

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra27.03.219>
УДК 537.86+621.37

О.М. Корольов¹, Ю.В. Карелін¹, О.В. Антюфеев¹,
В.М. Шульга^{1,2}, В.В. Мищенко¹, Д.Л. Чечоткін¹, Д.В. Шульга¹,
О.М. Патока¹, К.В. Маринко¹

¹Радіоастрономічний інститут НАН України
4, вул. Мистецтв, Харків, 61002, Україна
E-mail: K_W_M@ukr.net

²Міжнародний центр науки майбутнього, Цзіліньський університет
2699, вул. Цяньцзинь, Чанчунь, 130012, Китай

АЕРОНОМІЧНА РАДІОСПЕКТРОМЕТРІЯ З КАЛІБРУВАННЯМ ЗА ВІРТУАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

Предмет і мета роботи. Метою роботи є розробка та практичне впровадження нового методу аерономічних спостережень у стратосфері Землі в мікрохвильовому діапазоні електромагнітного спектра. Предмет досліджень — похибки вимірювань за цим методом стосовно до спостережень спектральної лінії озону (142 ГГц).

Методи і методологія. Метод базується на розробленій авторами, спрощеній в апаратурно-технічному аспекті, калібрувальній процедурі. На відміну від поширених калібрувальних методів (із застосуванням штучних спеціальних джерел опорного сигналу), нами використовуються віртуальні природні джерела — власні шуми приймача і тепловий шум (випромінювання) земної поверхні та приземного прошарку атмосфери. Похибки вимірювань (розрахункові та експериментальні) аналізувалися стандартними методами математичної статистики.

Результати. Натурні випробування при спостереженнях спектральної лінії атмосферного озону на частоті 142 ГГц можна вважати вдалимими. Розрахункове значення відносної похибки, обумовленої особливостями запропонованого методу спостережень, не перевищує 1.5 %. Експериментальне значення похибки, обумовленої всіма чинниками, не перевищує 5 % (термін накопичення — 1 година), що в цілому відповідає наявному світовому рівню.

Висновок. Продемонстровано можливість значного спрощення радіооптичної частини спектрометра, а новий калібрувальний метод і його технічне втілення можна рекомендувати як основу при створенні мобільних перспективних мікрохвильових спектрометрів.

Ключові слова: аерономія, озон, калібрування, міліметрові хвилі.

Вступ

Форма ліній випромінювання малих газових компонентів мезосфери та стратосфери несе інформацію про стан атмосфери. Тому їх вивчен-

ня важливе для побудови адекватних моделей атмосфери в цілому та її динамічних змін — добових і сезонних, антропогенних, сонячних тощо [1]. У дослідженнях використовуються як супут-

Цитування: 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. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27. № 3. С. 219–228. <https://doi.org/10.15407/rpra27.03.219>

Citation: Korolev, A.M., Karelin, Yu.V., Antyufeyev, O.V., Shulga, V.M., Myshenko, V.V., Chechotkin, D.L., Shulga, D.V., Patoka, O.M., Marynko, K.V., 2022. Aeronomic radio spectrometry with calibration by signals from virtual sources. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 27(3). pp. 219–228. <https://doi.org/10.15407/rpra27.03.219>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2022. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

никові інструменти, так і наземні моніторингові станції. Світова мережа саме наземних станцій, які працюють у міліметровому (мм) діапазоні довжин хвиль, нині розвивається особливо активно [2]. Попервах техніка аерономічних спостережень у мм-діапазоні базувалася на підходах традиційної позаатмосферної радіоастрономії — радіометричному прийманні з амплітудною та діаграмною модуляцією. Проблема власних шумів приймальної апаратури (йдеться про частоти вище 100 ГГц) вирішувалася також традиційно — криогенним охолодженням вхідного тракту приймача та тривалим накопиченням сигналу. З початку 2000-х років у аналоговій електроніці надвисоких частот відбулися суттєві зміни. Зокрема, досягнення в області приймально-підсилювальних пристроїв мм-діапазону привели до відмови від криоохолодження аерономічних спектрорадіометрів [3], стала можливою реалізація мобільних систем [4]. У сфері цифрової обробки сигналу доступними стали широкосмугові аналізатори спектра з використанням апаратного швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [5]. Як наслідок технічного прогресу, стало можливим вирішення актуальних завдань моніторингу швидкоплинних процесів у атмосфері: наприклад, добових варіацій висотного розподілу концентрації озону й окису вуглецю в мезосфері (за спостереженням зіштовхувального розширення лінії), швидкості вітру в середній атмосфері (за спостереженням доплерівського зсуву лінії) [6].

Слід вказати на важливі відмінності аерономії від радіоастрономії за наявної апаратурної та методичної подібності. Йдеться про локалізацію: сучасні радіоастрономічні інструменти мм-діапазону розташовують у місцях найкращого астроклімату. Кліматологічні ж та аерологічні станції необхідні, насамперед, у високих і середніх широтах — у так званих «фабриках погоди». Таких станцій потрібно багато, тому що їхній ефективний радіус огляду невеликий, не більше однієї-двох товщин атмосфери. Відповідно, апаратний комплекс аерологічної станції не може бути унікальною спорудою, на відміну від радіотелескопа. Однак відомі апаратні комплекси [2] при загальноприйнятих системах калібрування не можуть бути модернізованими, щоб стати мобільними пристроями. Головні проблеми — це потужне електроживлення та чималі габарити

вхідних квазіоптичних пристроїв радіоприймача. В ідеалі радіоспектрометр має стати стандартним атрибутом метеостанцій, у тому числі мобільних. Крім специфічного функціоналу, такий апарат має бути малогабаритним, економічним, недорогим у виробництві та експлуатації.

Метою цієї роботи є пошук такого рішення, яке дозволить змінити загальноприйнятую процедуру калібрування апаратного комплексу аерономічної станції, щоб виключити з нього спеціальні прецизійні узгоджені навантаження шляхом використання віртуальних джерел теплового випромінювання як калібрувальних, та значно спростити вхідну радіооптичну систему радіоприймача. Критерієм ефективності такого рішення має бути збереження точності вимірювання ліній, що спостерігаються.

