

DOI: 10.18372/2310-5461.68.20736

УДК 551.508.4:621.396.96-52:621.317.39(045)

Ф. Й. Яновський, д-р техн. наук, проф.
Делфтський технічний університет, Нідерланди
<https://orcid.org/0000-0002-9529-5969>
email: xilef6019@gmail.com;

О. А. Пітерцев, канд. техн. наук
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
<https://orcid.org/0000-0001-7225-0867>
email: oleksandr.pitertsev@npp.nau.edu.ua

ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРШИЙ ДОСВІД КАЛІБРУВАННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ РАДІОЛОКАТОРІВ W-ДІАПАЗОНУ ЗА ДАНИМИ ЛАЗЕРНОГО ДІСДРОМЕТРА

Вступ

Проблема калібрування метеорологічних радіолокаторів виникла одразу, коли тільки почалися перші спроби кількісних вимірювань у радіолокаційній метеорології. Калібрування метеорологічних радарів залишається значною проблемою в радіолокаційній метеорології, коли йдеться про кількісні вимірювання. Хоча традиційні методи добре зарекомендували себе для радарів, що працюють на сантиметрових довжинах хвиль, поява хмарних радарів міліметрового діапазону, особливо на частотах W-діапазону створює унікальні проблеми для калібрування

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Першими робочими інструментами в радіолокаційній метеорології були радари S-діапазону [1]. Більше того, вони і досі широко використовуються на практиці [2]. Пізніше почали використовувати також радари C-діапазону, а потім були досліджені та впроваджені радари X-діапазону, особливо в деяких системах з двома довжинами хвиль. Більше того, X-діапазон став основним і стандартним діапазоном частот для бортових (літакових) метеорологічних радіолокаторів [3]. Радіолокаційні системи міліметрового діапазону, спочатку з довжиною хвилі 8 мм, а пізніше і 3 мм (W-діапазон), спочатку лише тестувалися як експериментальні прилади для зондування атмосфери. Оперативне застосування їх було щонайменше складним через сильне затухання хвиль, особливо під час опадів, а також через суттєві технологічні проблеми під час генерації та обробки таких високих частот.

Однак, будь-який недолік має й зворотний бік. В даному випадку сильне розсіювання і поглинання міліметрових хвиль дуже малими частинками в атмосфері робить міліметрові радари привабливими інструментами для вивчення хмар, які слабо відбивають сигнали нижчих частот.

На щастя, технологічний прогрес останніх років надав потужний поштовх появі робочих радіолокаційних систем, що працюють на хвилях з частотою 35 ГГц і навіть 94 ГГц, тобто у W-діапазоні [4]. Часто такі радари, що використовуються для дистанційного зондування атмосфери, називають хмарними радарями, підкреслюючи, що їх основними об'єктами спостереження є хмари, на відміну від опадів, зокрема дощів, які є традиційними об'єктами спостереження метеорологічними радіолокаторами S, C та X діапазонів хвиль.

Хмарні радари відрізняються від метеорологічних радарів сантиметрового діапазону суттєво різними моделями розсіювання, поглинання та інших ефектів, що виникають під час поширення в атмосфері. Більше того, чим вища робоча частота, тим більші ці відмінності. Це призводить до того, що методи калібрування, розроблені для радарів X-діапазону, а також для більш низькочастотних діапазонів, не є придатними для застосування у W-діапазоні.

Постановка проблеми

Маючи значну кількість даних вимірювань хмарними радарями на частоті 94 ГГц, а також вимірювань, отриманих за допомогою інших приладів, що стали доступними для аналізу як результат роботи одного з авторів (ФЯ) у Делфтському технічному університеті (Нідерланди) в рамках реалізації права на академічну мобільність, ми зосереджуємося на особливостях калібрування хмарних радарів W-діапазону. Це є найкоротший з усіх міліметрових діапазонів хвиль, який сьогодні починає використовуватися на практиці, що робить це дослідження дуже актуальним.

Таким чином, зважаючи на те, що традиційні методи калібрування метеорологічних радарів не є

придатними для калібрування радарів діапазону W, у цій статті ми аналізуємо особливості хмарних радарів та можливі способи їх калібрування, а також розробляємо методологічні інструменти і програмне забезпечення для обробки сигналів та даних багато-інструментальних вимірювань, щоб забезпечити абсолютне калібрування метеорологічних радарів діапазону W.

Відомі методи калібрування метеорадарів

Абсолютне калібрування радара є важливим для кількісного застосування радіолокаційних вимірювань, таких як оцінка інтенсивності опадів або небезпеки метеорологічних утворень для польотів літаків. Сучасні поляриметричні радари вимірюють багато різних параметрів, але найважливішою характеристикою для абсолютного калібрування є радіолокаційна відбивна здатність метеорологічного об'єкта Z , яку частіше називають просто радіолокаційна відбивність [2]. Точна оцінка Z сама по собі важлива для метеорології, і, крім того, вона сильно впливає на вимірювання деяких інших параметрів. За певних умов Z може бути пов'язана з мікроструктурою метеорологічного об'єкта в об'ємі роздільної здатності радара. З рівняння радара для метеорологічних об'єктів випливає, що прийнята потужність P_r відбитого сигналу, усереднена по вибірці, пропорційна радіолокаційній відбивності Z :

$$\bar{P}_r = \frac{C_z Z}{R^2} \cdot |K|^2, \quad (1)$$

де R – відстань до відбивного об'єму, $|K|^2$ – коефіцієнт, що залежить від комплексної діелектричної проникності відбиваючої речовини (для води дорівнює $|K|^2 \approx 0,93$), а C_z – розмірний коефіцієнт, що залежить від параметрів радара та різних видів втрат:

$$C_z = f(P_t, G_A, S_{r \min}, f_0, L_1 \dots L_n, \dots), \quad (2)$$

де P_t – потужність передавача, G_A – коефіцієнт підсилення антени, $S_{r \min}$ – чутливість приймача, f_0 – несна частота, $L_1 \dots L_n$ – різноманітні втрати.

З рівнянь (1) і (2) видно, що вимірюючи відбиту потужність, можна оцінити радіолокаційну відбивність Z , якщо коефіцієнт $C_z = const$ відомий. Саме калібрування має забезпечувати цю умову. Внутрішнє калібрування передбачає використання тестового сигналу, який циркулює в системі для підтримки критичних параметрів у належних межах. Це завдання розробників радарів.

Нашим же завданням є зовнішнє калібрування, яке охоплює повний цикл приймання відбитого сигналу, включаючи формування зондувального сигналу, поширення в атмосфері та приймальний канал.

Історично, першим методом калібрування є калібрування за допомогою еталонної цілі. Абсолютне калібрування на стандартній цілі шляхом вимірювання похилої дальності та потужності відбитого сигналу від стабільної цілі з відомою ефективною площею розсіювання (ЕПР) здатне охопити всі параметри тракту передавач-середовище-приймач і є досить точним. Недоліками його є трудомісткість процедури та тривалість процесу калібрування. Такі вимірювання складно організувати: потрібний пілотний аеростат з лебідкою або БПЛА з системою керування, GPS та засобами зв'язку [5].

