

УДК 621.396.96

БЮДЖЕТНИЙ ВИМІРЮВАЧ ІНТЕГРАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОГИ В СТОВПІ АТМОСФЕРИ

М. В. Руженцев¹, С. С. Жила², В. В. Павліков³
В. В. Кошарський⁴, Г. С. Черепнін⁵

Національний аерокосмічний університет ім. М. Е. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»,
вул. Чкалова, 17, 61000, Харків, Україна,

¹nvrzh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3023-4927>,
²simeon.zhyla@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2989-8988>,
³v.pavlikov@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0002-6370-1758>,
⁴v.kosharsky@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0002-8569-2047>,
⁵g.cherepnin@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0003-1245-0933>

Безперервний дистанційний моніторинг фізичних параметрів атмосфери є актуальним завданням при вирішенні питань метеорології, кліматології, штучного впливу на хмари, при дослідженнях фізики хмарного покриву тощо. У розвинених країнах світу для вирішення цих питань прийнято використовувати наукомісткі технології радіометрії міліметрового діапазону хвиль (ММ ДХ). Вони дозволяють, зокрема, оперативно відновлювати значення загального вмісту і ефективної температури крапельної і пароподібної вологи в атмосферному стовпі, розрізняти області з кристалічною, крапельною або пароподібною фазами води.

У даній роботі розрахунковим і експериментальним шляхом обґрунтована можливість широкомасштабного вирішення завдань безперервного дистанційного моніторингу цих параметрів атмосферної вологи методом радіометрії сантиметрового діапазону хвиль (СМ ДХ). Для визначення кращої пари частот для відновлення параметрів атмосферної вологи по радіометричним даним дистанційного зондування були розраховані коефіцієнти лінійного поглинання для ясної атмосфери, для хмар в залежності від температури крапель і в дощах різної інтенсивності для частот 4, 12, 20, 40 і 94 ГГц. Для розрахунку цих даних нами використовувалась відома модель MPM (Atmospheric Millimeter Waves Propagation Model). При цьому, розрахунок висотних профілів метеорологічних параметрів атмосфери був проведений на основі моделі ERA-15.

Можливість вирішення зазначених вище завдань в СМ ДХ була показана шляхом зіставлення отриманих розрахунковим шляхом даних з урахуванням прогресу технічних параметрів серійної елементної бази. Представлено опис схемних і технічних рішень, а також зовнішній вигляд двочастотної радіометричної системи діапазону 1,5 см і 2,5 см, створеної в Національному аерокосмічному університеті (ХАІ) на основі легко доступної сучасної елементної бази та результатів натурних тестових випробувань. Бюджетна направленість описаної розробки дозволяє забезпечити радіофізичні вимірювання з чутливістю радіометрів краще 0.01 К при забезпеченні собівартості дрібносерійного виробництва радіотехнічної частини системи, порівнянної з вартістю широко поширених в побуті ТВ конверторів.

Ключові слова: радіояскравісна температура; радіометр; чутливість; діапазон хвиль

1. ВСТУП

Безперервний дистанційний моніторинг фізичних параметрів атмосфери є актуальним завданням при вирішенні питань метеорології, кліматології, штучного впливу на хмари, при дослідженнях фізики хмарного покриву та ін. В розвинених країнах світу для вирішення цих питань прийнято використовувати наукомісткі

технології радіометрії ММ ДХ. Вони дозволяють оперативно відновлювати значення висотних профілів температури, загального змісту і ефективної температури крапельної і пароподібної вологи в атмосферному стовпі, розрізняти області з кристалічною, крапельною або пароподібною фазами вологи тощо. [1-5].

Вперше в Україні цикл двочастотних радіо-

метричних спостережень проходження декількох фронтальних зон хмарності був проведений спільно співробітниками РІНАНУ і УкрНДГМІ в селищі Жовтневому ще в 1993 році [6] в діапазонах 94 ГГц і 39 ГГц. Результати цього та інших [5,7] проведених в Харкові натурних експериментів продемонстрували практичні можливості та ефективність методу радіометрії ММ ДХ для безперервного моніторингу параметрів атмосферної вологи. Однак, економічна ситуація в країні, разом з відносно високою вартістю використовуваної для цих цілей апаратури ММ ДХ, не дозволили забезпечити впровадження даного ефективного методу в повсякденну практику, зокрема, в розгалуженій мережі станцій Українського гідрометеорологічного центру.

Дане дослідження виконувалося з метою обґрунтування розрахунковим шляхом можливості вирішення згаданих вище завдань методом радіометрії сантиметрового ДХ з урахуванням спостережуваного прогресу на сучасному етапі розвитку широкомасштабного промислового виробництва високочутливих приймальних пристроїв. Авторами представлено опис схемних і технічних рішень, а також зовнішній вигляд, створеної в ХАІ двочастотної радіометричної системи діапазону 1,5 см і 2,5 см. Основною перевагою описаної розробки є її бюджетна направленість, що дозволяє забезпечити високу флукуаційну чутливість радіометрів (краще 0,1-0,01 К) поряд з вкрай низькою собівартістю їх дрібносерійного виготовлення.

2. АПАРАТУРНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТОДУ РАДІОМЕТРІЇ І РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКОВИХ ОЦІНОК

Апаратно-методичне забезпечення методу радіометрії дає можливість отримувати дані про радіояскравісну температуру (T_b) атмосфери і потім відновлювати значення оптичної товщини атмосфери (τ) і повного вертикального поглинання радіохвиль. Обидві ці величини T_b і τ пов'язані добре відомим виразом для низхідного радіотеплового випромінювання атмосфери:

$$T_b = T_{eff}(1 - e^{-\tau \sec \theta}), \quad (1)$$

де T_{eff} – це ефективна температура атмосфери, θ – зенітний кут візування антени радіометра.