1. Типовий радіоспектрометр

Блок-схему радіоспектрометра, яка містить основні складові частини, показано на рис. 1.

Очевидно, що такий радіоспектрометр є супергетеродинним приймачем із додатковими функціональними вузлами. Зауважимо, що автори мають досвід розробки ШПФ-спектроаналізаторів [5]. Зазвичай останні мають невеликі розміри та собівартість, тому далі оптимізація їхніх параметрів розглядатися не буде. Зазначимо лише, що застосований ШПФ-спектроаналізатор працював у діапазоні частот 1.5 ГГц та мав оглядову смугу 150 МГц, що складалася із 3818 каналів (40 кГц/канал).

Щодо вхідного підсилювача, змішувача та підсилювача проміжної частоти, то тут принципових проблем немає. Сучасна фосфід-індієва технологія має у своєму розпорядженні рішення класу «приймач-на-чипі» до частот близько 200 ГГц і вже використовується в радіоастрономічних приладах. Питання лише у комерційній доступності. Наразі такі пристрої відносяться до розряду замовних і мають ціну близько ста тисяч доларів. Зазвичай розширене тиражування веде до значного зниження вартості окремого пристрою.

Гетеродин включає три підвузли: високостабільне джерело первинного сигналу (ВДПС), фазостабілізований генератор основної гармоніки (ФГО) та помножувач частоти.

Помножувач частоти (пасивний діодний або активний транзисторний), навіть у хвилевідному

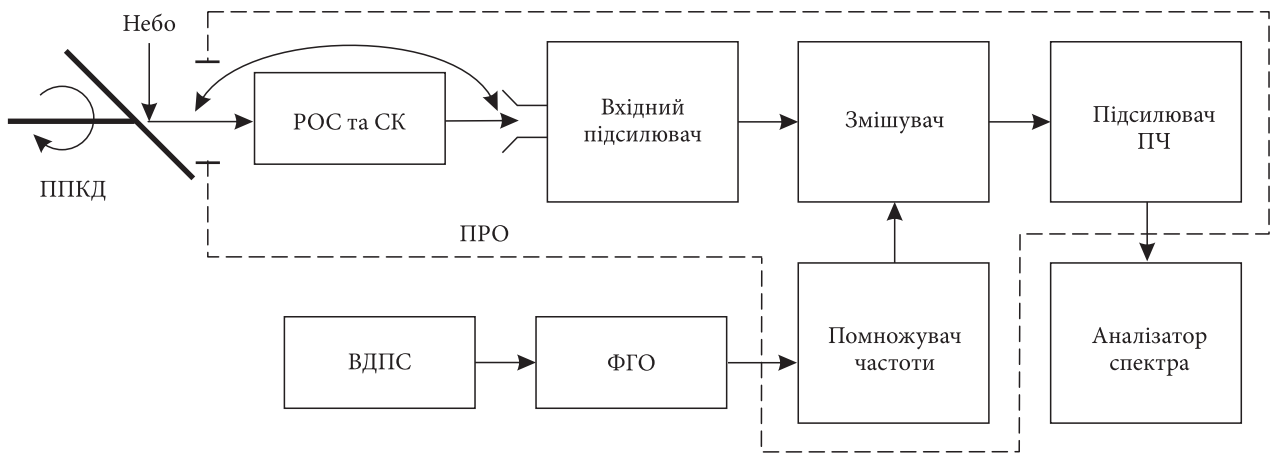


Рис. 1. Блок-схема радіоспектрометра без джерел живлення (пунктиром позначені зони активного термостатування): ППКД — первинне поворотне кутомісне дзеркало; ПРО — первинний рупор-опромінювач; РОС — радіооптична система; СК — система калібрування; ВДПС — високостабільне джерело первинного сигналу; ФГО — фазостабілізований генератор основної гармоніки; ПЧ — проміжна частота

виконанні, має малі габарити. Для інтегрального «приймача-на-чипі» помножувач є елементом самої мікросхеми. Тут завдання мініатюризації та здешевлення вже вирішено. Генератор основної гармоніки можна розмістити в об'ємі близько 1 дм³ разом із сервісною електронікою [7], навіть із використанням комерційно доступних корпусних арсенід-галієвих елементів і хвилевідної технології. Звісно ж, є очевидним, що у мікросмушковому виконанні, за умов ефективного тепловідведення, генератор буде ще меншим. Високостабільне джерело первинного сигналу із прямим цифровим синтезом на мікросхемах широкого застосування також може мати дуже невеликий розмір та вартість [7]. Специфічна особливість ВДПС — його робота на одній частоті. Саме тому, для отримання мінімальних розмірів і вартості, можна використовувати технічні рішення, характерні для приймачів глобального позиціонування (GPS). В опорних джерелах такі рішення вже використовуються. Таким чином, немає принципових проблем із розмірами та собівартістю при виготовленні електронної частини радіоспектрометра [8, 9]. Проблемою є зменшення габаритних розмірів вхідної квазі-оптичної системи радіоспектрометра.

2. Вхідна радіооптика із системою калібрування радіоспектрометра

У процесі спостережень телуричних ліній малих атмосферних домішок радіоспектрометр має

сформувати три масиви даних про вхідний сигнал (в одиницях, пропорційних потужності), що досягається за допомогою вхідної радіооптичної системи, яка забезпечує переключення джерел сигналів. Перший масив містить дані про шумову температуру неба з урахуванням внеску спектральної лінії. На вимірювання, що формують цей масив, припадає близько 90 % часу загального циклу спостережень. Другий масив містить дані тропосферного розрізу, які необхідні для виділення власне спектральної лінії з усуненням впливу фонового випромінювання неба та тропосферного згасання (10 % спостережного часу). Третій масив є сервісним, він містить результати вимірювання шумової температури приймача (T_{res}). Завдяки високій стабільності шумової температури нашого приймача третій масив даних оновлюється приблизно 2–4 рази на рік. Усі масиви даних є парними, тобто містять як результати вимірювання, так і калібрування.