Інший підхід – це калібрування з використанням дощового середовища. Основна ідея полягає в порівнянні вимірювання дощу за допомогою радара та інших, нерадіолокаційних засобів, таких як опадоміри, метеорологічні станції або дісдрометри. Цей підхід має багато розгалужень, наприклад [6], [7]. Деякі з них отримали значний розвиток, особливо з появою багатопараметричних поляризаційних радарів. Одним з цікавих підходів є абсолютне калібрування багатопараметричного метеорологічного радара з використанням самоузгодженості параметрів [8]. Сучасні метеорологічні радари є переважно когерентними та поляриметричними, тобто багатопараметричними системами. Серед різних параметрів радара є три наступні:

1) радіолокаційна відбивність на певній поляризації, наприклад, $Z = Z_H$, де індекс H означає горизонтальну лінійну поляризацію для визначеності;

2) диференціальна відбивність $Z_{DR} = 0 \lg(Z_H/Z_V)$, де індекс V означає ортогональну поляризацію, тобто вертикальну в даному випадку;

3) питома диференціальна фаза $K_{DP} = [P_{DP}(R_2) - P_{DP}(R_1)] / (R_2 - R_1)$, де $P_{DP}(R)$ є різниця фаз між горизонтально і вертикально поляризованими хвилями на відстані R ($R_2 > R_1$).

Теоретичний аналіз та натурні радіолокаційні спостереження за опадами показують, що результати вимірювань цих трьох параметрів не є повністю незалежними, а знаходяться в обмеженому тривимірному просторі [9], а точніше:

$$K_{DP}^* = CZ_H^\alpha 10^{-\beta Z_{DR}} \quad (3)$$

де зірочка означає розраховану оцінку K_{DP} з використанням вимірюваних значень двох інших параметрів. Тут Z_H вимірюється у $[\text{mm}^6/\text{m}^3]$, а Z_{DR} у [dB]. Емпіричні коефіцієнти C , α та β змінюються залежно від частоти та добре визначені принаймні для S- та C-діапазонів.

Цю самоузгодженість (3) можна використовувати для визначення похибок калібрування шляхом порівняння вимірюваного K_{DP} з розрахованим. За відсутності похибок вимірювання діаграма розсіювання вимірюваного та розрахованого повинна лежати приблизно на прямій лінії 1:1. Якщо радіоло-

каційні канали не збалансовані, діаграма розсіювання відхиляється від лінії 1:1, а її нахил вказує на величину зміщення під час абсолютного калібрування.

Очевидний факт, що Z_{DR} має бути 0 дБ при зондуванні в zenit у дощовому середовищі (внаслідок того, що проєкція краплі за цих умов є колом), додатково використовується для балансування поляризаційних каналів. Усереднення при цьому забезпечується обертанням антени навколо вертикальної осі від 0 до 360° з підтриманням кута місця 90°. Після такого усереднення будь-яке ненульове усереднене Z_{DR} безпосередньо вказує на асиметрію двох поляризаційних каналів.

Навіть випромінювання Сонця є корисним для калібрування [10]. Сонячне радіотеплове випромінювання може бути використане для контролю налаштування антени радара та стабільності приймача. Калібрування приймального тракту можна перевірити, порівнявши дані радара зі спостереженнями станції моніторингу сонячного потоку. Крім того, потужність шуму Сонця при горизонтальній та вертикальній поляризації еквівалентна. Це також можна використовувати для калібрування Z_{DR} .

Зрештою, комбіновані методи калібрування поляриметричних метеорологічних радарів можуть також бути доцільними. Наприклад, поєднання методу самоузгодженості (у разі дощу) та наземного пасивного моніторингу пасивних завод (за будь-якої погоди) та їх взаємне порівняння для моніторингу в режимі реального часу може доповнити обмеження кожного з них [11].

Таким чином, існують різноманітні підходи до калібрування. Питання полягає в тому, які підходи можуть стати в нагоді для калібрування радіолокаторів міліметрового діапазону, зокрема 94 ГГц. Щоби це з'ясувати, розглянемо особливості таких хмарних радарів.

Проблеми калібрування міліметрових метеорологічних радарів

Хмарні радари міліметрових діапазонів (або просто хмарні радари) – це радіолокаційні системи, придатні для моніторингу хмарності. Вони працюють у діапазоні частот від 24 до 110 ГГц, а найпоширеніші – близько 35 ГГц (Ka-діапазон) та 94 ГГц (W-діапазон). Довжина хвилі таких радарів в 10–30 разів коротша, ніж у X- та S-діапазонів.

Делікатна природа електронних компонентів мм-діапазону та суворі умови, в яких працюють метеорологічні радари, можуть призводити до неконтрольованих змін параметрів навіть частіше, ніж у радарів S-, C- та X-діапазонів. Саме

тому калібрування є особливо важливим питанням у випадку мм-радарів для надійного отримання параметрів метеорологічних об'єктів з необхідною точністю.

Виникає питання: чи можна використовувати методи калібрування, розроблені для радарів S-, C- та/або X-діапазонів, для калібрування радарів W-діапазону? Очевидно, що слід враховувати відомі методи, але треба взяти до уваги, що існує суттєва різниця в процесах розсіяння та поширення електромагнітного випромінювання. Це призводить до того, що в деяких випадках відомі методи стають непридатними для W-діапазону.

Основні особливості радарів W-діапазону порівняно з радаром більш низьких частот, які, на наш погляд, необхідно враховувати в контексті абсолютного калібрування, полягають в наступному:

- затухання набагато сильніше;
- модель релєївського розсіяння не можна застосовувати, оскільки довжина хвилі та розміри крапель є одного порядку;
- компоненти радара можуть неконтрольовано змінювати характеристики більшою мірою;
- чутливість до температури більш виражена;
- антени та обтічники повинні бути захищені від води;
- диференціальна відбиваність Z_{DR} у діапазоні W зазвичай суттєво менша, ніж у діапазоні X для дощу;
- оцінка питомої диференціального фазового зсуву K_{DP} стає складнішою у W-діапазоні.

Цілком логічним є припустити, що ці особливості можуть бути не лише джерелами проблем, а й спонукати нас до нових інженерних та технологічних рішень.

Вимірювальні засоби та доступні дані

Дослідники, студенти й викладачі Делфтського технічного університету мають доступ до виняткової експериментальної бази для досліджень у галузі радіолокаційної метеорології. Вона включає: радари S- та X-діапазонів, а також метеостанцію на даху 21-поверхового будинку факультету електротехніки, математики та інформатики; радари X- та W-діапазонів, радіометри та метеостанції на дослідницькому та навчальному майданчику кафедри наук про Землю та дистанційного зондування в кампусі університету; великий метеорологічний дослідницький полігон в районі Утрехта в центрі Нідерландів, де встановлено різноманітне обладнання для дистанційного зондування атмосфери, включаючи 213-метрову метеорологічну вежу, обладнану різними приладами. Цей дослідницький

майданчик є основною частиною обсерваторії Ruisdael, яка в рамках національної ініціативи є загальнонаціональною обсерваторією для вимірювань атмосфери в Нідерландах.

У цьому дослідженні як ключові джерела даних були обрані хмарний радар W -діапазону, метеорологічна станція і лазерна дісдрометрична система. Радар та дісдрометр розташовані на відстані 60 м один від одного.

Доплерівський хмарний радар RPG-FMCW-94-DP [12] працює на частоті 94 ГГц і є радіолокаційною системою з подвійною поляризацією. Лазерний дісдрометр опадів OTT Parsivel² [13], [14] використовує лазерну технологію для отримання інформації про розмір, швидкість та тип частинок (гідрометеорів) у місці його розташування. Цей дісдрометричний датчик обробляє сирі дані прямого вимірювання розміру і швидкості крапель в режимі реального часу, обчислюючи оцінки таких параметрів, як радіолокаційна відбиваність та інтенсивність опадів за допомогою вбудованих алгоритмів.

