UDC 621.396.96:551.501.81

Ф.Й. Яновський, професор, д.т.н., О.А. Пітерцев, к.т.н.
(Національний авіаційний університет, Україна),
Christine Unal, Herman Russchenberg, professor, PhD
(Delft University of Technology, the Netherlands)

Калібрування хмарних радіолокаторів W-діапазону з використанням нерадіолокаційних вимірювань

Моніторинг і прогнозування метеорологічних умов є критично важливими для безпечної та регулярної роботи глобальної системи повітряного транспорту. Впровадження в практику метеорологічних спостережень нових радіолокаторів міліметрового діапазону не тільки відкриває можливості для отримання більш детальної інформації про хмарність, але й зумовлює необхідність розробки відповідних методів калібрування для забезпечення достовірних кількісних результатів. Ця робота присвячена обговоренню особливостей калібрування хмарного радіолокатора W-діапазону. Розглядаються проблеми калібрування радіолокатора міліметрового діапазону за допомогою вимірювань з кількома приладами та пропонуються рішення цих проблем. Експериментальна частина дослідження базується на вимірюваннях дощу протягом кількох років на експериментальному полігоні в Нідерландах. Дані вимірювань використовуються для порівняння та об'єднання даних 94 ГГц радіолокатора з нерадіолокаційними вимірюваннями лазерного дисдрометра, мікрохвильового радіометра та синхронними даними метеостанції. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення MATLAB для складної обробки багато-приладних даних і калібрування радара.

Формулювання проблеми.

Точність метеорологічних приладів має першорядне значення для отримання надійних результатів для забезпечення авіаційних, погодних, кліматичних та інших застосувань, пов'язаних із спостереженнями за атмосферою. Однак точність будь-якого приладу завжди обмежена, і це особливо очевидно, коли йдеться про непрямі вимірювання під час дистанційного зондування атмосфери. Вимірювання кількома приладами можуть зіграти вирішальну роль у підвищенні точності та повноти спостережень. Вони дають можливість отримати точнішу інформацію, навіть якщо кожен прилад окремо недостатньо точний. Для цього використовується спеціальна обробка сигналів і даних, що дає кінцевий більш надійний результат на основі злиття даних. Крім того, вимірювання кількома інструментами відкривають великі можливості для калібрування приладу, тобто допомагають підвищити точність приладу, який потім можна використовувати окремо для більш точного кількісного дистанційного зондування після калібрування.

Метеорологічний радар є типовим засобом дистанційного зондування. Розроблено багато методів абсолютного калібрування РЛС за різними параметрами, перш за все за радіолокаційною відбиваністю *Z*. Ці методи описані у багатьох публікаціях, наприклад [1-5]. Вони здебільшого стосуються калібрування радарів S-, C- та X-діапазону.

Новітні хмарні радари, що працюють на частоті 94 ГГц (W-діапазон), допомагають надавати дані високої роздільної здатності, важливі для розуміння динаміки хмар, процесів випадання опадів і атмосферних явищ. Однак проблема точного калібрування цих складних інструментів є значною перешкодою для забезпечення надійності даних.

Традиційні методи не можуть бути безпосередньо застосовані для калібрування радіолокатора міліметрового діапазону з кількох причин. Найважливішою з них є незастосовність апроксимації Релея для ефективної площі розсіяння (ЕПР) краплі, оскільки її розмір стає того ж порядку, що й довжина хвилі, і ЕПР підпорядковується теорії Мі [6].

Є декілька статей, присвячених калібруванню метеорологічних радарів, міліметрового діапазону хвиль [7-9]. В роботі [10] два основні підходи до калібрування адаптовані саме для метеорологічного радара W-діапазону: метод самоузгодженості та метод на основі дисдрометра. Перший доцільно застосовувати, коли немає додаткових інструментів, окрім радара, що підлягає калібруванню, але другий метод відповідає нашій концепції багатоінструментальних вимірювань і застосований у цьому дослідженні.

Реалізація цього методу калібрування з використанням великої кількості даних включає багато складних обчислень. Тому в нашій попередній роботі [11] була розроблена перша версія зручного програмного забезпечення як інструмент для автоматичного вибору відповідних файлів даних, записаних з різних вимірювальних пристроїв, і реалізовані основні математичні перетворення для коректного порівняння цих даних, зокрема, даних дисдрометра (розподіли крапель за розмірами і швидкостями) і радара W-діапазону (радіолокаційна відбиваність і допплерівський спектр).