У відомих зразках вхідних радіооптичних систем, що забезпечують перераховані вище вимірювання [4, 6], є 2–3 плоских дзеркала і 1–2 криволінійних (параболічних, еліптичних). Діаметри дзеркал для довжини хвилі 3 мм, становлять близько 10 см і навіть при опроміненні супергауссівським рупором, не можуть бути зменшені без неприйнятної зростання дифракційних втрат. Дзеркала, що обертаються (поворотні), мають кроковий привід (систему позиціонування) з редуктором та датчиками кута

повороту. Усе це є прецизійними механічними вузлами, кожен з яких займає об'єм не менше 1 дм³. Дисипативні навантаження (2–3 шт.), що використовуються для калібрування, мають майже такі самі розміри, як дзеркала, і являють собою складну герметичну конструкцію. Остання містить термостат із застосуванням елементів Пельтьє, а також (дуже часто) пристрій знакозмінного чвертьхвильового зсуву, що нівелює картину стоячих хвиль у тракці при калібруванні. З огляду на це об'єм герметичної камери типового радіоспектрометра може становити близько 1 м³, а його маса — майже 100 кг (без урахування поворотної платформи та несучої конструкції). Сумарне енергоспоживання, переважно за рахунок потужного загального термостата з елементами Пельтьє, може сягати одиниць кіловат. Причина полягає саме в радіооптичній системі, яка проектується під загальноприйнятну калібрувальну методику з опорними навантаженнями. З вищевикладеного випливає висновок про принципову неможливість істотного зменшення габаритів, енергоспоживання і, зрештою, вартості радіоспектрометра за традиційного підходу до методики та техніки калібрування.

Автори пропонують змінити загальноприйнятну калібрувальну процедуру, а саме взагалі виключити узгоджені навантаження та максимально спростити всю пов'язану з калібруванням радіооптику.

3. Власні шуми приймача та «закритий» горизонт як еквівалентні джерела калібрувальних сигналів

Основна ідея полягає у заміні реальних опорних навантажень віртуальними функціональними аналогами. У квазіоптичній схемі такого радіоспектрометра можна залишити лише первинний рупорний опромінювач і поворотне дзеркало, що розміщується поза герметичним корпусом. Саме РОС та СК (рис. 1) виключаються, а ПРО безпосередньо опромінює кутومیсне дзеркало.

Запропонований метод організації радіометрії відповідає модуляційному типу, оскільки формально калібрування є різновидом модуляції, а аналог дисипативного навантаження використовується як опорне джерело. Загальний математичний опис роботи таких радіометрів добре відомий [10]. Тим не менш, «спектральна» радіо-

метрія має свою специфіку, тому буде корисним навести математичний опис вимірювальної процедури саме для нашого випадку. Зауважимо, що вплив шумів приймача та нестабільності посилення добре описані та перебувають поза контекстом цієї роботи. Найбільш цікавим є питання про можливість заміни стандартних калібрувальних джерел на джерела віртуальні. Для з'ясування можливості такої заміни найважливіший критерій — точність визначення радіояскравості джерел.

При почерговому вимірюванні середньоквадратичного значення потужності опорного (еталон, $P_{bb(i)}$) і корисного (небо, $P_{s(i)}$) сигналів на виході кожного i -го каналу, відповідно до теореми Найквіста, справедливі такі вирази:

$$P_{bb(i)} = c_i k \Delta f (T_{rec(i)} + T_{bb(i)}); \quad (1)$$

$$P_{s(i)} = c_i k \Delta f (T_{rec(i)} + T_{a(i)}), \quad (2)$$

де c_i — безрозмірний коефіцієнт передачі за потужністю приймача (включаючи аналізатор спектра) для i -го каналу спектроаналізатора; k — стала Больцмана; Δf — смуга частот одного каналу; $T_{rec(i)}$ — еквівалентна шумова температура приймача; $T_{bb(i)}$ — радіояскравісна температура еталонного джерела («чорного тіла» чи його еквівалента); $T_{a(i)}$ — антенна температура.

Тут антенна температура введена відповідно до загальноприйнятого визначення [10]: $T_a = T_s + T_{sky}$, де T_{sky} — фонові радіояскравісна температура неба, включаючи реліктовий фон, T_s — температура джерела спектральної лінії без коригування на тропосферне поглинання. Методику виключення фону та корекції вимірюваного значення спектральної температури з урахуванням тропосферного поглинання буде описано далі. Коефіцієнт c_i — величина нестабільна, зі спектром типу $1/f$, що обмежує одиничний вимірювальний інтервал. З фізичної точки зору, саме регулярне оновлення масиву c_i і є калібруванням.

З виразів (1), (2) можна отримати:

$$T_{a(i)} = (P_{s(i)} / P_{bb(i)}) (T_{rec(i)} + T_{bb(i)}) - T_{rec(i)}. \quad (3)$$

Параметр $T_{rec(i)}$ є функцією частоти вхідного сигналу або, відповідно, номера спектрального каналу. На відміну від c_i , величина $T_{rec(i)}$ дуже ста-