Знання величини повного вертикального поглинання радіохвиль на різних частотах дозволяє визначати різноманітні фізичні параметри атмосфери і деяких її складових [1,5]. Методи відно-

влення фізичних параметрів атмосфери за даними радіометрії в ММ ДХ досить добре розвинені і знайшли широке практичне застосування в світі за останні кілька десятиліть. На рис. 1 як приклад показаний фрагмент запису зміни радіояскравісної температури неба (T_b) в двох точках ММ ДХ (3 мм і 8 мм ДХ) при проходженні фронтальної зони хмарності над Харковом і результат синхронного відновлення значень ефективної температури (T) хмарного шару.

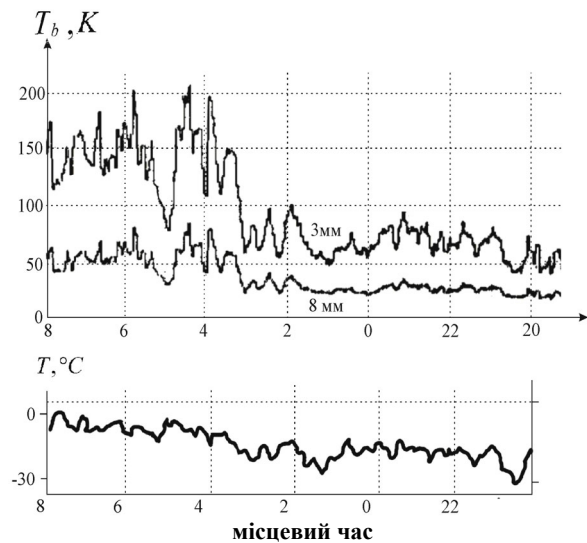


Рис.1 – Фрагмент запису зміни радіояскравісної температури неба (T_b) в 3 мм і 8 мм ДХ а) і відновлені значення ефективної температури хмарного шару (T) [5]

Fig. 1 – Fragment of recording of change of radio brightness temperature of the sky (T_b) in 3 mm and 8 mm wave range and the restored values of effective temperature of a cloud layer (T) [5]

Ряд нових технологічних можливостей у розвитку апаратного забезпечення радіометричних спостережень, що з'явився в останні роки, обумовлює можливість проведення деякого додаткового і повторного аналізу ситуації з метою техніко-економічної оптимізації апаратно-методичного забезпечення методу радіометрії.

Застосування останніх досягнень промислової електроніки дозволяє за допомогою широкодіапазонних елементів НВЧ техніки забезпечити чутливість радіометрів СМ ДХ в тисячні частки градуса Кельвіна (К). Ця обставина може зробити конкурентоспроможним широкомасштабне застосування змін радіометричних систем СМ ДХ по відношенню до їх аналогів в ММ ДХ, які вже добре зарекомендували себе на практиці. Широкомасштабне застосування таких систем в розгалужених мережах станцій Українського

гідрометеорологічного центру здатне сьогодні забезпечити безперервний контроль параметрів водності атмосфери в автономному режимі з передачею отриманих даних через Інтернет.

Процедура визначення фізичних параметрів

$$T_a = T_{eff}(1 - e^{-\tau \sec \theta})(1 - \beta)\mu + T_{bgr}\beta\mu + 2.7e^{-\tau \sec \theta}(1 - \beta)\mu + T_o(1 - \mu). \quad (2)$$

де T_{bgr} – усереднена величина радіояскравісної температури фону, що приймається поза основною пелюсткою діаграми спрямованості (ДС) антени радіометра, β – коефіцієнт розсіювання поза основною пелюсткою ДС антени, μ – к.к.д. антени.

б) визначення радіояскравісної температури атмосфери T_b в напрямку головної пелюстки ДС антени по вимірним значенням T_a з урахуванням вирізів (1) і (2);

в) визначення значень τ (непер) та повного вертикального ослаблення (дБ) на основі даних про T_b .

При вирішенні завдань ДЗ дані про значення τ (Непер) і α (дБ) = 4.343τ на різних частотах необхідні для вирішення системи рівнянь:

$$\alpha_{total}^{\lambda_i} = \alpha_{oxygen}^{\lambda_i} + \Phi_{\lambda_i}Q + k_{\lambda_i}(T_0)W, \quad (3)$$

де i – номер частотного діапазону, Q – відновлюване значення водозапасу атмосфери (пароподібна волога), W – відновлюване значення водозапасу атмосфери (крапельна волога) Φ_{λ_i} і $k_{\lambda_i}(T_0)$ – коефіцієнти питомого поглинання в пароподібній і крапельній волозі атмосфери відповідно.

Зрозуміло, що рішення таких систем рівнянь з двома змінними Q і W є більш прийнятним для випадків суттєвої різниці використовуваних частот, одна з яких більше схильна до впливу пароподібної вологи, а інша – впливу крапельної вологи атмосфери.

Для визначення найкращої пари частот для таких додатків ДЗ нами були розраховані [8] коефіцієнти лінійного поглинання в хмарах в залежності від їх температури для частот 4, 12, 20, 40 і 94 ГГц. Для розрахунку цих даних нами використовувалася відома модель MPM (Atmospheric Millimeter Waves Propagation Model) [9].

Частоти 40 і 94 ГГц вважаються традиційними в задачах ДЗ атмосфери. Включення в розгляд частот 4, 12, 20 ГГц пов'язано з розглядом можли-

вості побудови в цих діапазонах високочутливих і в той же час високобюджетних радіометрів, а також для аналізу їх придатності в задачах ДЗ. Наші розрахункові оцінки показали, що використання схем і елементів сучасних промислових приймачів супутникових телевізійних сигналів з показником шуму менше 1 дБ забезпечує принципову можливість для досягнення флюктуаційної чутливості радіометра в кілька тисячних часток К.

