

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra29.03.206>  
УДК 537.86+621.37

**О.М. Корольов, В.В. Мищенко,  
В.В. Захаренко, Д.Л. Чечоткін, Д.В. Шульга**

Радіоастрономічний інститут НАН України  
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна  
E-mail: vmyshen@gmail.com

## МЕТОДИКА ВИМІРЮВАНЬ ЯСКРАВІСНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ АТМОСФЕРИ НА ЧАСТОТАХ БЛИЗЬКО 100 ГГц

**Предмет і мета роботи.** Розглянуто вдосконалення методики вимірювань яскравісної температури атмосфери на частотах близько 100 ГГц. Проаналізовано можливості установки дистанційного зондування атмосферного монооксиду вуглецю (CO), розробленої в Радіоастрономічному інституті НАН України (РІ НАНУ). Показано, що функціональні можливості цього інструменту можуть бути суттєво розширені. Він може надавати більше оперативної інформації про тропосферу, корисної для аеронмії та радіоастрономії. Метою роботи є вдосконалення методики вимірювання яскравісної температури атмосфери стосовно існуючої установки та визначення можливості використання широкосмугового каналу спектро-радіометра для вимірювання яскравісної температури неба.

**Методи та методологія.** Проведено детальний аналіз існуючої установки для моніторингу атмосферного CO та вдосконалено методику вимірювання. Показано, що широкосмуговий канал цього приладу, створеного як сервісний, можна використовувати для вимірювання яскравісної температури тропосфери. Таке вимірювання дозволить створити базу даних зенітної яскравісної температури неба на частотах близько 100 ГГц.

**Результати.** Показано можливість створення бази даних яскравісної температури неба на частотах близько 100 ГГц. Для цього необхідно провести незначні модифікації приладу. Головне — внести зміни у файл даних широкосмугового каналу та створити програму для перетворення отриманих даних з установки в значення яскравісної температури за вказаними формулами. Представлено всі необхідні формули для наведення результатів спостережень у вигляді яскравісних температур.

**Висновки.** Розрахунками та в експерименті було доведено, що на базі існуючої установки для моніторингу атмосферного CO можливо створити базу даних зенітної яскравісної температури тропосфери над Харковом (Україна) на частотах близько 100 ГГц. Висока стабільність радіометричної частини установки дозволяє визначати яскравісну температуру неба з точністю, яка є достатньою для аеронмічних, радіоастрономічних і радіофізичних досліджень. На підставі аналітичних розрахунків і експериментальних даних визначено необхідні доробки для створення такої бази даних.

**Ключові слова:** міліметрові хвилі, яскравісна температура тропосфери, аеронмія, атмосферні розрізи.

### Вступ

Інформація про стан земної атмосфери, що отримується під час проведення дистанційного моніторингу радіометричними методами в міліметро-

вому діапазоні довжин хвиль, має як наукове, так і практичне значення для метеорології, кліматології, досліджень фізичних явищ у хмарах, а також проведення кількісної оцінки астроклімату

Ц и т у в а н н я: Корольов О.М., Мищенко В.В., Захаренко В.В., Чечоткін Д.Л., Шульга Д.В. Методика вимірювань яскравісної температури атмосфери на частотах близько 100 ГГц. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2024. Т. 29. № 3. С. 206—213. <https://doi.org/10.15407/rpra29.03.206>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

в конкретній локації [1]. Останнім часом спостерігається інтенсивний розвиток методів контролю атмосфери Землі як за допомогою супутників, так і установок наземного базування, а дослідження з використанням метеозондів і геодезичних ракет згортаються через їхню низьку ефективність і велику вартість. Методи дистанційного моніторингу з поверхні Землі добре розвинені, вони постійно вдосконалюються та широко використовуються через можливість проводити безперервні вимірювання [2–4]. З економічного погляду для створення наземних комплексів моніторингу атмосфери не потрібні дуже великі кошти. Для роботи такі комплекси потребують відносно невеликих потужностей живлення. Тому зрозуміло, що наземні методи відрізняються високою ефективністю та можливостями високої мобільності.

На цей час інтенсивно розвиваються надшвидкісні інформаційні мережі наземно-космічного базування п'ятого покоління 5G, що використовують нові частотні діапазони, вищі за 20 ГГц [5]. При їхньому створенні та експлуатації особливу цінність становить інформація про поглинання електромагнітних хвиль у тропосфері, яку отримано на частотах короткохвильової частини мм діапазону. Крім того, ці частоти є перспективними для створення компактних радіолокаторів невеликої дальності. Особливу важливість такі дані мають також для дослідження водної потужності хмар і дощів. Тому результати моніторингу яскравості атмосфери на частотах близько 100 ГГц вважаються важливими й такими, які можуть бути корисними та затребуваними при розвитку різних галузей сучасної науки і техніки.