У цій статті ми представляємо нове програмне забезпечення із значно розширеними функціями, а головне, результати дослідження, проведеного з його допомогою на основі багатоінструментальних вимірювань, які проводилися майже безперервно протягом трьох років у Нідерландах. Ці дані були використані для перевірки калібрування хмарного радара 94 ГГц.

Наш аналіз охоплює серію контрольованих багатоінструментальних експериментів і польових досліджень дощів різної інтенсивності, під час яких ми ретельно порівнювали показання хмарного радара 94 ГГц із відповідними вимірюваннями дисдрометра та метеостанції за різних атмосферних умов. Цей порівняльний підхід не тільки підтверджує ефективність калібрування на основі дисдрометра, але й проливає світло на обмеження пристроїв і тонкощі мікрофізики хмар/дощів, зафіксовані радарами W-діапазону.

Загальна характеристика датчиків і даних.

Обробка даних у цьому дослідженні пов’язана з вимірюваннями, які проводилися в Делфтському технологічному університеті протягом тривалого часу. У цьому дослідженні для обробки використано дані, отримані у 2021-2023 роках. Джерелами даних слугували наступні вимірювальні прилади: 1) хмарний радар, що працює в W-діапазоні; 2) оптичний лазерний дисдрометр; 3) метеостанція. Отже, такий експериментальний набір включав як прилади дистанційного зондування, так і вимірювальні прилади на місці.

Радіолокатор. Хмарний радар RPG-FMCW-94-DP компанії Radiometer Physics, Rohde & Schwarz [12] працює на центральній частоті 94 ГГц. Він забезпечує високу просторову роздільну здатність і хорошу чутливість до всіх типів гідрометеорів, включаючи хмарні краплі. Завдяки можливостям подвійної поляризації система може надавати додаткову інформацію про форму та орієнтацію гідрометеора, усередненну за обсягом роздільної здатності. Характеристики цього радара наведені в [13]. Допплерівські можливості радара дозволяють оцінювати характеристики радіальних швидкостей розсіювачів, надаючи інформацію про швидкість і напрямок вітру в межах спостережуваного стовпа атмосфери. Технологія FMCW забезпечує високу роздільну здатність, дозволяючи радару виявляти дрібномасштабні вертикальні структури в хмарах і опадах. Вузька ширина променю радара 94 ГГц зменшує завади від землі, що забезпечує точніші вимірювання атмосферних особливостей на малих висотах. Хоча ослаблення сигналу є більшим на частоті 94 ГГц, висока чутливість радара та поляриметричні вимірювання допомагають компенсувати ці ефекти у випадку слабких та помірних опадів. Крім того, система захисту від дощу/снігу/туману, заснована на потужному повітродувнику та обігрівачі, дозволяє уникнути крапель рідини та льоду на гідрофобних обтічниках антени. Це важливо для зменшення великого загасання через наявність рідкої води на антенах.

Дисдрометр. Система лазерного дисдрометра OTT Parsivel² - це лазерний дисдрометр опадів [14, 15], призначений для вимірювання різних типів та інтенсивності опадів. Використовуючи лазерну технологію, датчик фіксує детальну інформацію про розмір, швидкість і тип частинок у місці, де він встановлений. Насправді Parsivel² вимірює розподіл частинок за розміром у діапазоні від 0,3 до 25 мм і швидкість частинок від 0,2 до 20 м/с, надаючи детальну інформацію про характеристики дощові краплі, сніжинки та градини. Датчик може автоматично класифікувати опади на різні типи, такі як мряка, дощ, сніг, змішані опади та град, на основі виміряних даних про розмір частинок і швидкість. OTT Parsivel² використовує лазерну оптичну систему високої роздільної здатності для точного вимірювання параметрів опадів, забезпечуючи досить надійні дані навіть за умов низької інтенсивності або змішаних опадів. Датчик обробляє сирі дані в режимі реального часу, обчислюючи також інтенсивність опадів.

Метеостанція. Автоматична метеостанція Vaisala, яка розташована біля радіолокаційної системи, оснащена датчиками для вимірювання основних метеорологічних параметрів, а саме атмосферного тиску, температури повітря, відносної вологості, кількості опадів, швидкості та напрямку вітру. Принаймні частина цієї інформації необхідна для коректного порівняння та синтезу даних радіолокатора та дисдрометра.