а) вимірювання антеною температури радіометра, яку можна представити як:

вості побудови в цих діапазонах високочутливих і в той же час високобюджетних радіометрів, а також для аналізу їх придатності в задачах ДЗ. Наші розрахункові оцінки показали, що використання схем і елементів сучасних промислових приймачів супутникових телевізійних сигналів з показником шуму менше 1 дБ забезпечує принципову можливість для досягнення флюктуаційної чутливості радіометра в кілька тисячних часток К.

На рис. 2 представлена залежність коефіцієнта питомого ослаблення α (дБ/кг/м²) в хмарних краплях при температурі крапель 0 °С від частоти f .

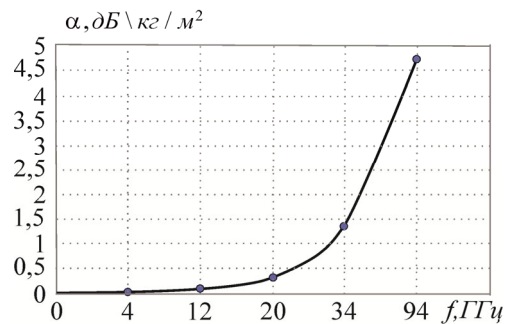


Рис.2 – Коефіцієнт питомого ослаблення в хмарних краплях α (дБ/кг/м²) в залежності від частоти f (4 ГГц, 12 ГГц, 20 ГГц, 40 ГГц і 94 ГГц) при температурі крапель 0 °С
Fig. 2 – Specific attenuation coefficient in cloud droplets α (dB \ kg / m²) as a function of frequency f (4 GHz, 12 GHz, 20 GHz, 40 GHz and 94 GHz) at a droplet temperature of 0 °С

Аналіз отриманих розрахунковим шляхом даних показав [8], що найбільш чутливим до зміни водозапасу хмарного покриву є радіометри діапазону 94 ГГц. При цьому, реакція радіометра діапазону 4 ГГц на зміни водозапасу хмар буде більш ніж на два порядки меншою, ніж в діапазоні 94 ГГц. Ця обставина змушує виключити можливість застосування С ДХ з подальшого розгляду в якості одного з робочих каналів. Реакція радіометра діапазону 12 ГГц на крапельну вологу хмар приблизно в 30 разів відрізняється від радіометрів, що працюють в діапазоні 94 ГГц. Однак, на наш погляд, використання діапазону 12 ГГц може бути конкурентоспроможним, оскільки в ньому є мож-

ливість відносно легко реалізувати приблизно в 10-30 разів більшу чутливість. Істотним, при практичній реалізації такого рішення, є також його бюджетний вигравш, що досягає декількох порядків в порівнянні з частотним діапазоном 94 ГГц. Радіометри, побудовані в інших розглянутих нами ДХ, будуть мати проміжні показники по комплексу розглянутих параметрів вартості, чутливості і реакції на зміну атмосферної крапельної вологи.

На рис. 3 наведені, отримані в роботі розрахункові значення (в разях), співвідношення між вираженими в дБ/км величинами погонного поглинання хмар $\gamma_1 \setminus \gamma_2$ від температури крапель для різних пар частот.

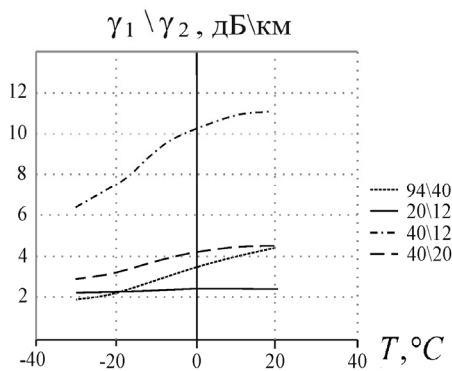


Рис.3 – Значення співвідношень (в разях) між величинами питомого поглинання в хмарах $\gamma_1 \setminus \gamma_2$ (дБ / км) для різних пар частот в залежності від температури крапель (T)
Fig. 3 – The value of the ratios (in times) between the values of specific absorption in the clouds $\gamma_1 \setminus \gamma_2$ (dB / km) for different frequency pairs depending on the temperature of the drops (T)

Звертає на себе увагу те, що температурна залежність коефіцієнтів погонного поглинання в краплях води досить істотна для всіх розглянутих частот, за винятком 94 ГГц. Ця обставина вказує на необхідність досить точного знання ефективної температури хмарного покриву при вирішенні задач відновлення процесів відновлення його водозапасу по радіометричним даним.

З результатів наших попередніх оцінок також випливає, що якщо для пар частот 40/12 ГГц, 94/12 ГГц і 94/40 ГГц така залежність яскраво виражена, то для пари частот 20/12 ГГц температурна залежність в розглянутих співвідношеннях відсутня. Ця виявлена закономірність практично важлива, оскільки дозволяє відновлювати значення водозапасу хмар в умовах відсутності даних про їх ефективну температуру по радіометричним даним 2-х каналів – 20 ГГц і 12 ГГц.

З урахуванням проведеного розгляду, а також наявності багаторазових відмінностей у впливі

пароподібної вологи на величину власного випромінювання нами була обрана пара частот 12 ГГц і 20 ГГц для реалізації вимірювальної системи, призначеної для дистанційного моніторингу атмосферної вологи.