Робота спрямована на вдосконалення методик вимірювань яскравісної температури неба за допомогою створеної у Радіоастрономічному інституті НАН України (РІ НАНУ) установки для моніторингу стратосферного монооксиду вуглецю (CO) на частотах близько 100 ГГц через розширення її функціональних можливостей шляхом використання широкосмугового каналу спектро-радіометра.

## 1. Апаратна частина

Нещодавно в РІ НАНУ було розроблено приймальну систему, призначену для моніторингу

земної атмосфери шляхом спостереження за траєкторними газами (CO та O<sub>3</sub>) [5], які є малими домішками у складі атмосфери. Розроблена установка являє собою високочутливий пасивний спектро-радіометр, який працює на частотах поблизу 110.7 ГГц (лінія випромінювання озону) або 115.3 ГГц (лінія випромінювання монооксиду вуглецю). Починаючи з 2015 року, розроблена приймальна система працює практично цілодобово в режимі моніторингу земної атмосфери на частоті 115.3 ГГц (спостереження за випромінюванням CO) [6–8].

Практично всю апаратуру моніторингу розташовано в приміщенні, яке опалюється взимку, спостереження проводяться через радіопрозоре вікно. Поза вікном розташовано лише пласке дзеркало, яке може підігріватися. Така конструкція дозволяє швидко відновлювати працездатність апаратури після дощу та запобігає покриттю дзеркала снігом і льодом узимку.

Детальний опис приймальної системи наведено в [6], а тут ми лише зазначимо деякі її особливості, які є суттєвими для даної роботи. Зовнішній вигляд установки для моніторингу земної атмосфери наведено на рис. 1.

Установку створено на базі малошумливого приймача супергетеродинного типу, який працює у двосмуговому режимі. В англійській літературі стала назва для приймачів такого типу — *double-side band (DSB)* [6]. Конструктивно високочастотна частина приймача складається з двох блоків. Один з них — термостатований. У ньому розташовано всі елементи, чутливі до температурного режиму, як-то диплексер, змішувач, підсилювач проміжної частоти (ППЧ) і квадратичний детектор широкосмугового каналу. У другому блоці розташовано всі елементи гетеродина. Температура всередині термостатованого блока підтримується на рівні 19 °C (+/- 0,3 °C), тобто така, щоб бути вищою за температуру точки роси навіть у найспекотніші літні дні. Це дозволяє знизити вимоги до якості герметизації корпусу блока. Шумова температура приймача ( $T_{DSB} = 300$  K) вимірювалась Y-методом із двома узгодженими навантаженнями, які мали кімнатну й азотну температури.

Зовнішній вигляд безпосередньо приймальної системи показано на рис. 2.



Рис. 1. Зовнішній вигляд спектродіаметричного комплексу РІ НАНУ для моніторингу малих атмосферних домішок (СО та O<sub>3</sub>)