Спостереження проводяться практично безперервно, і дані з виходу всіх пристроїв записуються. Для аналізу нами були відібрані дані, зібрані протягом 2021–2023 років. Це величезна кількість даних багато-інструментальних спостережень, які включають дані радіолокаційного зондування на частоті 94 ГГц при вертикальному зондуванні, дані лазерного дісдрометра за відповідний час, дані метеостанції, а також дані радіометра. Дані радіометра не розглядаються в цій статті, але можуть бути корисними для подальших досліджень.

Цей короткий огляд приладів та даних враховується для вибору розумного методу калібрування серед різних можливостей, розглянутих у наступному розділі.

Можливі підходи до калібрування

Розглянемо застосовність відомих методів калібрування метеорологічних радіолокаторів до хмарного радара W -діапазону. Традиційний спосіб калібрування на стандартній цілі, безумовно, є універсальним і працює точно у всіх діапазонах частот. В принципі, можливо навіть досягти високої точності. Але недоліки, зазначені вище, зокрема великі організаційні та трудові витрати, стають ще більш гострими в W -діапазоні, що обмежує його застосовність. Таке калібрування доцільно проводити періодично, іноді, але не як повсякденний інструмент.

Метод калібрування за принципом самоузгодженості є досить привабливим. Однак цей метод

базується на математичних моделях, що використовують релєївське розсіювання. Модель Релєя не працює в W -діапазоні. Вплив нерелєївського розсіювання на краплях дощу руйнує ефект самоузгодженості, описуваний формулою (3). Було б дуже цікаво знайти спосіб адаптувати подібний підхід для W -діапазонного радара, або ж слід шукати інші вдосконалені методи калібрування [15].

Зважаючи на те, що метод самоузгодженості не підходить для W -діапазону, оскільки ефекти нерелєївського розсіювання на відносно великих краплях (відносно довжини хвилі) та сильне затухання хвиль руйнують самоузгодженість, було б привабливим перетворити цей недолік на свою користь. Дійсно, чим більша інтенсивність дощу, тим більше затухання, але також і більше відхилення від релєївського розсіювання. Ось чому відбивна здатність зростає набагато повільніше зі збільшенням інтенсивності дощу у вищих частотних діапазонах. У [16] було показано, що на частоті 94 ГГц цих двох ефектів достатньо, щоб величина Z , виміряна на певній невеликій відстані від радара, мало залежала від інтенсивності дощу через одночасну дію цих двох ефектів. Ця особливість дозволяє запропонувати оригінальний спосіб калібрування хмарного радара на частоті 94 ГГц. Таке калібрування можна виконувати щоразу, коли йде дощ.

Очевидно, що як метод самоузгодженості, так і метод поєднання ефектів затухання хвиль та нерелєївського розсіювання є особливо привабливими, коли немає інших джерел даних крім радара, який потрібно калібрувати.

Але у нашому розпорядженні є і нерадіолокаційні дані. Це відкриває набагато більше можливостей. Порівняння вимірювань дощу за допомогою радара та інших засобів, зокрема дісдрометра, звичайно, має працювати, але моделі та розрахунки Z за даними Розподілу Крапель за Розмірами (PKP) стають набагато складнішими для W -діапазону, ніж для нижчих частотних діапазонів.

У нашому розпорядженні є накопичені дані багато-інструментальних вимірювань (радар, дісдрометр, метеостанція). Враховуючи наявність різних приладів для атмосферних досліджень, далі детальніше зупинимося саме на цьому конкретному підході до калібрування, коли для вимірювання спектра розмірів крапель опадів використовується лазерний дісдрометр. Подібні підходи до калібрування очікуються для застосування в європейських хмарних радарах W -діапазону, що надають дані до ASTRIS – це європейська дослідницька інфраструктура, яка займається спостереженням за малорозмірними атмосферними компонентами, такими як аерозолі, частки хмар та газу, а також вивченням їх взаємодії.

Схема експерименту

Основна ідея полягає в наступному. Радар в режимі вертикального зондування оцінює відбиваність дощу за результатами вимірювань ехосигналу, а дідрометр вимірює безпосередньо розміри крапель у цьому ж дощі. Схема таких вимірювань зображено на рис. 1.

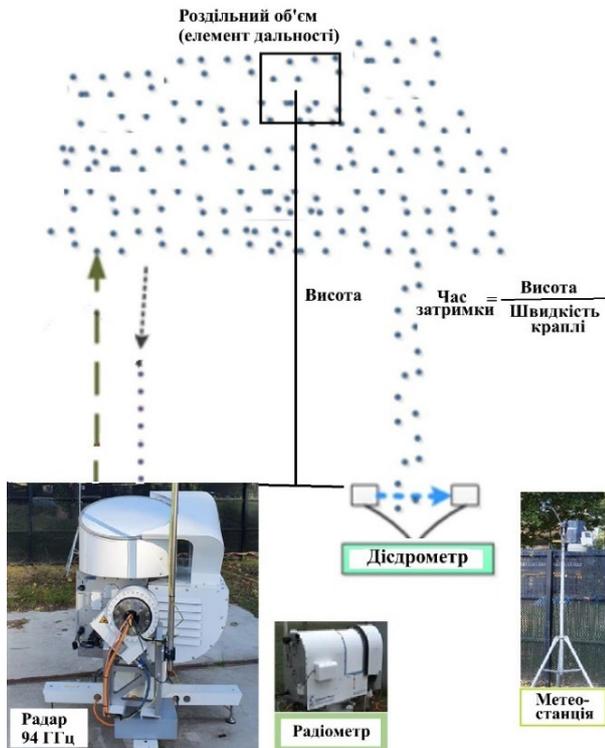


Рис. 1. Схема експерименту

Знаючи РКР, можна розрахувати відбиваність цих крапель, виходячи з коректних математичних моделей розсіяння випромінювання W-діапазону на краплях води, що містяться в роздільному об'ємі (елементі дальності) на певній висоті. Результати радіолокаційної оцінки відбиваності порівнюються з нерадіолокаційною оцінкою за даними дідрометра.

Обробка даних

Дані міліметрового радара та лазерного дідрометра були записані у форматі файлів netCDF. Дані дідрометра зберігаються у щомісячних файлах з роздільною здатністю за часом 1 хвилина, тоді як дані радара зберігаються у погодинних файлах з дискретністю 3,07 с. Тому треба було розробити процедуру вибору даних для забезпечення автоматичного порівняння даних радара та дідрометра з синхронізацією за часом.

Серед багатьох інших даних, у файлах даних радара ми маємо виміряну радіолокаційну відбиваність Z_{rad} .

Відбиваність Z_{rad} пропорційна прийнятій потужності (1) та представлена в dBZ, тобто в логарифмічному масштабі.

Лазерний дідрометр опадів безпосередньо визначає РКР та розподіл швидкості крапель, забезпечуючи одночасне вимірювання 32 діапазонів розмірів та швидкостей крапель.

Радіолокаційна відбиваність видається дідрометром на основі розрахунку за моделлю Релея, яка не працює в W-діапазоні. Саме тому однією з проблем обробки даних є розрахунок радіолокаційної відбиваності з даних дідрометра на основі теорії Мі в зоні резонансного розсіяння. Крім того, існує багато інших питань, які слід враховувати для коректного порівняння результатів вимірювання радаром і дідрометром. Запропонований узагальнений алгоритм обробки даних для коректного порівняння і калібрування показано на рис. 2.