Крім ясної чи хмарної атмосфери, в практиці дистанційного зондування, а також в сучасних і перспективних системах зв'язку, важливу і вимагаючу обліку роль відіграють дощі [10-11]. Результати визначення залежності атмосферного питомого ослаблення в дощі (γ) від інтенсивності дощу (R) для виділених вище п'яти частот, були проведені нами за допомогою моделі Лііба [9] (Рис.4).

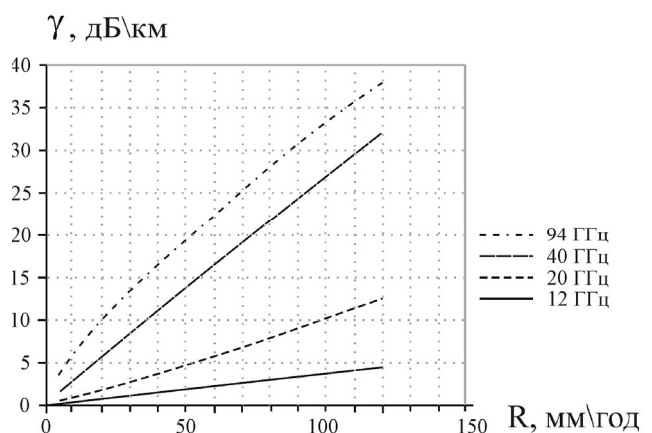


Рис.4 – Коефіцієнт питомого ослаблення в дощі γ (дБ / км) в залежності від його інтенсивності (R) для частот 12, 20, 40 і 94 ГГц
Fig. 4 – The coefficient of specific attenuation in the rain γ (dB / km) depending on its intensity (R) for the frequencies 12, 20, 40 and 94 GHz

Отримані дані вказують на безперспективність використання С ДХ (4 ГГц) через дуже мало впливу крапельної вологи на величину погонного поглинання атмосферою в цьому ДХ і підтверджують хороші перспективи застосування пари частот 12/20 ГГц для дистанційного моніторингу параметрів дощів і хмар методом радіометрії.

З графіка також видно, що кратність збільшення атмосферного загасання, викликаного зростанням інтенсивності дощу в СМ ДХ в 2-3 рази вище, ніж спостережуване зростання цього параметра в ММ ДХ. При цьому абсолютні значення погонного поглинання в діапазоні 20 ГГц можна вважати цілком прийнятними для їх вимірювання радіометричним методом і для подальшого відновлення висоти дощового шару за даними трьохчастотних вимірювань (наприклад, на частотах 12 ГГц, 20 ГГц з додатковим каналом 34 ГГц. Введення третього додаткового каналу

може розширити можливості атмосферного моніторингу, забезпечивши відновлення такого додаткового параметра, як висота дощового шару.

3. СХЕМНЕ РІШЕННЯ

Потенційну флуктуаційну чутливість радіометра можна представити у вигляді:

$$\delta T = kT_{ш} \sqrt{1/\tau \Delta\Phi}, \quad (4)$$

де $T_{ш}$ – шумова температура радіометра, $\Delta\Phi$ – частотна смуга пропускання, τ – постійна інтеграції радіометра, k – коефіцієнт, який враховує схемну будову радіометра (зазвичай змінюється від 1 до 3).

Приймальні системи радіометрів зазвичай прийнято будувати, використовуючи схеми прямого посилення, або супергетеродинні схеми, схеми повної потужності або модуляційні схеми.

Схеми прямого посилення забезпечують більшу смугу пропускання, а значить підвищену чутливість, що особливо важливо в задачах радіобачення. У завданнях ДЗ атмосфери надмірно широка смуга прийому (вище декількох ГГц) може погіршити точність відновлення фізичних параметрів атмосфери, через частотну залежність інтенсивності її випромінювання. Тому нами була обрана для реалізації схема радіометра з приймачем супергетеродинного типу.

Незважаючи на те, що потенційно досяжна чутливість у радіометрів повної потужності вдвічі краща, ніж у радіометрів модуляційного типу, все ж до останнього часу найбільш широке застосування знаходили саме радіометри модуляційного типу. Такі схеми дозволяли компенсувати негативний вплив нестабільності коефіцієнта передачі трактів на чутливість радіометра. До додаткових недоліків класичної схеми найбільш поширеного модуляційного типу радіометрів можна також віднести наявність модулятора, що приводить до втрат половини потужності корисного сигналу і який має власні шуми і втрати, наявність розв'язуючого вентиля, що вносить додаткові втрати і шум, а також розташування АЦП в кінці тракту радіометра.

При проектуванні і побудові сучасних радіометрів має сенс звертати увагу на останні досягнення в області схемотехнічних і технологічних рішень радіоелектроніки, які спрямовані на стабілізацію коефіцієнта підсилення і зсувів нульового рівня приймальних пристроїв. Адже при прийнятних значеннях цих параметрів в практично ре-

лізованих схемах з'являється можливість спростити схему радіометра, перейшовши до реалізації радіометра повної потужності. Така спроба була нами зроблена в цій роботі. Крім того, останні досягнення радіоелектроніки, які засновані на використанні арсенід-галієвих технологій дозволили створити недорогі надмалощумлячі транзисторні підсилювачі з шумовими температурами всього лише в кілька десятків К аж до Ku діапазону хвиль [12]. Такий стан справ визначає доцільність використання МШП шляхом його розміщення у вхідних ланцюгах будь-якої схеми радіометра.

Застосування цифрових методів післядетекторної обробки дозволяє зменшувати в рази похибки вимірювання шумової температури, що викликані дрейфом вихідного нульового рівня СВЧ-радіометра, нелінійністю, температурною і часовою нестабільністю коефіцієнта передачі приймального тракту радіометра [13-14].