більша і змінюється (зростає) лише через деградацію електроніки. На всіх аерономічних станціях вимірювання $T_{rec(i)}$ проводиться 2–4 рази на рік за допомогою криогенно охолодженого навантаження (за загальновідомим методом «двох температур»). Треба зауважити, що саме висока стабільність $T_{rec(i)}$ дозволяє використовувати її як віртуальне джерело калібрувального сигналу. Величина $T_{rec(i)}$ зазвичай знаходиться в межах 400...1 000 К. Питання про точність вимірювання $T_{rec(i)}$ не таке просте, оскільки вимірювання $T_{rec(i)}$ здійснюється не на хвилевідному зрізі приймача, а передбачає застосування елементів вхідної радіоптики. Як ми з'ясували на практиці, що збігається з даними інших дослідницьких груп, щомісячна відтворюваність вимірювань $T_{rec(i)}$ є не гіршою за 2 %, і саме це значення ми будемо далі використовувати в оцінках точності визначення цільової характеристики — температури калібрувального джерела (див. нижче). З огляду на те, що еквівалентний генератор шуму приймача є природно внутрішнім, постановка питання про його коефіцієнт відбиття не має сенсу. Важливим є питання про спектральну щільність шумів такого віртуального джерела. Природно, йдеться не про радіояскравісний спектр випромінювання, а про еквівалентний спектр, що описується залежністю $T_{rec(i)}$ від частоти. Цей спектр визначається експериментально штатним спектроаналізатором радіоспектрометра (рис. 2), а його спектральна щільність апроксимується бездисперсійною гладкою функцією (у нашому випадку — поліномом 5-го степеня, рис. 3).

Така апроксимація широко практикується, її ефективність забезпечується багаторазовими вимірюваннями з усередненням. При цьому час накопичення не є лімітованим через рідкість виконання процедури, тобто для вимірювань $T_{rec(i)}$ забезпечується краща флуктуаційна чутливість (мінімальна абсолютна похибка), ніж за поточних вимірювань T_a . Як видно з рис. 2, навіть при трихвилинному накопиченні з усередненням, середньоквадратичне відхилення не перевищує 1 К та може бути значно зменшеним. У будь-якому випадку це набагато менше відтворюваності вимірювань (див. вище), яка становить одиниці кельвінів (у нашому випадку це значення не перевищувало 10 К). Саме це значення ($\delta T_{rec} = 2\%$ або $\Delta T_{rec(i)} = 10$ К) ми будемо далі використову-

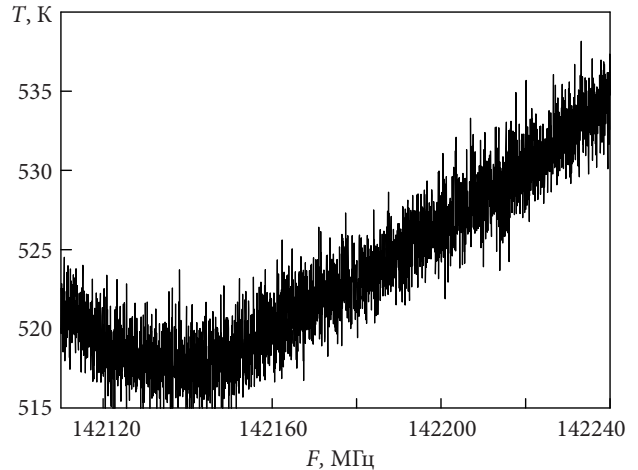


Рис. 2. Двосмугова (DSB) шумова температура приймача, виміряна в усіх (3 818) каналах спектроаналізатора й усереднена за трихвилинними вимірювальними інтервалами

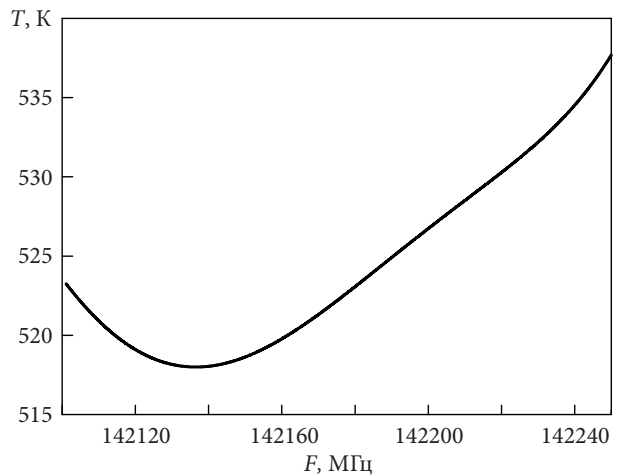


Рис. 3. Апроксимація шумової температури приймача (рис. 2) поліномом 5-го степеня

вати в оцінках похибки визначення температури джерела δT_s .

Для визначення залежності δT_s від T_{rec} до виразів (1), (2) введемо зміни, що враховують дуже слабку залежність T_{rec} (тим більше, T_{bb}) від частоти: менше 10 % у смузі аналізатора спектра (у нас — 150 МГц). Тоді вираз (1) набуде вигляду:

$$P_{bb(i)} = c_i k \Delta f (T_{rec} + T_{bb}), \quad (4)$$

де під T_{rec} маємо на увазі її середнє значення, а $T_{bb} = const$. Також, враховуючи слабку залежність $T_{sky(i)}$ від частоти, введемо $T_{sky(f)}$ у вигляді лінійної апроксимації як пряму, побудовану за результатами усереднення ряду крайніх низько- та високочастотних каналів, де вплив $T_{s(i)}$ незначний.

У реальних експериментах (розд. 4) ми обирали першу та останню сотні каналів (параметр i у виразах складає $i = 1 \dots 100$ та $i = 3718 \dots 3818$) з віднесенням отриманих середніх значень до країв зазначених інтервалів. З урахуванням сказаного, вираз (2) набуває вигляду:

$$P_{s(i)} = c_i k \Delta f (T_{rec} + T_{s(i)} + T_{sky(f)}). \quad (5)$$

При цьому вимірювальні дані для крайніх каналів (де $T_{s(i)}$ близько до нуля) вже містяться в масиві вихідних даних (5):

$$P_{sky(f)} = c_i k \Delta f (T_{rec} + T_{sky(f)}). \quad (6)$$

З виразів (4)–(6) отримаємо:

$$T_{s(i)} = (P_{s(i)}/P_{bb(i)} - P_{sky(f)}/P_{bb(i)})(T_{rec} + T_{bb}). \quad (7)$$