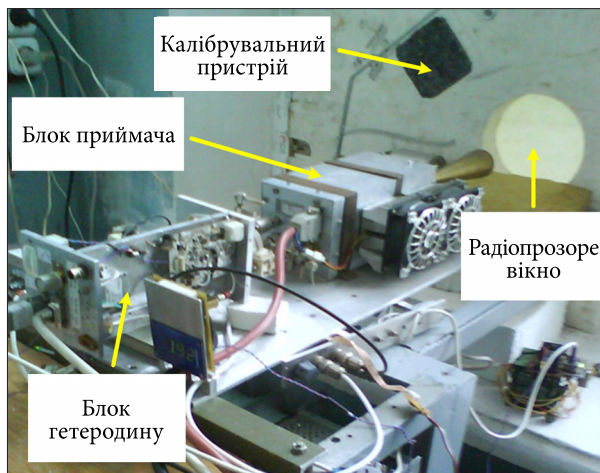


Рис. 2. Зовнішній вигляд приймальної системи спектродіаметричного комплексу

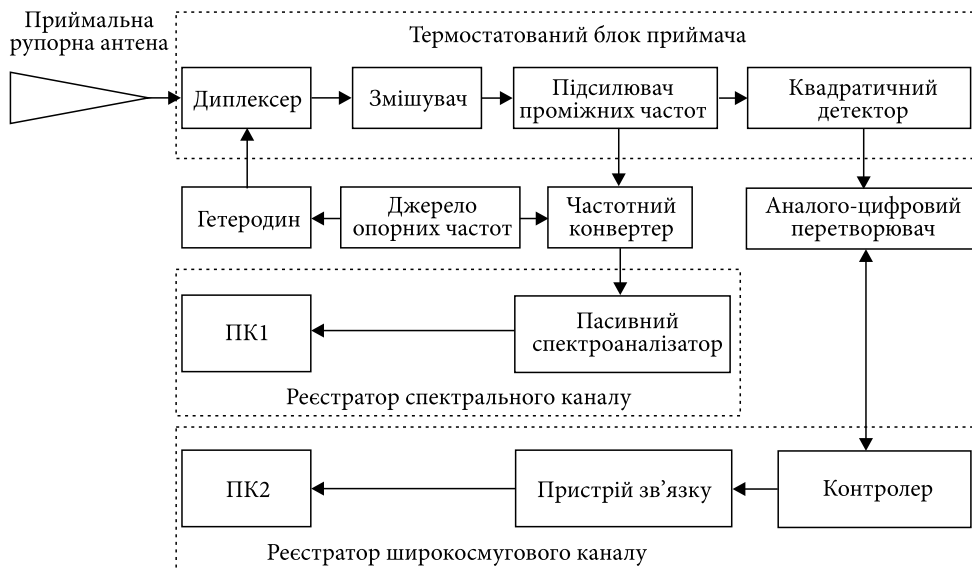


Рис. 3. Блок-схема приймальної системи з реєстратором сигналу широкосмугового каналу

Гетеродин приймача розташовується в окремому корпусі. На рис. 2 його видно як блок зі знятим кожухом. Його створено за принципом синтезатора частоти. Відносна нестабільність частоти визначалась джерелом опорної частоти й була не гірше ніж  $10^{-8}$  [9]. Висока стабільність частоти гетеродина необхідна для спостереження спектрів випромінювання атмосферного СО з роздільною здатністю за частотою в одиниці кілогерц.

На рис. 3 зображено блок-схему приймальної системи разом з реєстратором сигналу широкосмугового каналу. Із блок-схеми видно, що ви-

хідний сигнал з підсилювача проміжних частот (робоча смуга частот понад 150 МГц з центром у 1500 МГц) поділяється на два канали.

Перший канал — спектральний — складається з частотного конвертера, пасивного спектроаналізатора та комп'ютерного реєстратора (ПК1). Другий — широкосмуговий канал — складається з квадратичного детектора, який здійснює амплітудне детектування прийнятого сигналу, аналого-цифрового перетворювача та пристроїв, які опрацьовують цей сигнал і доводять його до окремого комп'ютерного реєстратора (ПК2).

## 2. Спектральний канал

Ширина спектральної лінії стратосферного СО зазвичай менша за 1 МГц. Тому апаратура спектрального каналу виділяє зі смуги проміжних частот ділянку близько 8 МГц, яка за допомогою частотного конвертера переноситься в діапазон 0...8 МГц і подається на пасивний Фур'є-спектроаналізатор [10], вбудований у комп'ютер. Цей комп'ютер одночасно керує всім процесом моніторингу. Розроблене програмне забезпечення здійснює спектральну обробку сигналу, а також реєстрацію результатів та їхнє збереження.

Спектрорадіометр працює в режимі частотної модуляції, при якому частота гетеродина змінюється на 4 МГц при різних напівперіодах модуляції, так що зображення спектральної лінії СО спостерігається на відстані  $\pm 2$  МГц по обидва боки від центру смуги огляду спектроаналізатора. Період модуляції так само задається програмним забезпеченням керуючого комп'ютера.

Моніторинг стратосферного СО здійснюється циклами тривалістю 32 хв. На початку кожного циклу протягом однієї хвилини виконується калібрування приймальної системи шляхом розміщення перед рупором узгодженого навантаження, що має кімнатну температуру, яка вимірюється окремим датчиком і зберігається у файлі вимірювань. Після калібрування проводиться спостереження атмосфери протягом 30 хв. Кожен цикл спостереження складається з 10 інтервалів по 3 хв, причому дані, накопичені за кожні 3 хв, обробляються програмним забезпеченням і записуються в окремий файл. Крім того, проводиться накопичення за 10 інтервалів по 3 хв, результат якого теж записується в півгодинний файл. Отже, у кожному півгодинному файлі є інформація про температуру в кімнаті (температура калібрувального навантаження — в приміщенні) та на вулиці (температура приземного шару) і результати 10 вимірювань спектра випромінювання СО в режимі частотної модуляції по 3 хв кожен, а також накопичений та усереднений спектр за 30 хв.