Застосування гнучких алгоритмів цифрової попередньої обробки особливо актуально в бортових скануючих радіометричних системах, де час переміщення променя на величину ширини діаграми спрямованості (ДС) становить одиниці мілісекунд. У них використання звичайних аналогових вузькосмугових фільтрів і синхронних детекторів з фіксованою не оптимально великою постійною часу призведе до додаткових помилок вимірювання швидко змінної на виході антени шумової температури і зниження просторового дозволу. При занадто малих значеннях постійної часу інтегрування не виправдано знижується чутливість радіометра.

Спільний аналіз такої класичної схеми побудови та сучасного стану елементної бази показує можливість створення в діапазоні хвиль вище 1 см високочутливих радіометричних систем повної потужності на основі промислових ТВ конверторів, шумові температури яких знаходяться в межах декількох десятків К. Такий низький рівень шуму приймачів потенційно дозволяє забезпечити чутливість радіометрів в тисячні частки К. Використовувані в них схемні і конструктивні рішення спрямовані на зниження впливу флуктуацій температури на коефіцієнт передачі тракту також дозволяє сподіватися на можливість реалізації схеми повної потужності і зниження ефектів плаваючого нуля. А додаткове використання прийомів термостабілізації приймачів має забезпечити більш повну реалізацію потенційних можливостей таких радіометрів.

Цей підхід був покладений нами в основу побудови двочастотної радіометричної системи діапазону 12\20 ГГц. В основі представленої на

рис. 5 схеми побудови обох радіометрів були використані елементи схем побутових ТВ конверторів з лінійною (12 ГГц) і круговою (20 ГГц) поляризацією, відповідно китайських і ірландських виробників.

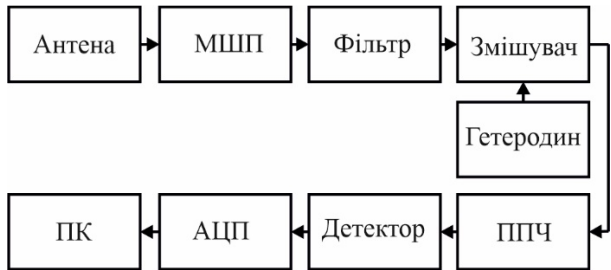


Рис.5 – Схема побудови радіометрів діапазону 12ГГц і 20ГГц
Fig. 5 – The scheme of construction of radiometers in the range of 12GHz and 20GHz



Рис.6 – Зовнішній вигляд побудованої в ХАІ радіометричної системи діапазонів 12 ГГц і 20 ГГц (верхня антена)
Fig. 6 – Appearance of the 12 GHz and 20 GHz (upper antenna) radiometric system built in KNAI

На рис. 6 показаний зовнішній вигляд розробленого блоку радіометрів діапазону 12 ГГц і 20 ГГц. На рис. 7 показані фрагменти запису вихідного сигналу радіометра U (мкВ) для рівня, прийнятого від узгодженого навантаження, сигналу (відліки 0-200) і сигналу від неба (відліки 200-800) в процесі калібрування радіометра діапазону 12 ГГц (а), а також збільшений масштаб фрагмента запису шумової доріжки сигналу від зенітного напрямку неба (б). Аналогічні приклади фрагментів записів, отриманих в діапазоні 20 ГГц (відліки сигналу 0-33 отримані від узгодженого навантаження, а відліки сигналу U (мкВ) 35-60 від зенітної області неба) представлені на рис.8.

Виміряна в лабораторії чутливість радіометра діапазону 12 ГГц склала 0.022К, радіометра діапазону 20 ГГц – 0.12К [14], що є цілком прийнятним результатом для практичних застосувань в задачах ДЗ атмосфери. При цьому корисно мати на увазі, що оцінена за формулою 4 (для парамет-

рів елементів схеми, використаних при побудові радіометрів) потенційно досяжна чутливість радіометра в кілька разів краща реально вимірюваної нами.

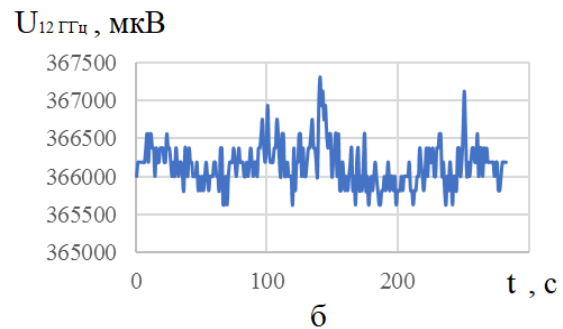
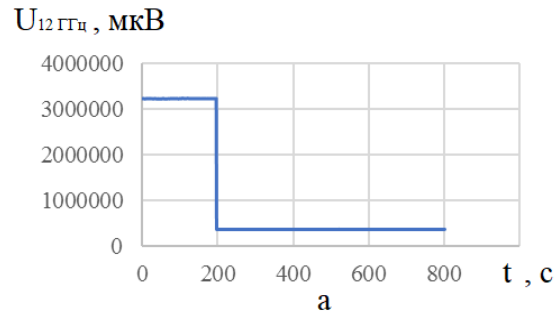


Рис.7 – Фрагменти запису вихідного рівня сигналу U (мкВ) в процесі калібрування радіометра діапазону 12 ГГц (а) і сигналу U (мкВ) від зенітного напрямку неба (б)
Fig. 7 – Fragments of recording the output level of the signal U (μV) during the calibration of the radiometer in the range of 12 GHz (а) and the signal U (μV) from the zenith direction of the sky (b)

Ця обставина, дозволяє розраховувати, в разі необхідності, на потенційну можливість досягнення ще кращих практичних результатів шляхом прийняття спеціальних заходів по термостабілізації побудованих радіометрів і за рахунок використання спеціальних гнучких процедур і алгоритмів обробки сигналів. Такі заходи, ймовірно, дозволять знизити негативний вплив часових перепадів температури на стабільність підсилення і часовий «дрейф нуля».