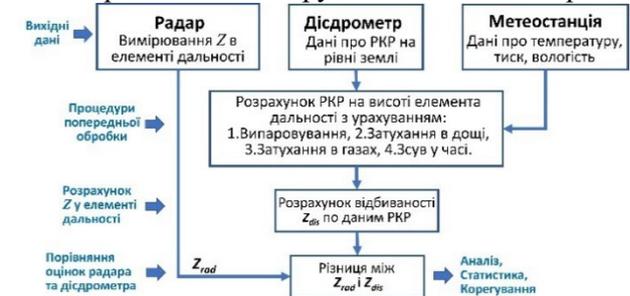


Рис. 2. Процедури порівняння відбиваності Z_{rad} , виміряної радаром W-діапазону, з розрахованою Z_{dis} за даними РКР, виміряного дідрометром

Охарактеризуємо основні проблеми, які необхідно вирішити шляхом обробки даних.

Розташування дідрометра та відбивального радіолокаційного об'єму дощу (елемента дальності) не збігаються. Ми змушені ігнорувати невідповідність горизонтального положення приладів, яке становить кілька десятків метрів, припускаючи, що дощ рівномірний у цих межах. Однак по вертикалі дідрометр розташований на землі, тоді як при зондуванні дощу у зеніт, радіолокаційний елемент простору (відбивальний об'єм), що досліджується, відповідає певній дальності.

Цю дальність доцільно обирати якомога ближче до радара, але в дальній зоні антени; в даному діапазоні хвиль це понад 200 м. Розбіжність у вертикальному розташуванні дідрометра і відбивального об'єму дощу, з якого обираються відбиті сигнали радара є джерелом невизначеності, оскільки краплі дощу, що падають, які служать розсіювачами радіолокаційного сигналу, досягнуть чутливої області дідрометра лише через деяку затримку в часі.

Це впливає на результати порівняння даних з двох причин: по-перше, послідовність даних дідрометра запізнюється відносно послідовності даних радара, а по-друге, протягом часу падіння краплі від обраного елементу дальності радара до дідрометра вода краплі випаровується, тобто краплі у відбивному об'ємі радара можуть бути трохи більшими, ніж на рівні дідрометра. Крім того, випромінювання W-діапазону суттєво ослабляється при поширенні та розсіюванні в дощі, а також в атмосферних газах.

Вплив мокрого обтічника антени радара в даному випадку мінімізується використанням ефективною системи здування води з його поверхні.

Таким чином, під час обробки даних нам необхідно використати адекватні математичні моделі для врахування принаймні наступних ефектів:

- зсуву у часі даних радара і дідрометра;
- випаровування крапель протягом падіння;
- ослаблення сигналу при поширенні в дощі;
- ослаблення сигналу в газах атмосфери;
- резонансний характер розсіювання хвиль на краплях.

Тепер можна перейти до короткого опису процедур обробки. Найскладнішим є розрахунок оцінки радіолокаційної відбиваності та інших характеристик розсіювання радіолокаційних сигналів на основі РКР за даними лазерного дідрометра щодо розміру та швидкості розсіювачів. Ця оцінка повинна бути релевантною для радіолокатора W-діапазону, тобто базуватися на розсіюванні Мі. На рис. 2 така оцінка радіолокаційної відбивної позначена як Z_{dis} .

Найповніший опис відбивальних характеристик об'єкта спостереження у випадку поляриметричного радара дається матрицею розсіювання. У даному випадку вона необхідна не лише для оцінки радіолокаційної відбиваності та інших поляриметричних характеристик сигналу, але й важлива для розрахунку згасання під час поширення хвиль у дощовому середовищі.

Розрахунок матриці розсіювання для несферичної частинки було виконано в [17] з використанням методу Т-матриці. Цей метод дає коефіцієнти зворотного розсіювання $S_{jk}(D_i)$ та розсіювання вперед $F_{jk}(D_i)$ для різних комбінацій поляризації передавальної та приймальної компонентів, де значення $j = h; v$ та $k = h; v$ відповідають горизонтальній h або вертикальній v поляризації.

Зазвичай під час оцінки радіолокаційної відбиваності горизонтальна поляризація припускається для визначеності, якщо не зазначено інакше [15].

Звідси, з використанням коефіцієнту зворотного розсіювання $S_{hh}(D_i)$, неослаблену відбиваність Z_i для окремої краплі діаметром D_i можна виразити наступним чином:

$$Z_i = \frac{4\lambda^4 |S_{hh}(D_i)|^2}{\pi^4 |K|^2} 10^{18}, \left[\frac{mm^6}{m^3} \right], \quad (4)$$

а використовуючи коефіцієнт розсіювання вперед $F_{hh}(D_i)$, питома одностороннє згасання, спричинене краплею рідкої води, становить:

$$A_i = 8,686 \cdot 10^3 \cdot \frac{2\pi}{k} \cdot \text{Im}[F_{hh}(D_i)], \left[\frac{dB}{km} \right]. \quad (5)$$

Ці два вирази (4) і (5) використовуються для розрахунку радіолокаційної відбиваності стосовно радара W-діапазону за даними дідрометра Z_{dis} з урахуванням згасання у краплях дощу. Зокрема кінцева неослаблена відбиваність Z та одностороннє згасання A обчислюються за даними дідрометра OTT Parsivel² як суми по всьому спектру крапель (РКР):

$$Z = 10 \log \left(\frac{1}{60} \frac{|K|^2}{|K_0|^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{C_{i,j} Z_i}{v_i S_i} \right), [dBZ]. \quad (6)$$

$$A = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{C_{i,j} A_i}{v_i S_i}, \left[\frac{dB}{km} \right]. \quad (7)$$

У виразах (6) та (7): індекс i проходить через n інтервалів діаметра; індекс j проходить через m інтервалів швидкості; $C_{i,j}$ – комірка матриці необроблених даних дідрометра, тобто кількість крапель i -го розміру та j -го інтервалу швидкості; v_i – кінцева швидкість у метрах за секунду краплі діаметром D_i ; Z_i та A_i – відповідно відбиваність (4) та згасання (5) для однієї краплі діаметром D_i в одиниці об'єму; $|K|^2$ – діелектричний коефіцієнт води за певної температури. $|K_0|^2 = 0,74$ – постійний діелектричний коефіцієнт води за температури 8°C, встановлений у алгоритмі обробки сигналів даного радара.

Значення $S_i = L_b(W_b - D_i/2)$ у формулах (6) та (7) – це ефективна площа відбору зразка в квадратних метрах (тобто площа перетину, через яку дідрометр спостерігає і реєструє краплі), де L_b та W_b – довжина та ширина лазерного променя дідрометра [13]. Для OTT Parsivel² $L_b = 18$ см та $W_b = 3$ см. Тепер, маючи всі ці проміжні результати, можна розрахувати радіолокаційну відбиваність $Z(r)$ вздовж шляху (вертикальної лінії) r в дощі з постійними властивостями як

$$Z(r) = Z_0(r) - 2 \int_0^r [A(r) + A_g(r)] dr, \quad (8)$$

де Z_0 [дБЗ] – радіолокаційна відбиваність без ослаблення; A [дБ/км] – ослаблення дощем (в один бік), A_g [дБ/км] – ослаблення атмосферними газами (в один бік); r – відстань [км].