При такій методиці вимірювання спектрів випромінювання калібрування приймача здійснюється за узгодженим навантаженням і власним шумом приймальної системи. Методику такого калібрування та вимірювань спектра докладно описано в [11].

## 3. Широкосмуговий канал

Під час проектування приймальної системи широкосмуговий канал приймання передбачався як допоміжний, що полегшує запуск процесу моніторингу та дозволяє контролювати роботу приймальної системи в автоматичному режимі. Слід зазначити, що при смузі проміжних частот більше за 150 МГц зміна частоти гетеродина на 4 МГц практично не впливає на рівень вихідного сигналу в широкосмуговому каналі. Таким чином за використання широкосмугового каналу у створеній установці реалізується радіометр загальної потужності з флюктуаційною чутливістю не гірше 0.1 К, що дозволяє вимірювати яскравісну температуру неба з точністю 1 К за одиниці секунд.

Сигнал з усієї смуги проміжних частот подається на квадратичний детектор. Продетектований сигнал надходить на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який керується окремим контролером. Цей контролер приймає цифровий код від перетворювача та передає його за допомогою пристрою зв'язку до окремого комп'ютера (ПК2), в якому встановлено програмне забезпечення реєстратора сигналу континуального каналу аерономного приймача (ПЗ «Continuum Channel») [12], яке дозволяє здійснювати графічну візуалізацію сигналу, накопичення та збереження отриманих даних, а також перегляд збережених даних.

Програмне забезпечення реєстратора сигналу континуального каналу створює візуальне часове вікно на 20 000 відліків, які можуть проводитися через 1, 2 або 3 с. Найбільш зручним для практичного використання виявилось вікно у 20 год ( $20\,000 * 3\text{ с}$ ), але при необхідності це вікно може бути змінено в часі та переміщено в попередні періоди. Наявність такого реєстратора виявилася дуже корисною при організації та запуску процесу моніторингу, оскільки видно, як установка працювала протягом минулих 20 год.

На рис. 4 наведено приклад фрагменту запису реєстратора широкосмугового каналу за умов відносно гарної погоди. По горизонтальній осі відкладено поточний час, а по вертикальній — вихідний сигнал із квадратичного детектора приймальної системи у відліках АЦП. Порівняно короткі позитивні імпульси — це спостереження калібрувального узгодженого навантаження.

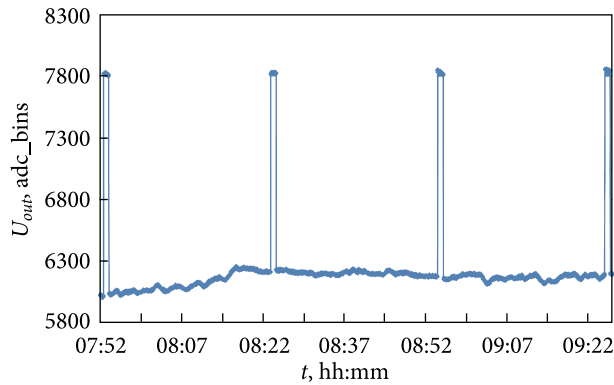


Рис. 4. Приклад відображення запису реєстратора широко-  
смугового каналу на екрані монітора у відділках АЦП

Підсилення системи обрано таким, щоб відгук на калібрувальний сигнал від нетермостатованого узгодженого навантаження був наближений до максимуму динамічного діапазону 12-бітного АЦП (0...8191) — у межах 7800...8100 відліків АЦП у будь-яку пору року. Це дозволяє реалізувати найкращий динамічний діапазон реєстратора без зміни наскрізного підсилення системи упродовж років.

#### 4. Визначення яскравісної температури неба в зеніті

Як зазначалось вище, при калібруванні перед рупором приймальної системи розташовується узгоджене навантаження з відомою температурою. У цьому разі сигнал на реєстраторі широко-смугового сигналу може бути записаний у вигляді

$$U_{cal} = qk\Delta f [T_{rec} + T_l], \quad (1)$$

де  $q$  — коефіцієнт пропорційності, що характеризує загальне підсилення, включно з квадратичним детектором;  $k$  — стала Больцмана;  $\Delta f$  — смуга пропускання ППЧ;  $T_{rec}$  — шумова температура приймача (у нашому випадку  $T_{rec} = T_{DSB} = 300$  K), відома й дуже стабільна величина;  $T_l$  — фізична температура узгодженого навантаження, що дорівнює температурі в приміщенні, де розташовано апаратуру, яка вимірюється окремим термометром під час калібрування та фіксується у файлі даних.