На рис. 9 показаний приклад практичного застосування розробленого двочастотного блоку радіометра. Представлені на рисунку результати вимірювання інтенсивності радіотеплового випромінювання атмосфери в напрямку 60 кутових градусів від зеніту були отримані над Харковом 26 січня 2021 року протягом півдоби в автоматичному режимі. Добре видно варіації вихідних сигналів радіометрів, викликані варіаціями загального вмісту рідкокрапельної і пароподібної атмосферної вологи при проходженні невеликого теплового атмосферного фронту над вимірювальним пунктом. Така яскраво виражена в обох ка-

налах радіометрів діапазону 12 ГГц і 20 ГГц реакція на загальний вміст атмосферної вологи дає можливість визначення в реальному масштабі часу значень водо- і волого запасу хмарного покриву.

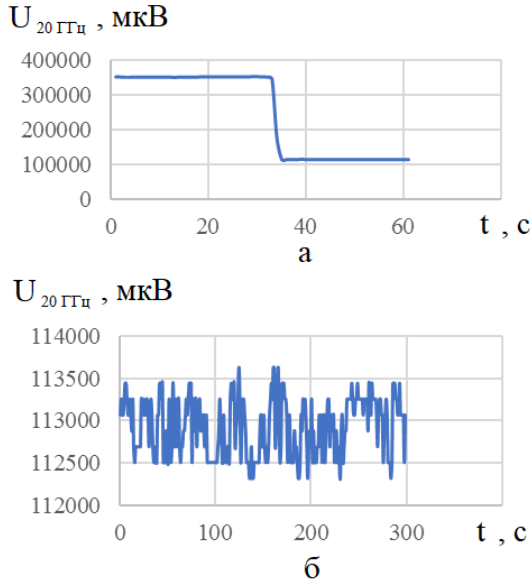


Рис.8 – Фрагменти запису вихідного рівня сигналу U (мкВ) в процесі калібрування радіометра діапазону 20 ГГц (а) і сигналу U (мкВ) від зенітного напрямку неба (б)
Fig. 8 – Fragments of recording the output level of the signal U (μV) during the calibration of the radiometer in the range of 20 GHz (a) and the signal U (μV) from the zenith direction of the sky (b)

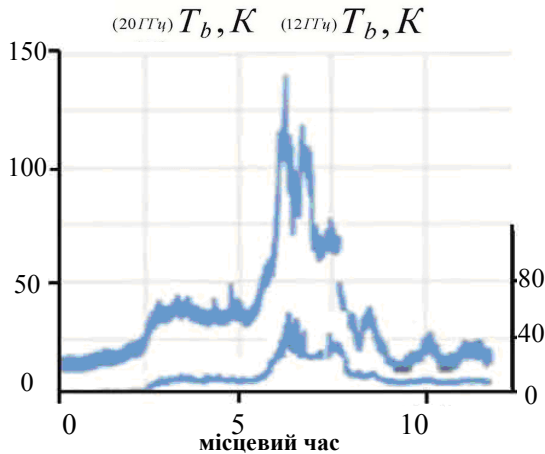


Рис.9 – Фрагмент запису радіояркістних температур атмосфери (T_b) радіометрами діапазону 12 ГГц (нижня крива) і 20 ГГц (верхня крива) в процесі проходження фронтальної зони хмарності (ніч-ранок 26.01.2021) над вимірювальним пунктом
Fig. 9 – A fragment of the recording of radio brightness atmospheric temperatures (T_b) by radiometers in the range of 12 GHz (lower curve) and 20 GHz (upper curve) in the process of passing the frontal cloud zone (night-morning 26.01.2021) above the measuring point

4. ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень обґрунтована можливість широкомасштабного вирішення актуальних для метеорології завдань безперервного моніторингу параметрів атмосферної вологи методом радіометрії сантиметрового ДХ на території України. Представлено опис схемних і технічних рішень, а також зовнішній вигляд двочастотної радіометричної системи діапазону 1,5 см і 2,5 см, створеної в ХАІ на основі легко доступної сучасної елементної бази. Показана бюджетна спрямованість розробки, що потенційно дозволяє забезпечити чутливість радіометрів краще 0.01К при забезпеченні собівартості дрібносерійного виробництва радіотехнічної частини співставною з вартістю ТВ конверторів, що широко розповсюджені в побуті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Радиолокация и метеорология / Степаненко В. Д., Щукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю. Ленинград : Гидрометиздат, 1987. 283 с.
2. Microwave radiometric technique to retrieve vapor, liquid and ice. Part I. Development of a Neural Network-Based Inversion Method / Li L. et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1997. 35. Pp. 224-236.
3. On the use of ground-based multi-frequency microwave radiometry for precipitation and radio-propagation parameter retrieval / Marzano F. S. et al. *Atti Fond. G. Ronchi*. 2001. 56. Pp. 1027-1037
4. Löhnert U., Crewell S. Accuracy of cloud liquid water path from ground-based microwave radiometry. Part I. Dependency on Cloud model statistics. *Radio Science*. 2003. 38(3). Art. no 8041
5. Ruzhentsev N. V. Peculiarities of vertical atmosphere absorption in the millimeter wave band. *Radio Science*. 2003. 38. Pp. 8-1 – 8-7
6. Ruzhentsev N. V., Kuzmenko Yu. A., Bakhanov V. P. Monitoring of atmospheric moisture and water content by the method of two-frequency radiometer of mm-waveband. *Proc. of the URSI Commission – F Triennial Open Symposium "Wave Propagation and Remote Sensing"*, 20-24 November. Ahmadabad, India, 1995. Pp. 123-126
7. Ruzhentsev N. V. The peculiarities of vertical atmosphere absorption from radiometer data at millimeter waves band. *Abstracts of Int. Specialist Meeting on Microwave Remote Sensing*, NOAA, 5-9 November. Boulder, Colorado USA, 2001. Pp. 101-102.
8. Аппаратурно-методическое обеспечение научно-прикладной радиометрии атмосферы / Волосюк В. К., Жила С. С., Собколов А. Д. и др. *Радиотехника. Всеукраїнський міжведомствений науково-технічний збірник*. 2019. Вып. 196. С. 5-21. ISSN