На відміну від радіолокаторів з більшою довжиною хвилі, у випадку W -діапазону ослабленням у газах атмосфери нехтувати не можна [18]. Водяна пара та кисень є основними компонентами, що впливають на ослаблення електромагнітних коливань під час поширення в тропосфері. Для розрахунків з використанням даних вимірювань метеостанції як початкових параметрів використовувалися рекомендації ІТУ-R Р.676-10 (09/2013) “Radiowave propagation”.

Корекція на випаровування крапель протягом часу їх падіння з висоти відбивного об'єму радара до чутливої області дідрометра проводилась на основі моделі, що описує швидкість зміни радіуса краплі внаслідок випаровування [19]. Після переходу до діаметра формула має вигляд:

$$vD \frac{dD}{dH} = 4 \frac{S-1}{F_K + F_D}, \quad (9)$$

де v – швидкість краплі; H – вертикальна дальність, яку пододала крапля; S – перенасичення відносно рідкої води; F_K – опір теплопереносу (теплопровідності) від/до краплі; F_D – опір дифузійному переносу пари від поверхні краплі в навколишнє повітря. Обидва коефіцієнта F є додатними величинами, а їх сума – це сукупний (ефективний) опір двох необхідних переносів, і чим він менший, тим швидше змінюється діаметр краплі D . Коефіцієнти F_K і F_D пов'язані з теплопровідністю та дифузійною парі відповідно:

$$F_K = \left(\frac{L_v}{RT} - 1 \right) \frac{L_v \rho_l}{f_h K T}, \quad (10)$$

$$F_D = \frac{\rho_l R_v T}{f_v D_v e_s(T)}, \quad (11)$$

де L_v – прихована теплота пароутворення; R_v – газова стала водяної пари; T – температура повітря; ρ_l – густина рідкої води; K – теплопровідність повітря; D_v – коефіцієнт дифузії водяної пари; $e_s(T)$ – тиск насиченої пари як функція T ; f_v та f_h – коефіцієнти вентиляції для пари та тепла [20].

Рівняння (9) пов'язує розмір краплі на певній висоті з розміром краплі на поверхні. Нам потрібно відповісти на інше запитання: яким був розмір краплі на висоті H , якщо відомий її розмір на поверхні?

Щоб визначити це, замінимо похідну в рівнянні (9) співвідношенням відповідних приростів, ΔD та ΔH , та розв'яжемо отримане рівняння відносно ΔD . Тоді ми можемо визначити розмір краплі на висоті H як:

$$D_H = D_S + \Delta D = D_S + \frac{4(S-1)}{vD_S(F_K - F_D)} H, \quad (12)$$

де D_S – діаметр краплі на поверхні; D_H – діаметр краплі на висоті H , фактично $H = \Delta H$, якщо дідрометр розташований на поверхні; ΔD – різниця між діаметром краплі на висоті та поверхнею внаслідок випаровування.

Після внесення всіх розглянутих коригувань до рівнянь (4), (5), (8), радіолокаційну відбивність, розраховану за даними дідрометра $Z(r)$, $r = H$, що описується рівнянням (8), можна розглядати як Z_{dis} , яка є підготовленою для порівняння в абсолютному значенні з відбивною здатністю Z_{rad} , виміряною радаром у радіолокаційному елементі дальності, що відповідає висоті H .

Додаткове зауваження стосується компенсації часової затримки, оскільки ми повинні забезпечити коректне порівняння розрахованих часових рядів відбивної здатності $Z_{dis}(t)$ та вимірних $Z_{rad}(t)$. Часова затримка між рядами Z_{rad} та Z_{dis} оцінюється шляхом обчислення їхньої функції взаємної кореляції. Часовий зсув (відносно 0), що відповідає максимальній кореляції, використовується для корекції положення часового ряду дідрометра відносно радара.

Усі згадані процедури обробки даних, а також низка інших, що заслуговують на окремий розгляд, реалізовані в створеному програмному забезпеченні.

Програмне забезпечення

У нашій статті [21] описано першу версію розробленого програмного засобу для обробки даних з метою порівняння радіолокаційної відбивності дощу, вимірної радаром та дідрометром. У цьому розділі представлено подальший розвиток цього підходу. Програмне забезпечення, представлене тут, використовує алгоритми [21] для фільтрації необроблених даних у вигляді файлів даних, вибраних з великих хмарних баз даних відповідно до певних критеріїв. Далі ці дані обробляються відповідно до описаних математичних моделей. Інші алгоритми значно вдосконалені та додано багато нових функцій. Програмне забезпечення розроблено в середовищі MATLAB/Simulink.

Було розроблено зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Він забезпечує вибір файлів дідрометра та радара, їх дата та час синхронізуються автоматично. Дані радара можна вибрати з потрібного радіолокаційного роздільного об'єму, тобто елемента дальності, що задається його номером. За бажанням, Z_{rad} можна згладити. Дані про РКР з дідрометра обробляються відповідно до алгоритмів, описаних у попередньому розділі, для розрахунку Z_{dis} .

Програмне забезпечення надає можливість окремо досліджувати вплив різних факторів на оцінку відбивності Z_{dis} , як описано вище, а саме: ослаблення дощем, ослаблення газами, випаровування під час падіння та зсув у часі, шляхом позначення та натискання відповідних кнопок, як от: «Включити ослаблення краплями», «Включити ослаблення газами», «Обчислити Z на висоті (заданій)» та «Скорегувати зсув у часі». Після введення

всіх поправок можна представити Z_{rad} та Z_{dis} в одному полі (об'єднана Z -діаграма).

Крім того, програмне забезпечення розраховує спектр швидкості крапель за даними дідрометра для порівняння його із доплерівським спектром радіолокаційного поля. Також є можливість будувати діаграми розсіювання даних радара і дідрометра щодо радіолокаційної відбиваності, середніх швидкостей та ширин спектрів тощо.

Результати

Розроблене програмне забезпечення дозволяє аналізувати великий обсяг експериментальних даних, накопичених протягом декількох років, причому цей обсяг продовжує поповнюватися, оскільки експерименти продовжуються.

В цьому розділі аналізуються деякі записи даних отриманих шляхом одночасних вимірювань радаром міліметрового 94 ГГц діапазону і лазерного дідрометра як основних джерел інформації з урахуванням даних щодо температури, тиску, вологості тощо, записаних метеостанцією як джерелом допоміжної інформації.

На рис. 3 і 4 показано радіолокаційну відбиваність з даних зафіксованих дідрометром (рис. 3) і радаром (рис. 4).

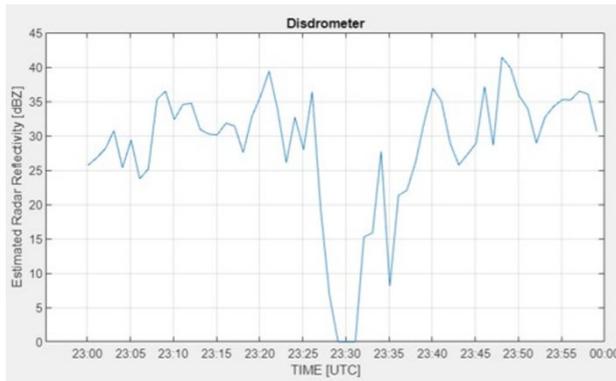


Рис. 3. Радіолокаційна відбиваність як функція часу, записана протягом години за розрахунками вбудованим програмним забезпеченням дідрометра