Похибка прямо вимірюваних величин $P_{s(i)}$, $P_{bb(i)}$, $P_{sky(f)}$ визначається стабільністю та лінійністю приймача. У цих розрахунках ми припускаємо, що вони не вносять похибки в $T_{s(i)}$. Параметр T_{bb} , як характеристика безвідбивного навантаження типу «закритий горизонт», жорстко прив'язаний до температури приземного шару атмосфери і також не вносить суттєвих помилок. У цих рамках з формули (7) визначається відносна похибка δT_s , яка обумовлена відносною похибкою δT_{rec} :

$$\delta T_s = \delta T_{rec} / (1 + T_{bb}/T_{rec}). \quad (8)$$

У нашому випадку, близькому до практики інших дослідницьких груп, $\delta T_{rec} \approx 2\%$, $T_{rec} \approx 530$ К, $P_{bb} \approx 300$ К, отримаємо $\delta T_s < 1.5\%$. Очевидно, що це більш ніж достатня точність для аерономічних спостережень. Зауважимо, що ми розглянули похибку (δT_s), яка вноситься неточністю вимірювання середньої шумової температури приймача. Принципово можливі похибки визначення форми частотної характеристики $T_{rec(i)}$ можуть проявитися в нетелуричності $T_{s(i)}$ (наприклад, в її несиметричності), але цього ефекту не було виявлено (див. розд. 4).

Друге калібрувальне джерело, що використовується традиційно, це дисипативне навантаження, теплове випромінювання якого приймається ідентичним випромінюванню ідеального «чорного тіла», тобто спектр випромінювання

вважається «білим», а $T_{bb(i)}$ дорівнює фізичній температурі навантаження. За реальних умов ці апріорні припущення суворо не виконуються. По-перше, коефіцієнт відбиття поглинаючих навантажень на частотах вище 100 ГГц рідко буває нижче -20 дБ. По-друге, виготовлені з матеріалу з низькою теплопровідністю «товсті» навантаження мають градієнт температур, і їхня вимірювана фізична температура може помітно (до 10 К) відрізнитися від радіояскравісної. У результаті навантаження прийнятної якості реалізуються у вигляді складних великогабаритних вузлів з усіма недоліками такого підходу (герметизація, термостатування, багатоточкове вимірювання температури та ін.).

Автори пропонують замінити теплове випромінювання дисипативного навантаження тепловим випромінюванням, що породжується приземним шаром атмосфери та елементами ландшафту (рослинність, будівлі тощо). Положення кутомісного дзеркала (рис. 1) у цьому режимі відповідає куту близько нуля. На відміну від великогабаритних радіотелескопів, реалізація «ковзного» променя у нашому випадку проблем не викликає. Природно, в азимутальному напрямку променя мають бути лише дифузні розсіювачі. Перешкоди на зразок металевих дахів неприпустимі. Таке еквівалентне джерело теплового випромінювання ми називаємо «закритим» горизонтом (ЗГ). Необхідний азимутальний напрямок і кут місця програмується в системі позиціонування та обираються при виконанні калібрування. Слід наголосити на важливості саме «закритого» горизонту, з довжиною оптичної траси від десятків метрів до одиниць кілометрів. Якщо довжина оптичної траси складає десятки кілометрів, то у калібрувальному сигналі може бути присутнім випромінювання озону приземного шару атмосфери, котре призведе до похибок вимірювання. Як джерело теплового випромінювання, ЗГ еквівалентний навантаженню, термалізованому з оточенням, але має на порядки більшу теплову інерцію. Таким чином, у межах вимірювального циклу фізична температура ЗГ стабільна, коефіцієнт відбиття незначний (менше -40 дБ), а тому є стабільним і рівномірним у широкій смузі частот інтегральний параметр — радіояскравісна температура ЗГ. Як свідчить багаторічний досвід авторів, радіо-

яскравісна температура ЗГ та великогабаритного зовнішнього навантаження збігаються з точністю не гірше 1 %. Обидві радіояскравісні температури, з точністю не гірше 2 %, дорівнюють температурі оточення. Остання бралася з власних вимірювань та даних локальної метеостанції.

Ще одна відмінність навантаження типу ЗГ від стандартного полягає в тому, що температурою останнього можна, в деяких межах, керувати. У радіоастрономічних системах це дозволяє вирівнювати антенні шумові температури в циклах вимірювання та калібрування, пригнічуючи тим самим так званий ефект «паразитної сходинки», яка є відомим негативним явищем, пов'язаним з нестабільністю коефіцієнта передачі приймача. Для аерономічних систем, що оперують із сигналами досить високого рівня, фактор нестабільності менш важливий. Зауважимо також, що усунення ефекту «паразитної сходинки» вимагає охолодження опорного навантаження до низьких (криогенних) температур з очевидними недоліками такого підходу. На практиці температура статкування опорного навантаження обмежується величиною порядку 250 К, не сильно, з погляду стабільності, відрізняючись від температури ЗГ 260...330 К. Усі вищевикладені міркування мають, скоріш, якісний характер. Результати прямої експериментальної перевірки працездатності запропонованого методу буде наведено далі. В експериментах ми застосовували раніш розроблені прилади [5, 8].

4. Реальні спостережені спектрограми (початкові та скориговані) та їх обговорення

Результати спостережень атмосферного озону без будь-якої обробки наведено для світлої (рис. 4) та темної (рис. 5) частини доби. Відомо, що на лінях озону, які спостерігаються у темну частину доби, в центрі лінії з'являється вузький добре помітний сплеск інтенсивності. Він зумовлений проникненням молекул озону у верхні шари атмосфери та уникненням ними розпаду через сонячні промені [8]. Ці ілюстрації наведено, щоб продемонструвати високу якість нашого апаратного комплексу. Вищезгаданий сплеск є добре помітним навіть у первинних даних, які ми одержуємо при спостереженнях атмосферного озону.