0485-8972

9. Liebe H. J. MPM — an atmospheric millimeter waves propagation model. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1989. 10(6). Pp. 631-650.
10. Peculiarities of Microwaves Attenuation Statistics for Ukrainian Region / Merzlikin A. A., Pavlikov V. V., Ruzhentsev N. V. et al. *IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, 21-25 September. Kharkiv, Ukraine. 2020. Pp.761-764.
11. Визначення характеристик готовності та пропускної здатності каналів зв'язку міліметрового діапазону хвиль / Мерзликін А. А., Сальников Д. С., Битченко А. Н. и др. *Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник "радіотехніка"*. 2019. 4(199). С. 45-53.
12. UAV Target Detection Using Radiometers of X, K, Ka and W bands / Ruzhentsev N. V. et al. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2020. 79(17). Pp. 1489-1512.
13. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стэмповский В. Г. Система мониторинга тропосферных параметров на основе радиометра водяного пара. *Труды ИПА РАН*. 2013. Вып. 27. С. 204–209.
14. Шум вида 1/f в радиометре полной мощности / Цыбулев П. Г., Дугин М. В., Берлин А. Б. и др. *Астрофизический бюллетень*. 2014. 69(2). С. 256-262.

REFERENCES

1. Stepanenko, V.D. et al. (1987). *Radiolokatsiya i meteorologiya [Radar and meteorology]*. Leningrad: Gidrometizdat. (in Russ).
2. Li, L. et al. (1997). Microwave radiometric technique to retrieve vapor, liquid and ice. Part I. Development of a neural network-based inversion method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, pp. 224-236.
3. Marzano, F.S. et al. (2001). On the use of ground-based multi-frequency microwave radiometry for precipitation and radio-propagation parameter retrieval. *Atti Fond. G. Ronchi*, 56, pp. 1027-1037.
4. Löhnert, U & Crewell, S. (2003). Accuracy of cloud liquid water path from ground-based microwave radiometry. Part I. Dependency on Cloud model statistics. *Radio Science*, 38(3), art. no 8041.
5. Ruzhentsev, N.V. (2003). Peculiarities of vertical atmosphere absorption in the millimeter wave band. *Radio Science*, 38, pp. 8-1 – 8-7.
6. Ruzhentsev, N.V., Kuzmenko, Yu.A. & Bakhanov, V.P. (1995). Monitoring of atmospheric moisture and water

- contant by the method of two-frequency radiometer of mm-waveband. *Proc. Of the URSI Commission – F Triennial Open Symposium "Wave Propagation and Remote Sensing"*, 20-24 November. Ahmadabad, India, pp. 123-126
7. Ruzhentsev, N.V. (2001). The peculiarities of vertical atmosphere absorption from radiometer data at millimeter waves band. *Abstracts of Int. Specialist Meeting on Microwave Remote Sensing*, NOAA, 5-9 November. Boulder, Colorado USA, pp 101-102.
8. Volosyuk, V.K., Zhila, S.S., Sobkolov, A.D. et al. (2019). Apparurno-metodicheskoe obespechenie nauchno-prikladnoy radiometrii atmosfery [Hardware and Methodological Support of Scientific and Applied Radiometry of the Atmosphere]. *Radiotekhnika. Vseukrainskiy mezhvedomstvennyy nauchno-tehnicheskii sbornik [Radiotechnique. All-Ukrainian interdepartment scientific and technical collection]*, 196, pp. 5-21. (in Russ).
9. Liebe, H.J. (1989). MPM — an atmospheric millimeter waves propagation model. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 10(6), pp. 631-650.
10. Merzlikin, A.A., Pavlikov, V.V., Ruzhentsev N.V. et al. (2020). Peculiarities of Microwaves Attenuation Statistics for Ukrainian Region. *IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, 21-25 September. Kharkiv, Ukraine, pp.761-764
11. Merzlikin, A.A., Sal'nikov, D.S., Bitchenko, A.N. et al. (2019). Vyznachennia kharakterystyk hotovnosti ta propusknoi zdatnosti kanaliv zviazku milimetrovoho diapazonu khvyl [Determining the characteristics of readiness and bandwidth of communication channels of the millimeter wave range]. *Vseukrainskiy mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk "Radiotekhnika" [All-ukrainian interdepartment scientific and technical journal "Radiotekhnika"]*, 4(199), pp. 45-53 (in Ukr).
12. Ruzhentsev, N.V., Volosyuk, V.K., Pavlikov, V.V. et al. (2020). UAV target detection using radiometers of X, K, Ka and W bands. *Telecommunications and Radio Engineering*, 79(17), pp 1489-1512.
13. Il'in, G.N., Bykov, V.Yu. & Stempkovskiy, V.G. (2013). Sistema monitoringa troposfernykh parametrov na osnove radiometra vodyanogo para [Tropospheric monitoring system based on water vapor radiometer]. *Trudy IPA RAN [Proceedings of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences]*, 27, pp 204–209. (in Russ).
14. Cybulev, P.G., Dugin, M.V., Berlin A.B. et al. (2014). Shum vida 1/f v radiometre polnoy moshchnosti [1 / f noise in full power radiometer]. *Astrofizicheskiy byulleten' [Astrophysical Bulletin]*, 69(2), pp. 256-262. (in Russ).

