

DOI: 10.18372/2310-5461.71.21436

УДК 551.508.4:621.396.96-52:621.317.39(045)

Ф. Й. Яновський, д-р техн. наук, проф.,

Національний університет «Київський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0002-9529-5969>

email: feliks.yanovskyi@npp.kai.edu.ua;

О. А. Пітерцев, канд. техн. наук,

Національний університет «Київський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0001-7225-0867>

email: oleksandr.pitertsev@npp.kai.edu.ua;

Х. В. Й. Рушенберг (H.W.J. Russchenberg), PhD, проф.,

Делфтський технічний університет (TU Delft), Нідерланди

<https://orcid.org/0000-0002-1974-1445>

email: h.w.j.russchenberg@tudelft.nl;

К. М. Х. Уналь (C.M.H. Unal), наук. співроб.,

Делфтський технічний університет (TU Delft), Нідерланди

<https://orcid.org/0009-0002-8073-8461>

email c.m.h.unal@tudelft.nl

СИСТЕМА БАГАТОЧАСТОТНИХ МІЛІМЕТРОВИХ РАДАРІВ АТМОСФЕРНОГО ЗОНДУВАННЯ: КАЛІБРУВАННЯ, УЗГОДЖЕНІСТЬ ТА ЗЛИТТЯ ДАНИХ

Вступ

Сучасний розвиток дистанційного зондування атмосфери характеризується переходом від використання окремих одночастотних радіолокаційних засобів [1], [2] до формування інтегрованих багаточастотних вимірювальних систем. У таких системах різні частотні канали мають розглядатися не як незалежні джерела інформації, а як елементи єдиної вимірювальної архітектури, що забезпечує підвищену інформативність, стійкість до похибок і можливість фізично обґрунтованої інтерпретації результатів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Особливої актуальності ця тенденція набуває у міліметровому діапазоні хвиль [3]. Радари К- (≈ 24 ГГц), Ка- (≈ 35 ГГц) та W- (≈ 94 ГГц) діапазонів сьогодні широко застосовуються для дослідження хмар, опадів, прикордонного шару атмосфери та мікрофізичних процесів еволюції гідрометеорів. На відміну від традиційних метеорологічних радарів сантиметрового діапазону, міліметрові системи працюють в умовах, коли довжина хвилі є сумірною з розмірами крапель дощу та частинок хмар, що призводить до суттєвого впливу нерелеївських і резонансних ефектів розсіювання.

Міліметрові радари характеризуються:

- підвищеною чутливістю до дрібнодисперсних частинок;
- значною і складною частотною залежністю ефективної площі розсіювання (ЕПР) крапель, зокрема зворотного розсіювання (коефіцієнтів зворотного розсіювання);
- істотним затушенням сигналу в дощі та атмосферних газах;
- зростаючою роллю температурної нестабільності елементів приймально-передавального тракту; підвищеними вимогами до точності абсолютного калібрування.

Ці особливості створюють передумови для побудови багаточастотних систем атмосферного зондування, в яких вимірювання на частотах 24, 35 і 94 ГГц взаємно доповнюють одне одного. У К-діапазоні переважає близький до релеївського режим розсіювання, Ка-діапазон є перехідним, а W-діапазон працює в умовах виражених нерелеївських ефектів та сильного затушення. Така частотна диференціація дозволяє аналізувати спектральну поведінку радіолокаційної відбиваності, підвищуючи інформативність щодо розподілу крапель за розмірами та фазового стану води.

© Ф. Й. Яновський, О. А. Пітерцев та інші, 2026

<https://jrn.kai.edu.ua/index.php/SBT>

Стаття поширюється на умовах CC BY 4.0

Однак реалізація потенціалу багаточастотної системи неможлива без забезпечення трьох ключових умов, а саме:

- 1) високоточного абсолютного калібрування кожного частотного каналу;
- 2) міждіапазонної узгодженості вимірювань;
- 3) інтеграції активних та пасивних вимірювальних засобів у рамках концепції злиття даних.

Проблема калібрування в міліметровому діапазоні

Абсолютне калібрування радіолокаційної відбиваності є основою кількісного застосування радіолокаційних даних [4], [5]. У міліметровому діапазоні навіть невеликі систематичні похибки (1–2 дБ) можуть призводити до суттєвих відхилень у відновлених мікрофізичних параметрах хмар і опадів. На відміну від радарів нижчих частот, у W-діапазоні неможливо нехтувати згасанням у газах атмосфери та впливом нерелеївського розсіювання, що ускладнює використання традиційних методів калібрування.

Додатковою проблемою є міждіапазонна неузгодженість. Навіть за умови індивідуального калібрування кожного радара можливі систематичні зміщення, зумовлені:

- різною температурною стабільністю апаратури;
- частотно-залежними втратами в обтічниках та хвилеводах;
- неточністю компенсації згасання;
- різною чутливістю до дрібної складової спектра розмірів крапель.

Таким чином, на відміну від попередньої роботи [6], присвяченої калібруванню радара W-діапазону, в цій статті йдеться не про калібрування окремого радара, а про оцінку міжінструментальної узгодженості та формування єдиної фізично узгодженої шкали відбиваності всієї багаточастотної системи.