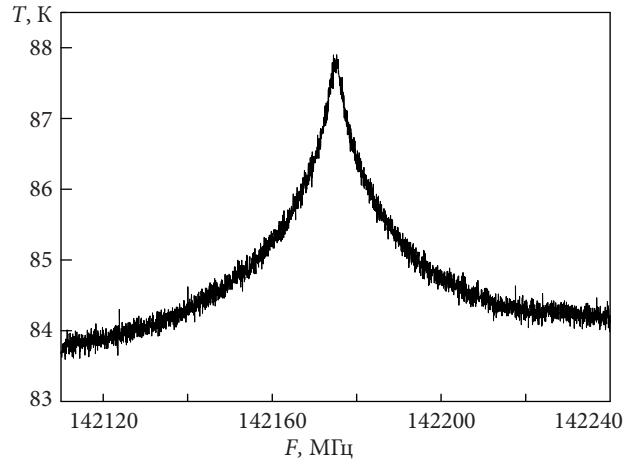


Рис. 4. Приклад реальної спектрограми в необробленому вигляді (денний двогодинний запис)

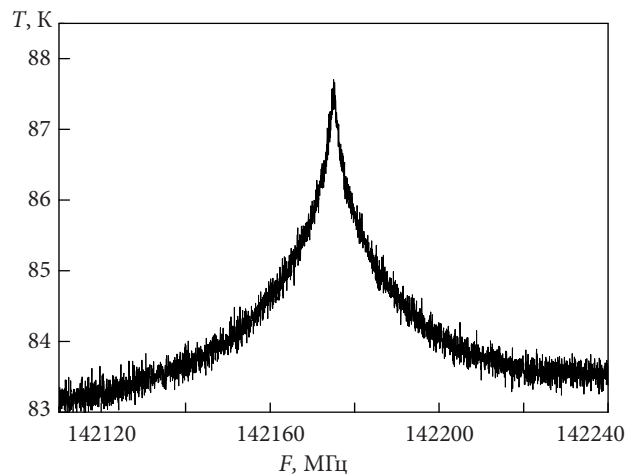


Рис. 5. Приклад реальної спектрограми в необробленому вигляді (вечірній одногодинний запис)

Зазвичай, для подальшої обробки отримані дані разом з певною кількістю супутніх параметрів (апаратних, кліматичних тощо) завантажуються у загальновизнану програму ARTS, що моделює перенесення випромінювання у атмосфері [1]. Після обробки отримуємо результат у вигляді, наприклад, висотного профілю концентрації озону. Проте нашому випадку для демонстрування дієздатності запропонованого методу калібрування достатньо візуалізації спектрограм з мінімальною обробкою, щоб виключити неконтрольовані спотворення. З огляду на це процедура обробки первинної спектрограми була спрощена та полягала в такому: 1) приведення до нульової лінії; 2) урахування тропосферного поглинання; 3) урахування двосмуговості приймача.

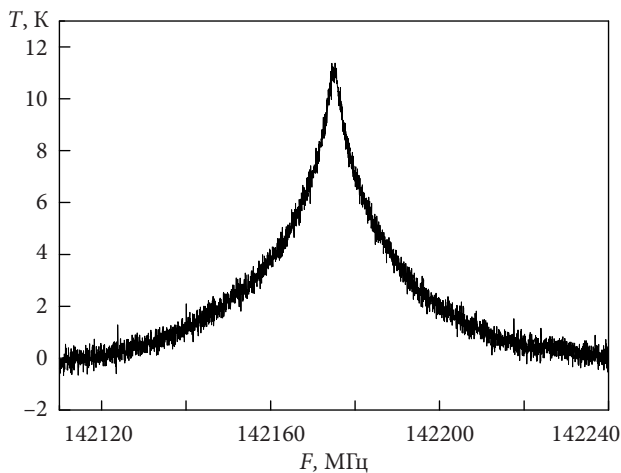


Рис. 6. Приклад реальної спектрограми в скорегованому вигляді (денний двогодинний запис)

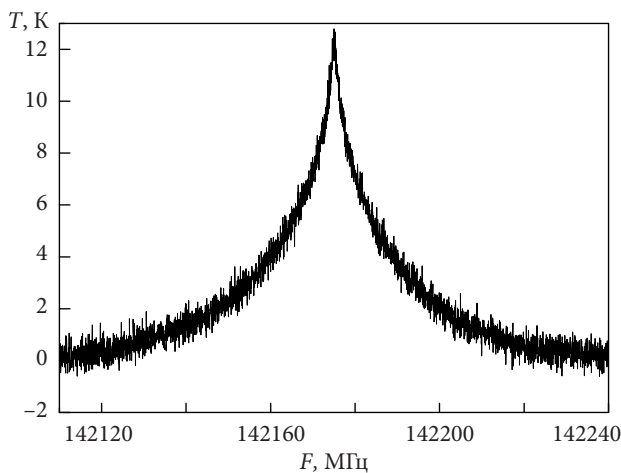


Рис. 7. Приклад реальної спектрограми в скорегованому вигляді (вечірній одногодинний запис)

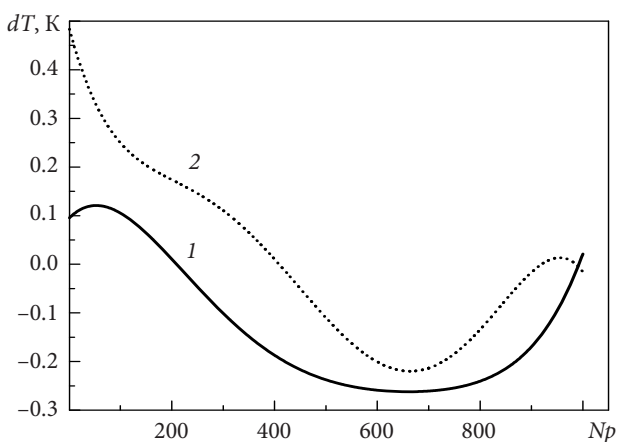


Рис. 8. Апроксимація різниці (dT [K]) лівої та правої частин спектрів лінії озону поліномом 5-го степеня для одногодинного (крива 1) та двогодинного (крива 2) записів, де N_p — точки спектра від центру лінії. Для визначення відстані до центру лінії у частотному вимірі треба N_p помножити на 40 кГц — ширину одного каналу