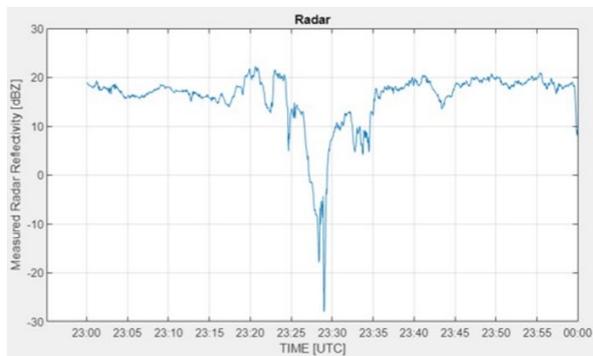


Рис. 4. Радіолокаційна відбиваність як функція часу, записана протягом години за даними вимірювань радіолокатором протягом тієї ж години, що і на рис. 3

З графіків видно, що ці дві криві відбиваності мають певні загальні риси. Принаймні в районі 23:30 відбиваність різко знизилася (дощ припинився). Але абсолютні величини відбиваності, розраховані вбудованими алгоритмами за даними РКР дідрометра, відрізняються від радіолокаційних вимірювань в W -діапазоні на понад 20 децибел. Очевидно, що це викликано перш за все тим, що вбудовані алгоритми засновані на моделі розсіювання Релея, яка працює лише коли довжина хвилі набагато більша за розміри розсіювачів, що абсолютно не відповідає дійсності, коли дощові краплі опромінюють електромагнітними коливаннями з частотою 94 ГГц (довжина хвилі 3,19 мм, а приблизний діапазон розмірів крапель 0,2–6,5 мм).

На рис. 5 ті самі дані наведені на єдиному полі після застосування алгоритмів, описаних в розділі «Обробка даних».

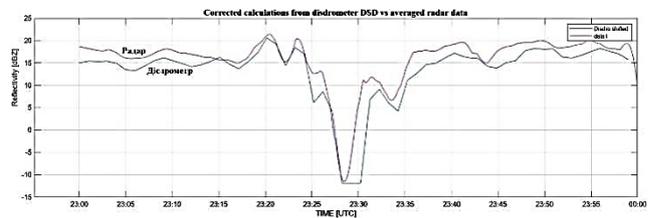


Рис. 5. Радіолокаційна відбиваність виміряна радаром (верхня крива) і розрахована коректними алгоритмами, описаними вище (нижня крива)

На цих графіках відповідність радарних вимірювань відбиваності і розрахованих значень радіолокаційної відбиваності за даними прямих вимірювань РКР дідрометром збігаються набагато краще. Тут для розрахунків використані описані вище моделі на основі резонансного розсіювання Mi , враховано ослаблення, скореговано зсув у часі, а також ефект випаровування (він не є надто значним в даному випадку, бо ці дані отримані 20 жовтня 2021, коли температура повітря у поверхні була відносно низька, 12°C). Дані радара трохи усереднені, враховуючи зазначені вище значення дискретизації даних дідрометра (1 хвилина) і радара (3 секунди).

Видно, що відбиваність за даними радара на 1–2 дБ вища за результати, отримані з даних РКР. Це очевидно викликано тим, дідрометр не відчуває дрібних крапель, менше 0,3 мм, на відміну від радіолокатора W -діапазону.

Результати вимірювання швидкостей крапель, виміряних дідрометром, і доплерівських швидкостей, оцінених радаром, дають можливість зіставити також спектри швидкостей, приклад яких представлено на рис. 6 і 7.

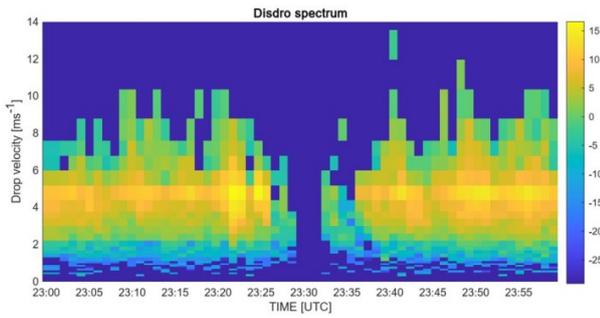


Рис. 6. Спектр швидкості падіння крапель за даними дїсдрометра

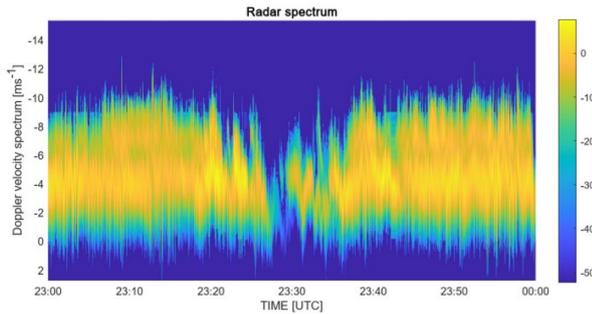


Рис. 7. Спектр доплерівських швидкості крапель за даними радара (вертикальне зондування)

Подібність цих спектрограм досить наочно проглядається на цих тривимірних графіках, особливо з урахуванням різної роздільної здатності за часом (дискретності).

Наявні дані вимірювань дають можливість також проаналізувати діаграми розсіювання параметрів, отриманих за даними одночасних радіолокаційних і нерадіолокаційних вимірювань, які представлені на рис. 8-10. Тут точками представлено результати одночасних оцінок за даними 94-гігагерцового радара і дїсдрометра, червона пряма лінія – відповідна лінійна апроксимація, а зелена пряма відповідає лінії уявного ідеального збігу даних радара і дїсдрометра.

На рис. 11 представлено статистику за місяць спостережень.

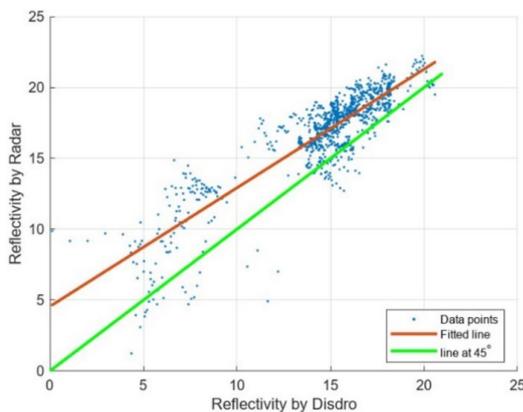


Рис. 8. Діаграма розсіювання радіолокаційної відбиваності за даними радара і дїсдрометра протягом однієї години

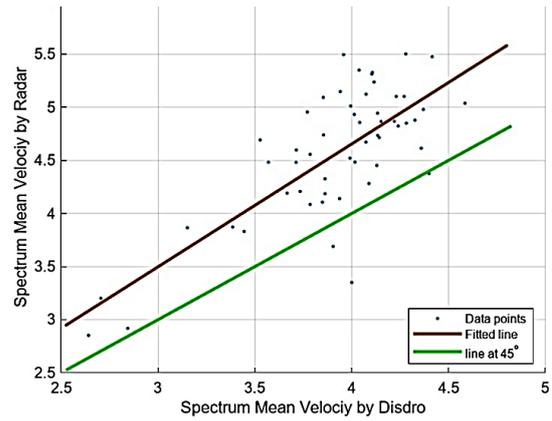


Рис. 9. Діаграма розсіювання середньої доплерівської швидкості за даними радара і дїсдрометра протягом однієї години

Нарешті, рис. 12 демонструє приклад розподілу крапель за розмірами і порівняння його з традиційною моделлю, що описується Гамма-розподілом.