Після калібрування через плоске дзеркало проводиться спостереження атмосфери. Дзеркало розташовано за вікном, причому його кут на-

хилу обрано таким, щоб промінь спостереження був спрямований під кутом місця  $45^\circ$ . Такий кут місця вважається близьким до оптимального для вивчення горизонтальних стратосферних вітрів, спостереження яких є однією з головних цілей установки, яку створено. За азимутом приймальної систему зорієнтовано на схід. При спостереженнях атмосфери сигнал на виході приймача може бути записаний у вигляді

$$U_{sky} = qk\Delta f [T_{rec} + \beta T_l + (1 - \beta) T_{ant}(\Theta)], \quad (2)$$

де  $\beta$  — коефіцієнт розсіювання антенної системи, який може бути визначений і зберігається незмінним у процесі моніторингу;  $T_{ant}(\Theta)$  — антенна або яскравісна температура на вході приймача під час спостереження атмосфери під кутом місця  $\Theta$ .

У виразах (1), (2) величини  $U_{cal}$  та  $U_{sky}$  — це показання АЦП, які фіксуються реєстратором широкого каналу;  $T_{rec}$  вимірюється звичайним Y-методом із застосуванням узгодженого навантаження, що має температуру рідкого азоту (77 K). Як показав наш трирічний досвід моніторингу, ця характеристика приймальної системи має відмінну стабільність, що підтверджується періодичними вимірюваннями.

Коефіцієнт розсіювання антени  $\beta$  можна визначити при проведенні атмосферних розрізів, тобто вимірюваннями яскравості температури атмосфери під різними кутами місця. Таким чином, за вимірюваними величинами  $U_{cal}$  і  $U_{sky}$  та виразами (1) і (2) можна визначити величину  $T_{ant}(\Theta)$ .

Але при розрахунках поглинання електромагнітних хвиль у тропосфері або для вирішення метеорологічних задач частіше використовують такий параметр, як яскравісна температура тропосфери при спостереженні у зеніт, або  $T_{ant}(90^\circ)$ .

Знаючи величину  $T_{ant}(\Theta)$ , відповідно до [13] можна розрахувати яскравісну температуру атмосфери при спостереженні в зеніт, оскільки

$$T_{ant}(\Theta) = T_{eff} \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{\sin \Theta}} \right) + T_{bg} e^{-\frac{\tau}{\sin \Theta}}, \quad (3)$$

де  $T_{bg}$  — реліктове фонове радіовипромінювання  $T_{ant} = 2.7$  K;  $\tau$  — стала поглинання електромагнітної хвилі в тропосфері при спостереженні в зеніт;  $\Theta$  — кут місця спостережень.

Таким чином, яскравісна температура атмосфери при спостереженні в зеніт може вважатися параметром, що описує стан атмосфери на тих частотах, де вона вимірюється, а база даних саме цього параметра є затребуваною для практичного застосування.

## 5. Особливості застосування двосмугового приймача

Яскравісна температура, яка визначається за допомогою приймача, що працює в двосмуговому режимі, повинна бути записана у вигляді

$$T_{ant} = \frac{T_L + T_H}{2}, \quad (4)$$

де  $T_L$  — яскравісна температура на частотах нижньої бічної смуги;  $T_H$  — яскравісна температура на частотах верхньої бічної смуги.

Співвідношення  $T_L$  і  $T_H$  визначається як частотною залежністю яскравісної температури атмосфери, так і величиною рознесення нижньої та верхньої смуг приймання по частоті. У нашому випадку частота гетеродина дорівнює 113.8 ГГц, а центри смуг приймання 112.3 і 115.3 ГГц. У цьому діапазоні частот є досить сильна залежність яскравісної температури атмосфери від частоти через близькість аналізованих частот до спектральної лінії випромінювання кисню (118.7 ГГц). Однак останній факт дозволяє стверджувати, що відношення яскравісних температур на серединах смуг приймання зберігається за будь-яких погодних умов. У [13] наведено експериментальні значення яскравісної температури атмосфери в діапазоні частот 110...120 ГГц. За цими даними ясно видно лінію кисню на частоті 118.7 ГГц, а в діапазоні частот 110...116 ГГц показано значення температури неба від 30 до 150 К, що відповідає кліматичним умовам від морозної зими до спекотного літа. Проведений нами аналіз даних показав, що зв'язок температур  $T_L$  і  $T_H$  можна описати простим емпіричним виразом:

$$T_H = 0.804T_L + 61. \quad (5)$$

Цей вираз забезпечує точність не гірше 2% для співвідношення температур неба при напрямку спостережень у зеніт на частотах 112.3 та 115.3 ГГц. Водночас він дає змогу розрахувати зенітну яскравісну температуру неба на двох час-

