яскравості.

Підкреслимо ще раз, що запропонованому способу калібрувань властива стабільність спектральних характеристик еталонного випромінювання, оскільки останнє – це дзеркально відбите сонячне вип-

роміювання з надійно вимірним і постійно контрольованим розподілом енергії в спектрі. В розглянутих вище реалізаціях перевагою є близьке взаємне розташування на небесній сфері штучного стандарту і досліджуваного об'єкта, оскільки для наземного спостерігача цим забезпечується відповідність умов проходження випромінювання від об'єкта і від стандарту через товщу атмосфери до засобів реєстрації. Це особливо важливо при спостереженнях в умовах сутінок, коли значно складніше підібрати зоряні стандарти яскравості, оскільки фон сутінкового неба досить яскравий. Максимальна енергія, яку можна досягти під час калібрування при застосуванні даного методу, задається для конкретної відстані "сфера – пункт реєстрації" діаметром сфери. Він може бути вибраним з урахуванням перекриття очікуваної яскравості штучного утворення.

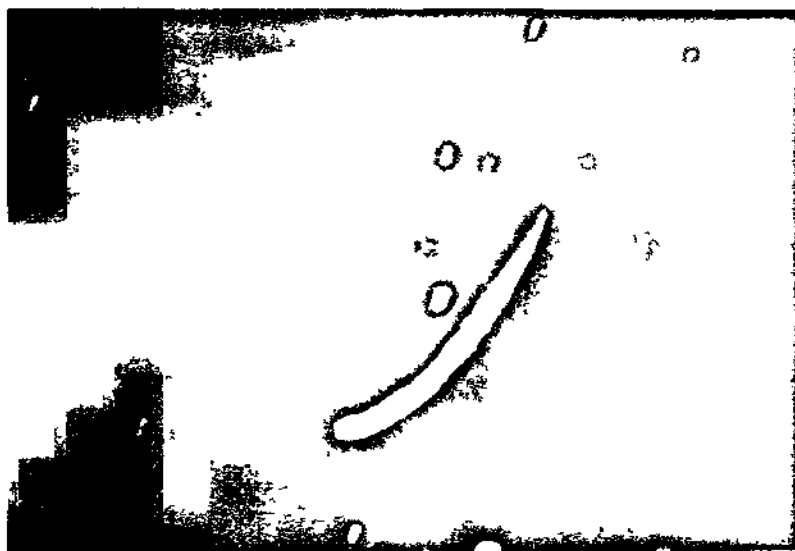
В супутникових експериментах використання дзеркально відбиваючої сфери створює додаткову можливість оперативного визначення профілю прозорості земної ат-

мосфери за вимірюванням профілю яскравості сфери під час її проходження від горизонту до горизонту.

Супутниковий геостаціонарний варіант застосування сферичних відбивачів має переваги в розширенні меж регіону, де може реєструватись один і той же стандарт яскравості, а також у незмінності його положення на небесній сфері по відношенню до спостерігача. Це сприятиме однорідності і співставляюваності результатів вимірювань, виконаних за допомогою реєструючої апаратури різних типів на протязі тривалого часу.

У всіх перерахованих варіантах реалізації розглянутого способу калібрувань кутові розміри сфери (0,2 кутової секунди для десятиметрової сфери, що знаходиться на відстані 175 км) значно менші кутової роздільної здатності використовуваних приймачів зображень, тобто сфера є точковим заатмосферним джерелом випромінювання і згідно з цією ознакою, до нього може бути застосованим термін "штучна зірка – стандарт яскравості".

| d, м | s, м <sup>2</sup> | E's, Вт  | L, м    | S, м <sup>2</sup> | Eш, Вт/м <sup>2</sup> | mсф   |
|------|-------------------|----------|---------|-------------------|-----------------------|-------|
| 3    | 7,07              | 4,25 E+3 | 175 E+3 | 3,85 E+11         | 1,11 E-8              | +0,20 |
| 10   | 78,54             | 4,72 E+4 | 170 E+3 | 3,63 E+11         | 1,30 E-7              | -2,48 |
| 30   | 706,86            | 4,25 E+5 | 170 E+3 | 3,63 E+11         | 1,17 E-6              | -4,86 |



Упорядник

Техред Н.Румянцева

Коректор Л. Лукач

Замовлення 4254

Тираж

Підписне

Державне патентне відомство України,  
254655, ГСП, Київ-53, Львівська пл., 8