Дані радара та дисдрометра були записані у форматі файлу netCDF. Дані дисдрометра зберігаються у щомісячних файлах із роздільною здатністю 1 хвилина, тоді як дані радара представлені у погодинних файлах кожні 3,07 с. Процедура відбору даних розроблена для забезпечення автоматичного порівняння даних радара та дисдрометра в один день і час.

Серед багатьох інших відомостей у файлах радіолокаційних даних ми маємо виміряну радіолокаційну відбиваність Z_{rad}, яка пропорційна отриманій

потужності та представлена в dBZ, тобто в логарифмічній шкалі. Лазерний дисдрометр опадів безпосередньо визначає розподіл крапель за розміром (РКЗ) і розподіл швидкості крапель, забезпечуючи одночасне вимірювання 32 класів розмірів і швидкостей крапель.

Розрахункова радіолокаційна відбиваність також надається дисдрометром з виміряного РКЗ у припущенні моделі Релея, яку не можна застосовувати в W-діапазоні, тобто ця оцінка є невірною. Тому однією з проблем обробки даних є розрахунок радіолокаційної відбиваності за даними дисдрометра на основі розсіювання Мі. Однак є й багато інших проблем, які слід враховувати та вирішувати шляхом обробки даних.

Розташування дисдрометра і відбивного об'єму дощу (роздільного об’єму радара) не збігаються. Ми змушені не враховувати розбіжність горизонтального положення приладів, яка становить не більше 150 м, припускаючи, що в цих межах дощ рівномірний. Однак дисдрометр розташовано на землі, а при вертикальному зондуванні висота радіолокаційної зони спостереження відповідає дальності, яка вибирається максимально близько, але в зоні перекриття приймально-передавальної антени, яка зазвичай більше 200 м. Це є джерелом невизначеності, оскільки падаючі дощові краплі, які служать розсіювачами радіолокаційних сигналів, досягнуть чутливої зони дисдрометра лише з деякою затримкою. На додаток до координації часу може знадобитися врахувати можливу зміну розмірів крапель через випаровування протягом часу, коли вони падають з висоти радіолокаційного об’єму до рівня дисдрометра.

Характеристика розробленого інструменту для обробки даних.

Охарактеризуємо подальший розвиток підходу, описаного в роботі [11]. Програмний засіб спільної обробки даних від різних вимірювальних приладів має графічний інтерфейс, написаний у середовищі MATLAB. Цей інструмент поєднує в собі велику кількість окремих утиліт і функцій, спрямованих як на попередню, так і на основну обробку даних. Оскільки файл даних дисдрометра містить інформацію про вимірювання за цілий місяць, а файл радара лише за одну годину, то для порівняння показань приладів необхідно знати, в який день і годину доцільно проводити це порівняння. Крім того, прилади не завжди працюють у режимі 24/7, іноді можуть бути відключення навіть на кілька днів для обслуговування. Тому розроблений інтерфейс містить опцію вибору папки з радарними даними за цілий місяць, яка, у свою чергу, містить папки з даними за певні дні, кожна з яких містить 24-годинні записи вимірювань.

Після вибору папки за певний місяць програма будує графік зареєстрованих інтенсивностей дощу для кожного доступного дня та години, що дозволяє зрозуміти, який файл радарних даних і який період спостереження дисдрометра доречно обрати для порівняння. Для додаткової впевненості щодо точності показань дисдрометра дисдрометри розміщують попарно в одному місці перпендикулярно один одному. Наступний етап попередньої обробки даних дозволяє вибрати показання двох дисдрометрів для одного і того ж заданого часу і розрахувати функцію взаємної кореляції цих приладів на основі зареєстрованих спектрів діаметрів і швидкостей крапель дощу. Якщо кореляція між двома дисдрометрами вище певної встановленої межі, то з великою

ймовірністю таким даним можна довіряти, і тоді виконується порівняння показань одного з дисдрометрів і радара.

Далі необроблені дані з дисдрометра та радара з певною попередньою обробкою зчитуються з вибраних файлів даних. Дані дисдрометра представлено у вигляді 3-вимірного масиву з осями діаметра, швидкості та часу, у кожній клітинці якого зазначається зареєстрована кількість крапель. Радіолокаційна відбиваність кожної краплі розраховується за формулами теорії Мі за допомогою програмного пакета pytmatrix [16]. Згодом розраховується як повна відбивна здатність, так і спектр відбивної здатності для кожної швидкості краплі [11]. Ці дані порівнюються з радіолокаційними даними, де як загальна радіолокаційна відбиваність Z_{rad} [dBZ] так і допплерівський спектр [dBZ/(m/s)] уже записані у файлі даних після деякої попередньої обробки відбитого сигналу. Крім того, розроблений інтерфейс надає можливість включати компенсацію часового зсуву зареєстрованих значень, який відбувається через різницю у висотах радіолокаційного обєму і чутливого елементу дисдрометра під час вимірювань. Для висоти близько 240-250 метрів цей часовий зсув, який розраховується за максимумом взаємної кореляційної функції значень відбивної здатності радара і дисдрометра, зазвичай становить 60-80 секунд.