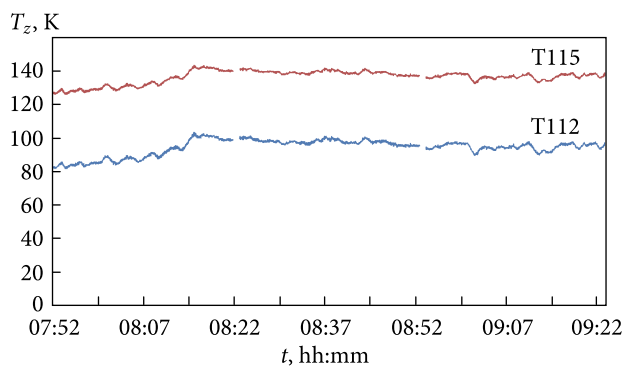


Рис. 5. Яскравісна температура неба при спостереженні у зеніт на частотах 112.3 та 115.3 ГГц. Розраховано на підставі даних, зображених на рис. 4

татах при використанні приймача, який працює у двосмуговому режимі.

Таким чином, виявляється, що інформація, яка накопичується в реєстраторі ширококутового каналу установки для моніторингу стратосферного СО, дає можливість оперативно визначити яскравісну температуру зеніту на частотах близько 110 ГГц. Приклад перерахунку даних з рис. 4 згідно з виразами (1)–(5) і за допомогою програмного забезпечення Sci DAVis наведено на рис. 5.

Дійсно, формула (1) дає можливість виразити величину вихідного сигналу радіометра в кельвінах, і корекція відбувається кожні півгодини. З виразу (2) можливо визначити температуру неба при спостереженні під кутом місця  $45^\circ$ . А вираз (3) показує, як перерахувати цю температуру в яскравісну температуру зеніту. Нарешті, з (4) і (5) можливо визначити температуру зеніту на двох різних частотах, які відповідають центрам смуг приймання двосмугового приймача, що використовується для моніторингу. Саме це і було реалізовано в наведеному прикладі (рис. 5).

## Висновки

Проведено вдосконалення методики вимірювань яскравісної температури атмосфери. Аналіз можливостей створеної в РІ НАНУ установки для моніторингу стратосферного СО показав, що завдяки високій стабільності приймальної системи на основі її ширококутового каналу та запропонованої методики обчислень можливо виконувати вимірювання яскравісної температури неба в зеніті оперативно і з високою точністю. На підставі цих вимірювань з'являється можливість

створити базу даних яскравісної температури землі на частотах близько 100 ГГц.

Точність вимірювання яскравісної температури за 10 с є достатньою для більшості задач аерономії, радіоастрономії та радіофізичних досліджень і дозволяє вивчати динаміку корот-