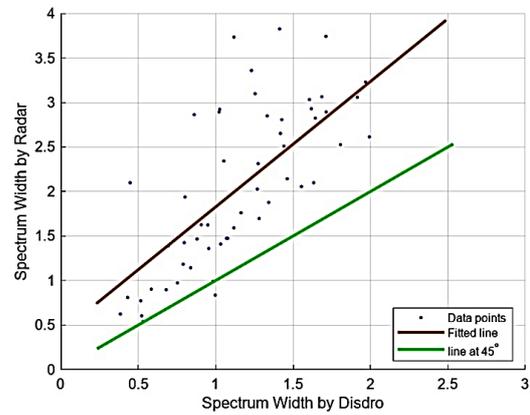


Рис. 10. Діаграма розсіювання ширини доплерівського спектра за даними радара і дїсдрометра отриманих протягом однієї години

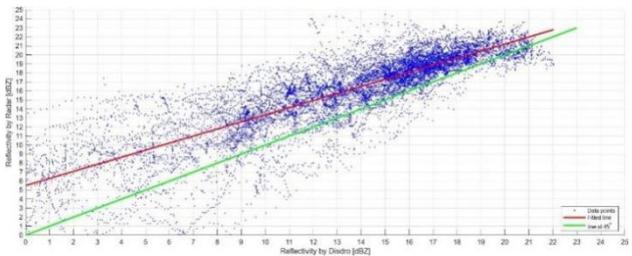


Рис. 11. Діаграма розсіювання радіолокаційної відбиваності за даними, накопиченими протягом місяця

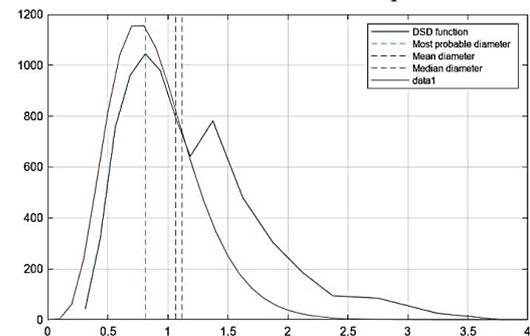


Рис. 12. Приклад розподілу крапель дощу за розмірами, оцінений лазерним дїсдрометром

На останньому графіку (Рис. 12) крім гістограми РКР (синя крива, іде трохи правіше) показано також відповідний Гамма-розподіл (сучільна помаранчева крива). Ці дані також демонструють нечутливість дідрометра щодо дрібних крапель (менше 0,3 мм).

Висновки

В статті детально проаналізовано метод калібрування W-діапазонного радара з використанням дідрометра та компактних метеорологічних станцій. Обговорено проблеми, пов'язані з урахуванням резонансного розсіяння міліметрових хвиль на краплях дощу, сильним затуханням їх в тропосфері, зсувом у часі даних радара і дідрометра тощо та розроблено шляхи їх вирішення.

Розроблено зручне програмне забезпечення для порівняльного аналізу великої бази даних відділу науки про Землю та дистанційного зондування Делфтського технічного університету, яка містить дані хмарного радара W-діапазону та лазерного дідрометра, зокрема під час безперервних вимірювань характеристик дощу.

Створений спеціалізований програмний інструмент MATLAB/Simulink використано для обробки, порівняння та спільного використання складних мульти-інструментальних даних, зокрема як інструмент для коректного порівняння радіолокаційної відбиваності, доплерівських спектрів, середніх та середньоквадратичних швидкостей.

Проведено статистичний аналіз з використанням доступних великих даних і побудовані відповідні діаграми розсіювання.

Наведено і проаналізовано конкретні приклади спостереження за дощем з використанням хмарного радара W-діапазону, лазерного оптичного дідрометра та метеостанції.

Розроблені алгоритми і створене програмне забезпечення дають можливість також обчислювати поляриметричні параметри відбитого сигналу з вимірюючого дідрометром розподілу крапель за розмірами для подальшого порівняння з поляриметричними радіолокаційними вимірюваннями [22]. Це має бути зроблено в майбутніх дослідженнях, включаючи випадок похилого радіолокаційного зондування та з додатковим використанням радіометричних даних.

Отримані результати є потенційно важливими не лише для радіолокаційної метеорології, спостереження за хмарами і вирішення задач гідрології та кліматології, але і для авіаційної метеорології й подальшого підвищення безпеки і регулярності польотів у складних метеорологічних умовах.

Подяка

Автори вдячні кафедрі Geoscience and Remote Sensing Делфтського технічного університету, Delft, Нідерланди, зокрема професору Herman Russchennberg і науковій співробітниці Christine Unal за надання доступу до бази експериментальних даних і корисні обговорення.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] D. Atlas, "Advances in radar meteorology," in *Advances in geophysics*, Elsevier, vol. 10, January, 1964, pp. 317–478. doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60009-6
- [2] R.J. Doviak and D.S. Zrnicek, *Doppler Radar and Weather Observations*, Accademic Press, 1993.
- [3] F. J. Yanovsky, "Evolution and Prospects of Airborne Weather Radar Functionality and Technology," *2005 18th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications*, Dubrovnik, Croatia, 2005, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICECOM.2005.204987.
- [4] F. J. Yanovsky, "Millimeter Wave Radar: Principles and Applications", In: *Millimeter Wave Technology in Wireless PAN, LAN, and MAN*, Chapter 10, pp.305-376, CRC Press, 2008.
- [5] J. Yin, P. Hoogeboom, C. Unal, H. Russchenberg, F. Van Der Zwan, and E. Oudejans, "UAV-aided weather radar calibration," *IEEE Trans. GRS*, 57(12), 2019, pp. 10362–10375. doi.org/10.1109/TGRS.2019.2933912
- [6] S. A. Baun, A. C. Bagtzoglou et al, "Progress Towards Developing a Radar Calibration Method for Improved Rainfall Estimation," *Ninth ASCE Biennial Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments*, March 2004, pp. 290–298. DOI: 10.1061/40722(153)41
- [7] C. Merker, G. Peters, M. Clemens, K. Lengfeld, and F. Ament, "A novel approach for absolute radar calibration: formulation and theoretical validation," *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 2015, pp. 2521–2530. doi.org/10.5194/amt-8-2521-2015
- [8] E. Gorgucci, G. Scarchilli, and V. Chandrasekar, "A Procedure to Calibrate Multiparameter Weather Radar Using Properties of the Rain Medium," *IEEE Trans. GRS*, vol. 37, No. 1, Jan. 1999, pp. 269–277. DOI: 10.1109/36.739161
- [9] G. Scarchilli, E. Gorgucci, V. Chandrasekar, and A. Dobaie, "Selfconsistency of polarization diversity measurement of rainfall," *IEEE Trans. GRS*, vol. 34, Jan. 1996, pp. 22–26. DOI: 10.1109/36.481887
- [10] I. Holleman, A. Huuskonen, and B. Taylor, "Solar Monitoring of the NEXRAD WSR-88D Network Using Operational Scan Data," *J. Atmos. and Oceanic Technology*, Vol.39, Feb. 2022, pp. 193 – 205. doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0204.1
- [11] Jeong-Eun Lee, Soohyun Kwon, and Sung-Hwa Jung, "Real-Time Calibration and Monitoring of Radar Reflectivity on Nationwide Dual-