Інтерфейс програмного забезпечення містить декілька вкладок, які дозволяють порівнювати показники дисдрометра та радара, зокрема графіки радіолокаційної відбиваності, інтенсивності дощу, допплерівської швидкості, ширини спектра, середнього значення допплерівської швидкості, розподілу крапель за розмірами та інші. Окремі функції передбачено для врахування або неврахування ослаблення радіолокаційного сигналу в краплях дощу і газах атмосфери, а також ефекту зменшення діаметра краплі через випаровування під час падіння з певної висоти.

Крім того, розроблений програмний засіб дозволяє переглядати на окремій вкладці дані з метеостанції, такі як графіки вологості, температури, атмосферного тиску, які також враховуються в розрахунках.

Методика експериментальних досліджень.

Розроблені математичні моделі, алгоритми обробки даних та інструмент аналізу використовуються в цьому дослідженні для першого аналізу можливостей калібрування хмарного радара, що працює на частоті 94 ГГц. У [17] за допомогою моделювання показано, що коефіцієнт відбиття крапель дощу на відстані 250 м становить у середньому 19 dBZ. Це усереднене значення є результатом комбінованих ефектів екстинкції та розсіювання за типом Мі і є дійсним в діапазоні інтенсивності дощу від 3 до 10 мм/год.

Тому методологія одного з підходів полягає у виборі значень радіолокаційної відбиваності дощу, що відповідає висоті приблизно 250 м у випадку отримання вертикальних профілів. Крім того, дані про інтенсивність дощу, надані метеостанцією, вибираються в діапазоні від 3 до 10 мм/год, забезпечуючи остаточний вибір часових інтервалів для даних радіолокатора хмарності. З таким діапазоном інтенсивності дощу дані хмарного радара ще не зазнають критичного загасання.

Щодо дисдрометра, який є наземним нерадіолокаційний приладом, що використовується як джерело «істинних» даних, такий режим інтенсивності дощу запобігає недооцінці обчисленого значення радіолокаційної відбиваності Z_{dis} через наявність багатьох дрібних крапель дощу, які не можуть бути виміряні дисдрометром.

Більше того, коли значення радіолокаційної відбиваності хмарного радіолокатора Z_{rad} показує усереднене значення близько 19 dBZ, в той час як усереднений обчислений коефіцієнт відбивності дисдрометра Z_{dis} демонструє значне відхилення від цього номінального значення 19 dBZ, ми можемо повторно перевірити дані дисдрометра та їх обробку, зокрема розподіл крапель за розмірами, щоб обчислити коефіцієнт відбиття на 94 ГГц з урахуванням усіх втрат і невідповідностей, які обговорювалися вище. Результати дослідження представляються як діаграми розсіювання між даними хмарного радара, зокрема Z_{rad} і обчисленою відбиваністю за даними дисдрометра Z_{dis} разом із супровідною статистикою.

Деякі результати.

Ми проаналізували часові профілі відбивної здатності дощу та дані допплерівського спектру, використовуючи одногодинну вибірку. Як приклад, спектрограми з 12:00 до 13:00 2 листопада 2021 року, виміряні радаром 94 ГГц та дисдрометром, представлені на рис. 1 та рис. 2 відповідно. Уздовж осі абсцис відкладено час спостережень (UTC = всесвітній координований час, фактично час за Гриневичем), уздовж осі ординат відкладено радіальну швидкість крапель у метрах за секунду, а кольорова шкала відображає відповідну радіолокаційну відбиваність у dBZ. Ці спектрограми суттєво розрізняються за детальністю у часі, що викликано різною часовою роздільною здатністю: дані дисдрометра оновлюються один раз на хвилину, в той час як радарні дані оновлюються кожні три секунди.