кочасних процесів, які трапляються в тропосфері. Апаратно-технічна частина цієї установки не потребує ніяких доопрацювань. Необхідно лише розробити та реалізувати програмне забезпечення для виконання відповідних обчислень і зручного користування створюваною базою даних.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Butler A.H., Sjöberg J.P., Seidel D.J., Rosenlof K.H. A sudden stratospheric warming compendium. *Earth Syst. Sci. Data*. 2017. Vol. 9, Iss. 1. P. 63–76. DOI: 10.5194/essd-9-63-2017
2. Stahli O., Murk A., Kampf N., Matzler C., Friksson P. Microwave radiometer to retrieve temperature profile from surface to the stratopause. *Atmos. Meas. Tech.* 2013. Vol. 6, Iss. 9. P. 2477–2494. DOI: 10.5194/amt-6-2477-2013
3. Ingold T., Peter R., Kampf N. Weighted mean tropospheric temperature and determination at millimeterwave frequencies for ground-based applications. *Radio Sci.* 1998. Vol. 33, Iss. 4. P. 905–918. DOI: 10.1029/98RS01000
4. Han Y., Westwater Ed. Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2000. Vol. 38, Iss. 3. P. 1260–1276. DOI: 10.1109/36.843018
5. Osseiran A., Boccardi F., Braun V., Kusume K., Marsch P., Maternia M., Queseth O., Schellman M., Schotten H. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project. *IEEE Commun. Mag.* 2014. Vol. 52, Iss. 5. P. 26–35. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6815890
6. Piddyachiy V., Shulga V., Myshenko V., Korolev A., Antyufeyev O., Shulga D., Forkman P. Microwave radiometer for spectral observations of mesospheric carbon monoxide at 115 GHz over Kharkiv, Ukraine. *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2017. Vol. 38, Iss. 3. P. 292–302. DOI: 10.1007/s10762-016-0334-1
7. Wang Y., Shulga V., Milinevsky G., Patoka A., Evtushevsky A., Klekociuk A., Han W., Myshenko V., Antyufeyev A. Winter 2018 major sudden stratospheric warming impact on midlatitude mesosphere from microwave radiometer measurements. *Atmos. Chem. Phys.* 2019. Vol. 19, Iss. 15. P. 10303–10317. DOI: 10.5194/acp-19-10303-2019
8. Shi Y., Shulga V., Ivaniha O., Wang Y., Evtushevsky O., Milinevsky G., Klekociuk A., Patoka A., Hanand W., Shulga D. Comparison of Major Sudden Stratospheric Warming Impacts on the Mid-Latitude Mesosphere Based on Local Microwave Radiometer CO Observation in 2018 and 2019. *Remote Sens.* 2020. Vol. 12, Iss. 23, id. 3950. 19 p. DOI: 10.3390/rs12233950
9. Мищенко В.В., Шульга В.М., Королев А.М., Карелін Ю.В., Чечоткін Д.Л., Антюфеев А.В., Патока А.Н. Гетеродіни аерономічних приймачів міліметрового діапазона. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2019. Т. 24, № 2. С. 144–153. DOI: 10.15407/rpra24.02.144
10. Antyufeyev A., Shulga V. FFT – based digital spectrum analyzer on single PC. *Radiotekhnika*. 2005. No. 10. P. 145–148.
11. Корольов О.М., Карелін Ю.В., Антюфеев О.В., Шульга В.М., Мищенко В.В., Чечоткін Д.Л., Шульга Д.В., Патока О.М., Маринко К.В. Аерономічна радіоспектрометрія з калібруванням за віртуальними джерелами. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2022. Т. 27, № 3. С. 219–228. DOI: 10.15407/rpra27.03.219
12. Шульга В.М., Чечоткін Д.Л., Мищенко В.В., Антюфеев О.В., Маринко К.В. Програмне забезпечення реєстратора сигналу континуального каналу аерономного приймача (ПЗ «Continuum Channel»). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №104191 (21 квітня 2021 р.).
13. Forkman P., Christensen O.M., Erikson P., Billade B., Vassilev V., Shulga V.M. A compact receiver system for simultaneous measurements of mesospheric CO and O<sub>3</sub>. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 2016. Vol. 5, Iss. 1. P. 27–44. DOI: 10.5194/gi-5-27-2016

Стаття надійшла 19.03.2024

#### REFERENCES

1. Butler, A.H., Sjöberg, J.P., Seidel, D.J., Rosenlof, K.H., 2017. A sudden stratospheric warming compendium. *Earth Syst. Sci. Data*, **9**(1), pp. 63–76. DOI: 10.5194/essd-9-63-2017
2. Stahli, O., Murk, A., Kampf, N., Matzler, C., Friksson, P., 2013. Microwave radiometer to retrieve temperature profile from surface to the stratopause. *Atmos. Meas. Tech.*, **6**(9), pp. 2477–2494. DOI: 10.5194/amt-6-2477-2013
3. Ingold, T., Peter, R., Kampf, N., 1998. Weighted mean tropospheric temperature and determination at millimeterwave frequencies for ground-based applications. *Radio Sci.*, **33**(4), pp. 905–918. DOI: 10.1029/98RS01000
4. Han, Y., Westwater, Ed., 2000. Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **38**(3), pp. 1260–1276. DOI: 10.1109/36.843018
5. Osseiran, A., Boccardi, F., Braun, V., Kusume, K., Marsch, P., Maternia, M., Queseth, O., Schellmann, M., Schotten, H., 2014. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project. *IEEE Commun. Mag.*, **52**(5), pp. 26–35. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6815890
6. Piddyachiy, V., Shulga, V., Myshenko, V., Korolev, A., Antyufeyev, O., Shulga, D., Forkman, P., 2017. Microwave radiometer for spectral observations of mesospheric carbon monoxide at 115 GHz over Kharkiv, Ukraine. *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*, **38**(3), pp. 292–302. DOI: 10.1007/s10762-016-0334-1