Приведення до нульової лінії виконувалося за допомогою лінійної апроксимації, описаної вище виразом (7). Урахування тропосферного поглинання проведено за стандартною методикою, що використовує одношарову модель тропосфери [11]. У цій моделі можна записати залежність яскравісної температури неба від оптичної товщини тропосфери τ :

$$T_{sky} = T_{trop}(1 - e^{-\tau}) + T_{bg}e^{-\tau}, \quad (9)$$

де T_{trop} — ефективна температура тропосфери; $T_{bg} = 2.8$ K — температура мікрохвильового фону; τ — оптична товщина атмосфери на частоті молекулярної лінії під кутом місця спостережень (у нашому випадку це напрямок у зеніт). За загальноприйнятим правилом, $T_{trop} = T_{gr} - 15$, де T_{gr} — фізична температура на поверхні Землі. Тому отримуємо:

$$\tau = \ln\left(\frac{(T_{trop} - T_{bg})}{(T_{trop} - T_{sky})}\right). \quad (10)$$

Тоді, скорегований вираз для спектральної лінії $T_{s(i)}^*$ має такий вигляд:

$$T_{s(i)}^* = 2T_{s(i)} \exp(-\tau).$$

Типові результати вимірювання лінії озону, проведені вдень та у вечірній час, показано, відповідно, на рис. 6 і 7 вже у скорегованому вигляді. Із цих рисунків видно, що інтенсивність лінії у темну частину доби складає 12.5 K проти 11 K у світлу частину доби, тобто збільшується на 13 %.

Спектри мають високу якість, без видимих асиметрій, викидів тощо. Для більшої наочності та кількісної оцінки ми наводимо дані для різниць лівих та правих частин спектрів лінії озону для одногодинного та двогодинного записів, а також апроксимації різницевих графіків поліномами 5-го степеня (рис. 8).

З наведених на рис. 8 даних видно, що асиметрія форми спектральної лінії не перевищує розрахункового значення похибки ($T_s < 1.5$ %), обумовленої відмінностями запропонованого методу калібрування від стандартного підходу. Отримані, вже задовільні, результати будуть поліпшені з урахуванням нелінійності частотної залежності тропосферного поглинання та фонові температури неба.

Висновки

Проведені дослідження ліній озону на частоті 142 ГГц довели, що запропонований метод спостереження телуричних ліній з калібруванням за віртуальними джерелами теплового випромінювання забезпечує точність вимірювання ліній не гірше від загальноприйнятих методів. Водночас новий метод дозволяє суттєво спростити радіооптичну систему спектрометра без скорочення функціоналу приладу; додаткова похибка у 1.5 %

є незначною. Переваги запропонованого методу можуть бути використані при розробках мобільних аерономічних радіоспектротрів.

Роботу виконано за темою «Дослідження випромінювання молекул в позагалактичних, галактичних об'єктах і в атмосфері Землі методами наземної мікрохвильової спектроскопії для сучасних задач космології, астрофізики і аерології», номер державної реєстрації 0122U000574.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Buehler S.A., Eriksson P., Kuhn T., von Engel A., Verdes C. ARTS, the Atmospheric Radiative Transfer Simulator. *J. Quant. Spectrosc. Ra.* 2005. Vol. 91, Iss. 1. P. 65–93. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.05.051.
2. Straub C., Espy P., Hibbins R., and Newnham D. Mesospheric CO above Trollstation, Ant arctica observed by a ground based microwave radiometer. *Earth Syst. Sci. Data.* 2013. Vol. 5, Iss. 1. P.199–208. DOI: 10.5194/essd-5-199-2013.
3. Forkman P., Christensen O. M., Eriksson P., Urban J. and Funke B. Six years of mesospheric CO estimated from ground-based frequency-switched microwave radiometry at 57° N compare dwith satellite instruments. *Atmos. Meas. Tech.* 2012. Vol. 5, Iss. 11. P. 2827–2841. DOI: 10.5194/amt-5-2827-2012.
4. Hagen J., Murk A., Rüfenacht R., Khaykin S., Hauchecorne A., Kämpfer N. WIRA-C: a compact 142-GHz-radiometer for continuous middle-atmospheric wind measurements. *Atmos. Meas. Tech.* 2018. Vol. 11, Iss. 9. P. 5007–5024. DOI: 10.5194/amt-11-5007-2018.
5. Karelin Yu.V., Antyufeyev O.V., Myshenko V.V., Shulga V.M. An FPGA-based fourier FFTS-160 spectrometer for atmospheric molecular radiation research. *Telecommunications and RadioEngineering.* 2017. Vol. 76, Iss. 4. P. 305–313. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i4.30.
6. Rufenacht R., Kampf N., Murk A. First middle-atmospheric zonal wind profile measurements with a new ground-based microwave Doppler-spectro-radiometer. *Atmos. Meas. Tech.* 2012. Vol. 5, Iss. 11. P. 2647–2659. DOI: 10.5194/amt-5-2647-2012.
7. Мышенко В.В., Шульга В.М., Королев А.М., Карелин Ю.В., Четчин Д.Л., Антюфеев А.В., Патока А.Н. Гетеродины аэрoномических приемников миллиметрового диапазона. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2019. Т. 24, №2. С. 144–153. DOI: 10.15407/rpra24.02.144.
8. Подъячий В.И., Королёв А.М., Мышенко В.В., Шульга В.М. Приёмный модуль 2-мм диапазона для наблюдений линии излучения атмосферного озона на частоте 142,2 Гц. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2015. Т. 20, № 3. С. 261–268. DOI: 10.15407/rpra20.03.261.
9. Piddyachiy V., Shulga V., Myshenko V., Korolev A., Myshenko A., Antyufeyev A., Poladich A., and Shkodin V. 3-mm wave spectroradiometer for studies of atmospheric trace gases. *Radiophys. Quantum Electron.* 2010. Vol. 53, Iss. 5–6. P. 326–333. DOI: 10.1007/s11141-010-9231-y.
10. Краус Дж.Д. *Радиоастрономия.* Пер. с англ. под ред. В.В. Железнякова. Москва: Советское радио, 1973, 456 с.
11. Ingold T., Peter R., and Kämpfer N. Weighted mean tropospheric temperature and transmittance determination at millimeter-wave frequencies for ground-based applications. *Radio Sci.* 1998. Vol. 33, Iss. 4. P. 905–918. DOI: 10.1029/98RS01000.