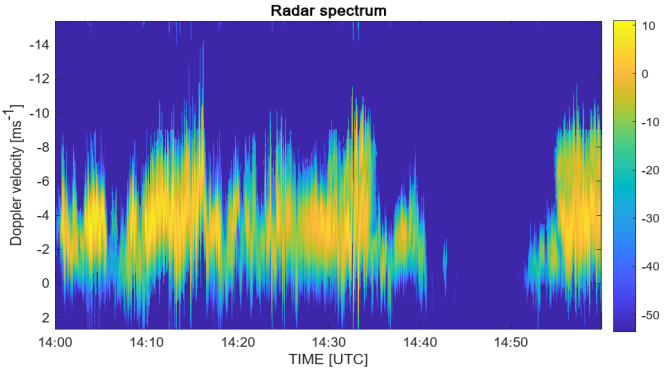

Рис. 1. Спектрограма допплерівського спектра, виміряного радаром W-діапазону.

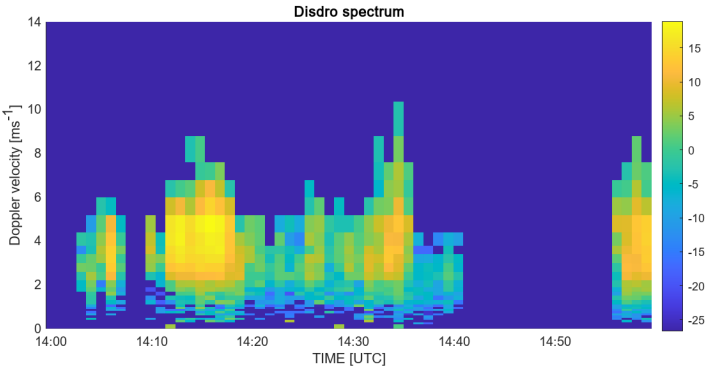

Рис. 2. Спектрограма швидкостей крапель, за даними дисдрометра.

На рис. 3 представлені діаграми розсіювання даних дисдрометра і хмарного радара, зокрема радіолокаційна відбиваність (Z_{dis} та Z_{rad}), середня допплерівська швидкість та ширина допплерівського спектру. Період аналізу становить одну годину, висота розташування об'єму роздільної здатності РЛС – близько 250 м, швидкість дощу – в інтервалі від 3 до 10 мм/год. Крім того, рис. 3 демонструє багатофункціональний дружній інтерфейс і широкі можливості аналізу великих даних, накопичених протягом тривалого періоду. Ці результати ілюструють можливість їх використання для порівняння даних, об'єднання даних і калібрування хмарного радара.

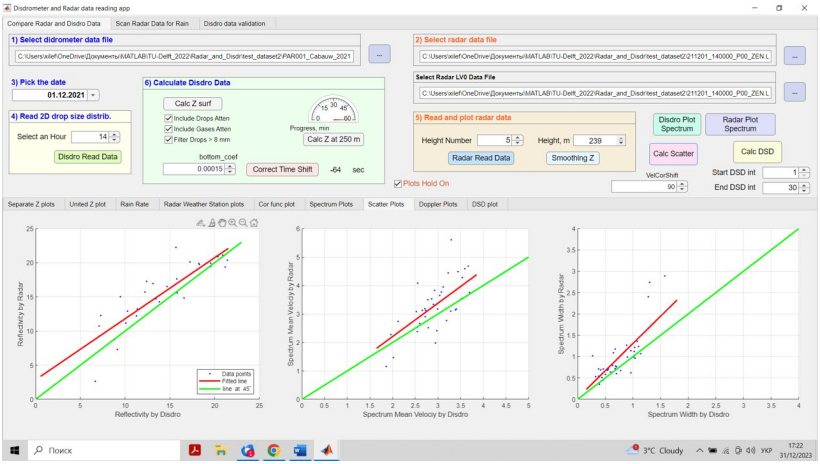

Рис. 3. Дружній інтерфейс та діаграми розсіювання вимірюваних величин «дисдрометр – радар»: радіолокаційні відбиваності, середні швидкості крапель та середньоквадратичні швидкості крапель за даними дисдрометра (вісь абсцис) і радара (вісь ординат). Зелена лінія показує ідеальну відповідність.

На рис. 4 показано послідовності радіолокаційної відбиваності виміряної радаром і обчисленої з даних дисдрометра (розподілу крапель за розмірами). Такий порівняльний підхід використовується не тільки для підтвердження ефективності калібрування, але також висвітлює обмеження пристроїв і тонкощі мікрофізики хмари/дощу, які здатні фіксувати радари W-діапазону. Дані радара зазвичай трохи більші, оскільки дисдрометр не чутливий до крапель < 0,3 мм, тоді як радар W-діапазону відчуває їх досить добре.