7. Wang, Y., Shulga, V., Milinevsky, G., Patoka, A., Evtushevsky, A., Klekociuk, A., Han, W., Myshenko, V., Antyufeyev, A., 2019. Winter 2018 major sudden stratospheric warming impact on midlatitude mesosphere from microwave radiometer measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**(15), pp. 10303–10317. DOI: 10.5194/acp-19-10303-2019
8. Shi, Y., Shulga, V., Ivaniha, O., Wang, Y., Evtushevsky, O., Milinevsky, G., Klekociuk, A., Patoka, A., Hanand, W., Shulga, D., 2020. Comparison of Major Sudden Stratospheric Warming Impacts on the Mid-Latitude Mesosphere Based on Local Microwave Radiometer CO Observation in 2018 and 2019. *Remote Sens.*, **12**(23), id. 3950, 19 pp. DOI: 10.3390/rs12233950
9. Myshenko, V., Shulga, V., Korolev, A., Karelin, U., Chechotkin, D., Antyufeyev, A., Patoka, A., 2019. Local oscillators for mm wavelength aeronomic receivers. *Radio Phys. Radio Astron.*, **24**(2), pp. 144–153. DOI: 10.15407/rpra24.02.144
10. Antyufeyev, A., Shulga, V., 2005. FFT – based digital spectrum analyzer on single PC. *Radiotekhnika*, 10, pp. 145–148.
11. Korolev, A., Karelin, U., Antyufeyev, A., Shulga, V., Myshenko, V., Chechotkin, D., Shulga, D., Patoka, A., Marynko, K., 2022. Aeronomic radio spectrometry with calibration by signals from virtual sources. *Radio Phys. Radio Astron.*, **27**(3), pp. 219–228. DOI: 10.15407/rpra27.03.219
12. Shulga, V., Chechotkin, D., Myshenko, V., Antyufeyev, A., Marynko, K., 2021. Aeronomic Receiver Continuum Channel Signal Recorder Software («Continuum Channel Software»). Copyright Registration Certificate for Work No104191 (April 21, 2021).
13. Forkman, P., Christensen, O.M., Erikson, P., Billade, B., Vassilev, V., Shulga, V.M., 2016. A compact receiver system for simultaneous measurements of mesospheric CO and O<sub>3</sub>. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, **5**(1), pp. 27–44. DOI: 10.5194/gi-5-27-2016

Received 19.03.2024

A.M. Korolev, V.V. Myshenko,

V.V. Zakharenko, D.L. Chechotkin, D.V. Shulga

Institute of Radio Astronomy of the NAS of Ukraine

4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

#### METHOD OF THE ATMOSPHERE BRIGHTNESS TEMPERATURE MEASURING AT FREQUENCIES AROUND 100 GHZ

**Subject and Purpose.** The improvement of the atmosphere brightness temperature measuring method at frequencies of about 100 GHz is considered. The possibilities of the atmospheric carbon monoxide (CO) remote sensing instrument, developed at Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine were analyzed. They show that the functional of this instrument can be significantly expanded. It can provide more operational information about the troposphere, useful for aeronomy and radio astronomy. The purpose of this work is to improve the atmosphere brightness temperature measuring method in relation to the existing instrument. We determine the possibility of the spectroradiometer broadband channel to measure the sky brightness temperature.

**Methods and Methodology.** A detailed analysis of the existing installation for monitoring atmospheric CO was carried out and the measurement method was improved. It is shown that the broadband channel of this instrument, created as a service, can be used to measure atmosphere brightness temperature. Such measurement will allow creating a database of the zenith brightness temperature of the sky at frequencies of about 100 GHz.

**Results.** It is possible to create the base data of the brightness temperature of the sky at frequencies about 100 GHz. In order to do this, it is necessary to make only some modifications of the instrument. The main thing is to make changes to the data capture file of the broadband channel and create a program to convert the data obtained from the instrument into brightness temperature values according to the specified formulas. All necessary formulas for presenting observational results in the form of brightness temperatures are given.

**Conclusions.** It has been proven that there is a possibility to create the base data of the troposphere brightness temperature over Kharkiv (Ukraine) at the frequencies of the short-wave part of the mm range. The high stability of the radiometric part of the installation allows determining the brightness temperature of the sky with an accuracy that is sufficient for aeronomical, radioastronomical and radiophysical studies. On the basis of analytical calculations and experimental data, the necessary modifications for creating such a base data are defined.

**Keywords:** millimeter waves, zenith bright temperature, aeronomy, atmospheric sections.