- Polarization Weather Radar Network,” *Remote Sensing*, 2021, 13, 2936, 17 pp. DOI.org/10.3390/rs13152936
- [12] N. Kuchler, S. Kneifel et al, “A W-Band RadarRadiometer System for Accurate and Continuous Monitoring of Clouds and Precipitation,” *J. Atmos. and Ocean. Tech*, vol. 34, 2017, pp. 2375–2392. doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0019.1
- [13] A. Tokay, D. B. Wolff, and W. A. Petersen, “Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT parsivel2,” *J. Atmos. and Oceanic Tech*, vol. 31, no. 6, 2014, pp. 1276–1288. doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00174.1
- [14] OTT Parsivel² – Laser Weather Sensor, ott.com/products/meteorological-sensors-26/ott-parsivel2-laser-weather-sensor-2392/productAction/outputAsPdf/
- [15] A. Myagkov, S. Kneifel, and T. Rose, “Evaluation of the reflectivity calibration of W-band radars based on observations in rain,” *Atmospheric Measurement Tech*, vol. 13, issue 11, 2020, pp. 5799–5825. doi.org/10.5194/amt-13-5799-2020
- [16] R. J. Hogan, D. Bouniol, D. N. Ladd, E. J. O’connor, and A. J. Illingworth, “Absolute calibration of 94/95-GHz radars using rain,” *J. of Atmospheric and Oceanic Technology* 20(4), 2003, pp. 1–7. doi.org/10.1175/1520-0426(2003)20<572:ACOGRU>2.0.CO;2
- [17] M. Mishchenko, “Calculation of the amplitude matrix for a nonspherical particle in a fixed orientation,” *Applied Optics*, vol. 39, No 6, 2000, pp. 1026–1031. doi.org/10.1364/AO.39.001026
- [18] H. J. Liebe, “MPM – An atmospheric millimeter-wave propagation model,” *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*, Volume 10, Issue 6, 1989, pp.631-650. DOI: 10.1007/BF01009565.
- [19] M. R. Kumjian and A. V. Ryzhkov, “The Impact of Evaporation on Polarimetric Characteristics of Rain: Theoretical Model and Practical Implications,” *J. Applied Meteorology and Climatology* 49(6), June 2010, pp. 1247–1267, DOI: 10.1175/2010JAMC2243.1.
- [20] R. M. Rasmussen and A. J. Heymsfield, “Melting and shedding of graupel and hail. Part I: Model physics,” *J. Atmos. Sci.*, 44, 1987, pp. 2754–2763. doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<2754:MASOGA>2.0.CO;2
- [21] F. J. Yanovsky, A. A. Pitertsev, C. M. H. Unal and H. W. J. Russchenberg, “Data fusion and processing tool for comparing rain reflectivity estimations using 94 GHz radar and laser disdrometer,” *2024 IEEE Int. Conf. on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering and Electronic Systems (COMCAS)*, Tel Aviv, Israel, 2024, pp. 1–6, doi: 10.1109/COMCAS58210.2024.10666246.
- [22] F. J. Yanovsky, H. W. J. Russchenberg, and C. M. H. Unal, “Retrieval of Information About Turbulence in Rain by Using Doppler-Polarimetric Radar,” *IEEE Trans. MTT*, Feb., Vol. 53, No 2, 2005, pp. 444–450. DOI: 10.1109/TMTT.2004.840772

Яновський Ф. Й., Пітерцев О. А.

ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРШИЙ ДОСВІД КАЛІБРУВАННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ РАДІОЛОКАТОРІВ W-ДІАПАЗОНУ ЗА ДАНИМИ ЛАЗЕРНОГО ДІСДРОМЕТРА

Калібрування метеорологічних радарів залишається значною проблемою в радіолокаційній метеорології, коли йдеться про кількісні вимірювання. Хоча традиційні методи добре зарекомендували себе для радарів, що працюють на сантиметрових довжинах хвиль, поява хмарних радарів міліметрового діапазону, особливо на частотах W-діапазону створює унікальні проблеми для калібрування. Це пов’язано, перш за все, з відмінностями в розсіянні зондувального сигналу на гідрометеорах, коли довжина хвилі стає сумірною з діаметрами розсіювачів і замість простої релейської моделі необхідно переходити на моделі резонансного розсіяння. Іншою суттєвою проблемою є сильне згасання міліметрових хвиль як в опадах, так і в газах атмосфери. Ця робота досліджує численні тонкощі хмарних радарів W-діапазону та оцінює життєздатні стратегії калібрування для забезпечення точних вимірювань. Акцент робиться на підході до калібрування з використанням даних дисдрометра про дощ, зокрема про розподіл крапель як за розмірами, так і за швидкостями падіння на рівні земної поверхні. Подібні підходи до калібрування очікуються для застосування в європейських хмарних радарів W-діапазону, що надають дані до ACTRIS – європейської дослідницької інфраструктури, яка займається спостереженням за малорозмірними атмосферними компонентами, такими як аерозолі, хмари та гази, а також вивченням їх взаємодії. В цій статті синхронні дані з мобільної метеостанції використовуються як додаткова інформація, необхідна для реалізації алгоритмів порівняння та об’єднання даних радарів та дисдрометрів. Ключові аспекти методології викладено та реалізовано в дослідницькому програмному засобі та продемонстровано. Цей програмний інструмент має потенціал для розширення для полегшення порівняння додаткових доплерівських моментів та спектрів з використанням вхідних даних дисдрометра та хмарного радара. Наведено ілюстративні приклади, що демонструють можливості програмного забезпечення для комплексного аналізу радіолокаційної відбиваності, доплерівських спектрів та інших метеорологічних параметрів, включаючи їх статистику, що таким чином покращує процес калібрування.

Ключові слова: радіолокаційна система; метеорологічна радіолокація; міліметрові радары; калібрування; резонансне розсіяння; радіолокаційна відбиваність; розсіяння; обробка сигналів.

Yanovsky F., Pitertsev O.

FEATURES AND FIRST EXPERIENCE OF CALIBRATING W-BAND METEOROLOGICAL RADARS USING LASER DISDROMETER DATA

Calibration of weather radars remains a significant challenge in radar meteorology when it comes to quantitative measurements. While traditional methods have proven themselves well for radars operating at centimeter wavelengths, the advent of millimeter-wave cloud radars, especially at W-band frequencies, poses unique calibration challenges. This is primarily due to the differences in the scattering of the sounding signal by hydrometeors, when the wavelength becomes of the same order as the diameters of the scatterers and instead of a simple Rayleigh model, it is necessary to switch to resonant scattering models. Another significant problem is the strong attenuation of millimeter waves in both precipitation and atmospheric gases. This work explores the numerous subtleties of W-band cloud radars and evaluates viable calibration strategies to ensure accurate measurements. The emphasis is on a calibration approach using disdrometer rain data, in particular the distribution of drops in both size and ground-level droplet velocity. Similar calibration approaches are expected for use in European W-band cloud radars that provide data to ACTRIS, a European research infrastructure dedicated to the observation of short-range atmospheric components such as aerosols, clouds and gases, and the study of their interactions. In this paper, synchronous data from a mobile weather station are used as additional information needed to implement algorithms for comparing and fusing radar and disdrometer data. Key aspects of the methodology are outlined, implemented in a research software tool, and demonstrated. This software tool has the potential to be extended to facilitate the comparison of additional Doppler moments and spectra using disdrometer and cloud radar inputs. Illustrative examples are provided demonstrating the capabilities of the software for comprehensive analysis of radar reflectivity, Doppler spectra, and other meteorological parameters, including their statistics, thereby improving the calibration process.

Keywords: radar system; meteorological radar; millimeter-wave radars; calibration; resonant scattering; radar reflectivity; scattering; signal processing.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2025 р.
Прийнято до друку 10.12.2025 р.