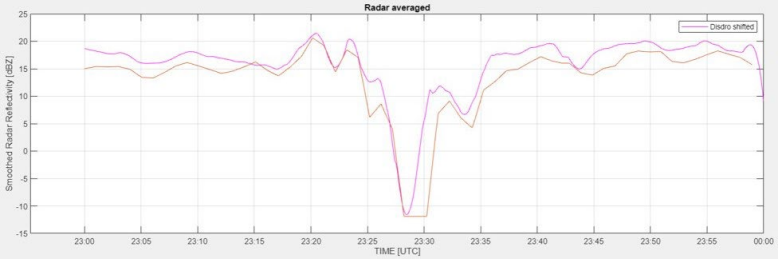

Рис. 4. Криві зміни у часі відбиваності за радаром W-діапазону (верхня крива) і розраховані з розподілу крапель з розмірами за даними дисдрометра.

Висновки.

Розроблено методику калібрування радіолокатора W-діапазону з використанням дисдрометрів, радіометрів та компактних метеорологічних станцій. Обговорено проблеми та показано шляхи їх вирішення. Розроблено зручне програмне забезпечення для порівняльного аналізу великої бази даних, яка містить дані радара W-діапазону та лазерного дисдрометра під час безперервних вимірювань характеристик дощів. Спеціалізоване програмне забезпечення використано як інструмент для коректного порівняння радіолокаційних відбиваностей, допплерівських спектрів, середніх та середньоквадратичних швидкостей крапель. Застосовуючи розроблений програмний інструмент, можна виконати статистичний аналіз з використанням доступних великих даних.

Реалізований метод Т-матриці, надає можливість обчислювати поляриметричні параметри з розподілу крапель з розмірами для порівняння їх з багатопараметричними радіолокаційними вимірюваннями. Це планується виконати протягом майбутніх досліджень, які включатимуть випадок похилого радіолокаційного зондування та доступних додаткових радіометричних даних.

References

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Bohren, C. F.; Huffmann, D. R. *Absorption and scattering of light by small particles*. New York: Wiley-Interscience, 2010, ISBN 978-3-527-40664-7

7. Felipe Toledo et al., “Absolute calibration method for frequency-modulated continuous wave (FMCW) cloud radars based on corner reflectors,” *Atmospheric Measurement Tech*, vol. 13, issue 12, 2020, pp. 6853-6875.

8. Ulrike Romatschke et al., “The NCAR Airborne 94-GHz Cloud Radar: Calibration and Data Processing,” *Data* 2021, 6(6), 66; https://doi.org/10.3390/data6060066

9. Lihua Li, Paul E. Racette, Gerald M. Heymsfield, and Lin Tian, Calibration of a 94 Ghz Airborne Cloud Radar Using Measurements from the Ocean Surface, *Goddard Earth Sciences and Technology Center*, https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/64142.pdf.

10. 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.

11. F. Yanovsky, A. Pitertsev, C. Unal, and H. Russchenberg, “Data fusion and processing tool for comparing rain reflectivity estimations using 94 GHz radar and laser disdrometer,” *International Conference on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering & Electronic Systems*, COMCAS 2024, Tel Aviv, Israel, 9-11 Jul. 2024, 6 pp.

12. N. Küchler et al, “A W-Band Radar–Radiometer System for Accurate and Continuous Monitoring of Clouds and Precipitation,” *J. Atmospheric and Oceanic Tech,* vol. 34, pp. 2375–2392, 2017.

13. https://www.radiometer-physics.de/products/microwave-remote-sensing-instruments/94-ghz-fmcw-doppler-cloud-radar/#tabs-container-5

14. A. Tokay, D. B. Wolff, and W. A. Petersen, “Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT parsivel^2,” *J. Atmos. and Oceanic Tech,* vol. 31, no. 6, pp. 1276–1288, 2014.

15. OTT Parsivel² - Laser Weather Sensor, ott.com/products/ meteorological-sensors-26/ott-parsivel2-laser-weather-sensor-2392/productAction/outputAsPdf/

16. JLeinonen/PyTMatrix. A Python code for computing the scattering properties of homogeneous nonspherical scatterers with the T-Matrix method. https://github.com/jleinonen/pytmatrix

17. 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. Atmos. and Oceanic Tech,* vol. 20, pp. 572–580, 2003.