COST EFFECTIVE METER OF MOISTURE INTEGRAL PARAMETERS OF THE ATMOSPHERIC COLUMN

N. V. Ruzhentsev¹, S. S. Zhyla², V. V. Pavlikov³,
V. V. Kosharsky⁴, G. S. Cherepnin⁵

National M.E.Zhukovsky Aerospace University
«Kharkiv Aviation Institute»

17, Chkalov St, 61000 Kharkiv, Ukraine,

¹nvruzh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3023-4927>,
²simeon.zhyla@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2989-8988>,
³v.pavlikov@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0002-6370-1758>,
⁴v.kosharsky@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0002-8569-2047>,
⁵g.cherepnin@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0003-1245-0933>

Continuous remote monitoring of the atmospheric physical parameters is an urgent task for solving the issues related to meteorology, climatology, artificial influence on clouds, studying the physical parameters of cloud cover etc. In the developed countries such issues are solved using science-driven technologies of millimeter wave range radiometry. They allow, in particular, quick restoration of the values of total content and effective temperature of droplet and vaporous moisture in the atmospheric column, and distinguishing the areas with crystalline, droplet or vaporous water phases.

This work aims at substantiating, by calculation and experiment, the possibility of large-scale solving the problems of continuous remote monitoring of the studied atmospheric moisture parameters using the method of centimetre wavelength range radiometry. To determine the best pair of frequencies for restoring the atmospheric moisture parameters based on radiometric data of remote sensing the linear absorption coefficients were calculated for clear atmosphere, for cloudy atmosphere depending on the temperature of drops and for rainfalls of various intensities for 4, 12, 20, 40 and 94 GHz frequencies. In order to calculate these data, we used a well-known MPM model (Atmospheric Millimeter-Wave Propagation Model). At the same time, calculation of the altitude profiles of the atmospheric meteorological parameters was carried out based on the ERA-15 model.

Comparison of the data obtained by calculation, taking into account the progress of the technical parameters of the serial element base, indicated a possibility of solving the above problems in the centimetre wavelength as well. The research presents a description of the diagram and technical solutions, as well as the appearance of a two-frequency radiometric system with 1.5 cm and 2.5 cm ranges created at the National Aerospace University (KhAI) on the basis of an easily accessible modern element base and full-scale tests' results. The budget-friendly focus of the described product allows for radiophysical measurement with a sensitivity of radiometers exceeding 0.01 K while ensuring the cost of small-scale production of the radio technical part of the system, comparable to the cost of TV converters commonly used in everyday life.

Keywords: brightness (radiance) temperature; radiometer; sensitivity; wave range

БЮДЖЕТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛАГИ В СТОЛБЕ АТМОСФЕРЫ

Н. В. Руженцев¹, С. С. Жила², В. В. Павликов³,
В. В. Кошарский⁴, Г. С. Черепнин⁵

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»,
ул. Чкалова, 17, 61000, Харьков, Украина,

¹nvruzh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3023-4927>,
²simeon.zhyla@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2989-8988>,
³v.pavlikov@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0002-6370-1758>,
⁴v.kosharsky@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0002-8569-2047>,
⁵g.cherepnin@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0003-1245-0933>

Непрерывный дистанционный мониторинг физических параметров атмосферы является актуальной задачей при решении вопросов метеорологии, климатологии, искусственного

воздействия на облака, при исследованиях физики облачного покрова и т. д. В развитых странах мира для решения этих вопросов принято использовать наукоемкие технологии радиометрии миллиметрового диапазона волн (ММ ДВ). Они позволяют, в частности, оперативно восстанавливать значения общего содержания и эффективной температуры капельной и парообразной влаги в атмосферном столбе, различать области с кристаллической, капельной или парообразной фазами воды.

В данной работе расчетным и экспериментальным путем обоснована возможность широкомасштабного решения задач непрерывного дистанционного мониторинга этих параметров атмосферной влаги методом радиометрии сантиметрового диапазона волн (СМ ДВ). Для определения лучшей пары частот для восстановления параметров атмосферной влаги по радиометрическим данным дистанционного зондирования были рассчитаны коэффициенты линейного поглощения для ясной атмосферы, для облаков в зависимости от температуры капель и в дождях различной интенсивности для частот 4, 12, 20, 40 и 94 ГГц. Для расчета этих данных нами использовалась известная модель MPM (Atmospheric Millimeter Waves Propagation Model). При этом, расчет высотных профилей метеорологических параметров атмосферы был проведен на основе модели ЭРА-15.

Возможность решения указанных выше задач в СМ ДВ была показана путем сопоставления полученных расчетным путем данных с учетом прогресса технических параметров серийной элементной базы. Представлено описание схемных и технических решений, а также внешний вид двухчастотной радиометрической системы диапазона 1,5 см и 2,5 см, созданной в Национальном аэрокосмическом университете (ХАИ) на основе легко доступной современной элементной базы и результатов натурных тестовых испытаний. Бюджетная направленность описанной разработки позволяет обеспечить радиофизические измерения с чувствительностью радиометров лучше 0.01 К при обеспечении себестоимости мелкосерийного производства радиотехнической части системы, сопоставимой со стоимостью широко распространенных в быту ТВ конверторов.

Ключевые слова: радиояркость температура; радиометр; чувствительность; диапазон волн

*Подання до редакції : 06. 06. 2021
Надходження остаточної версії : 16. 06. 2021
Публікація статті : 30. 06. 2021*