Стаття надійшла 05.05.2022

REFERENCES

1. Buehler, S.A., Eriksson, P., Kuhn, T., von Engel, A., Verdes, C., 2005. ARTS, the Atmospheric Radiative Transfer Simulator. *J. Quant. Spectrosc. Ra.*, **91**(1), pp. 65–93. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.05.051.
2. Straub, C., Espy, P., Hibbins, R., and Newnham, D., 2013. Mesospheric CO above Trollstation, Antarctica observed by a ground based microwave radiometer. *Earth Syst. Sci. Data*, **5**(1), pp. 199–208. DOI: 10.5194/essd-5-199-2013.
3. Forkman, P., Christensen, O.M., Eriksson, P., Urban, J. and Funke, B., 2012. Six years of mesospheric CO estimated from ground-based frequency-switched micro wave radiometry at 57° N compare dwith satellite instruments. *Atmos. Meas. Tech.*, **5**(11), pp. 2827–2841. DOI: 10.5194/amt-5-2827-2012.
4. Hagen, J., Murk, A., Rüfenacht, R., Khaykin, S., Hauchecorne, A., Kämpfer, N., 2018. WIRA-C: a compact 142-GHz-radiometer for continuous middle-atmospheric wind measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, **11**(9), pp. 5007–5024. DOI: 10.5194/amt-11-5007-2018.
5. Karelin, Yu.V., Antyufeyev, O.V., Myshenko, V.V., Shulga, V.M., 2017. An FPGA-based Fourier FFTS-160 spectrometer for atmospheric molecular radiation research. *Telecommunications and RadioEngineering*, **76**(4), pp. 305–313. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i4.30.

6. Rufenacht, R., Kampfer, N., Murk, A., 2012. First middle-atmospheric zonal wind profile measurements with a new ground-based microwave Doppler-spectro-radiometer. *Atmos. Meas. Tech.*, **5**(11), pp. 2647–2659. DOI: 10.5194/amt-5-2647-2012.
7. Myshenko, V.V., Shulga, V.M., Korolev, O.M., Karelin, Yu.V., Chechotkin, D.L., Antyufeyev, O.V., Patoka, O.M., 2019. Local oscillators for mm-wavelength aeronomic receivers. *Radio Phys. Radio Astron.*, **24**(2), pp. 144–153 (in Russian). DOI: 10.15407/rpra24.02.144.
8. Piddyachiy, V., Korolev, A., Myshenko, V., Shulga, V., 2015. The 2-mm range receiving module for observations of atmospheric zone emission line at 142.2 GHz. *Radio Phys. Radio Astron.*, **20**(3), pp. 261–268 (in Russian). DOI: 10.15407/rpra20.03.261.
9. Piddyachiy, V., Shulga, V., Myshenko, V., Korolev, A., Myshenko, A., Antyufeyev, A., Poladich, A., and Shkodin, V., 2010. 3-mm wave spectroradiometer for studies of atmospheric trace gases. *Radiophys. Quantum Electron.*, **53**(5–6), pp. 326–333. DOI: 10.1007/s11141-010-9231-y.
10. Kraus, G.D., 1973. *Radioastronomy*. Transl. from English ed. V.V. Zheleznyakov. Moscow, USSR: Sov. Radio Publ. (in Russian).
11. Ingold, T., Peter, R., Kämpfer, N., 1998. Weighted mean tropospheric temperature and transmittance determination at millimeter-wave frequencies for ground-based applications. *Radio Sci.*, **33**(4), pp. 905–918. DOI: 10.1029/98RS01000.

Received 05.05.2022

A.M. Korolev¹, Yu.V. Karelin¹, O.V. Antyufeyev¹, V.M. Shulga^{1,2},
V.V. Myshenko¹, D.L. Chechotkin¹, D.V. Shulga¹, O.M. Patoka¹, K.V. Marynko¹

¹ Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine

4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

² International Center for the Science of the Future, Jilin University

2699, Qianjin St., Changchun City, 130012, China

AERONOMIC RADIO SPECTROMETRY WITH CALIBRATION BY SIGNALS FROM VIRTUAL SOURCES

Subject and Purpose. The work has been aimed at developing and implementing a novel method of aeronomic observations in the Earth's stratosphere, applicable in the microwave range of the electromagnetic spectrum. The research is centered on a study of the measurement errors arising when the method proposed is employed for observations of the ozone spectral line (142 GHz).

Methods and Methodology. The method is based on a simplified calibration procedure, in what concerns the hardware and the technology employed. In contrast to the common calibration techniques using special-purpose sources of the reference signal, we suggest resorting to natural sources, like internal noise of the receiver and the thermal radiation from the Earth's surface and the lower atmospheric layer. The measurement errors (both calculated and evaluated experimentally) have been analyzed within standard mathematical statistics techniques.

Results. The tests performed during observations of the spectral line (142 GHz) of atmospheric ozone allow considering the new method as a success. The estimated magnitude of the relative error specific to the observation method proposed does not exceed 1.5%. The experimental estimate accounting for all potential error sources does not exceed 5% (with a 1 hour accumulation period), which result corresponds to the current state of the art.

Conclusions. The possibility of an essential simplification of the radio optical part of the spectrometer has been demonstrated. The novel calibration technique, as well as the technical implementation thereof, can be recommended as a basis for prospective spectrometers at microwave frequencies.

Keywords: *aeronomy, ozone, calibration, millimeter wavelengths.*