Узгодженість як системна характеристика

Міждіапазонна узгодженість є ключовою характеристикою багаточастотної платформи. Вона передбачає, що відбиваність, виміряна на різних частотах, відповідає єдиній фізичній моделі розсіювання для одного й того самого об'єму атмосфери. Порушення цієї узгодженості може бути наслідком як апаратних похибок, так і некоректного врахування згасання або мікрофізичних ефектів.

Забезпечення узгодженості потребує інтегрованого підходу, що поєднує фізичне моделювання розсіювання, компенсацію втрат під час поширення хвиль та статистичний аналіз міжчастотних залежностей.

Концепція злиття даних

Ефективне функціонування системи багаточастотних радарів неможливе без залучення додаткових джерел інформації. У цьому контексті ключову роль відіграє концепція мультисенсорного злиття даних (data fusion), що передбачає об'єднання результатів активних і пасивних вимірювань.

Зокрема, використання лазерного дисдрометра дозволяє безпосередньо вимірювати спектр розмірів крапель і на його основі обчислювати еталонну радіолокаційну відбиваність за теорією Мі або методом Т-матриці. Мікрохвильовий радіометр забезпечує оцінку температурного профілю та газового згасання. Дані метеостанції уточнюють параметри середовища. Поєднання цих джерел створює фізично обґрунтовану основу для абсолютного калібрування та перевірки міждіапазонної узгодженості.

Постановка завдання та мета роботи

Розроблення системи багаточастотних міліметрових радарів з узгодженими шкалами вимірювань має важливе прикладне значення.

В авіаційній метеорології підвищується точність виявлення небезпечних хмарних утворень, зон обмерзання та інтенсивних опадів. У кліматичних дослідженнях зменшується систематична похибка довготривалих рядів спостережень, що критично важливо для параметризації хмар у чисельних моделях. У системах 5G/6G міліметрового зв'язку уточнюються моделі дощового згасання та поширення хвиль, що безпосередньо пов'язано з частотами 24–100 ГГц.

Таким чином, питання калібрування та узгодженості міліметрових радарів виходить за межі суто метеорологічної проблематики і набуває міждисциплінарного характеру.

Метою даної роботи є розроблення та експериментальна верифікація принципів побудови системи багаточастотних міліметрових радарів атмосферного зондування, що забезпечує фізично обґрунтовану міжінструментальну та міждіапазонну узгодженість вимірювань у K-, Ka- та W-діапазонах, а також інтеграцію багаточастотних радіолокаційних і наземних мікрофізичних даних у межах єдиної вимірювальної архітектури.

Особлива увага приділяється формуванню єдиної фізично консистентної шкали радіолокаційної відбиваності, в якій абсолютне калібрування окремих частотних каналів розглядається не як ізольована процедура, а як складова ширшого завдання забезпечення міжінструментальної узгодженості та мультисенсорної верифікації.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- 1) Проаналізувати фізичні особливості розсіювання, згасання та частотної залежності радіолокаційної відбиваності в K/Ka/W-діапазонах.

2) Розробити алгоритмічну процедуру обчислення оцінки радіолокаційної відбиваності за даними лазерного дисдрометра на основі виміряного розподілу крапель за розмірами з використанням теорії Мі та методу Т-матриці.

3) Реалізувати алгоритми компенсації затухання в дощі та атмосферних газах, випаровування крапель і часової затримки їх падіння між радіолокаційним об'ємом зондування та рівнем наземних вимірювань.

4) Виконати абсолютне калібрування окремих частотних каналів та забезпечити їх приведення до єдиної фізично узгодженої шкали відбиваності.

5) Дослідити міжінструментальну та міждіапазонну узгодженість вимірювань на основі статистичного аналізу часових рядів, кореляційних характеристик і доплерівських параметрів.

6) Оцінити прикладне значення отриманих результатів для задач авіаційної метеорології, кліматичних досліджень, дистанційного зондування атмосфери та моделювання поширення радіохвиль у системах зв'язку міліметрового діапазону.

Теоретичні основи багаточастотного міліметрового зондування та калібрування

Частотно-залежні механізми розсіювання в К/Ка/W-діапазонах. Фізичною основою радіолокаційного зондування атмосфери є розсіювання електромагнітних хвиль на гідрометеорах. Характер розсіювання визначається безрозмірним параметром розміру

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda}, \quad (1)$$

де r – радіус частинки, λ – довжина хвилі.

Якщо $x \ll 1$, розсіювання описується релеївським наближенням, у якому ефективна площа зворотного розсіювання краплі пропорційна шостій степені її діаметра (вважаємо краплю сферичною) $\sigma_b \propto D^6$.

У цьому режимі форма залежності $\sigma_b(D)$ є практично однаковою для різних частот, а частотна залежність визначається головним чином множителем λ^{-4} .

У сантиметровому діапазоні довжин хвиль умова $x \ll 1$ виконується для більшості атмосферних гідрометеорів, тому релеївське наближення є достатньо точним для опису процесів розсіювання. Проте в міліметровому діапазоні частот (24–94 ГГц) ця умова часто порушується. Для дощових крапель діаметром порядку 1–3 мм параметр розміру (1) наближається до одиниці або перевищує її, що призводить до переходу від релеївського до нерелеївського режиму розсіювання.

У такому випадку необхідно застосовувати більш точні електродинамічні моделі, зокрема теорію Мі [7] для сферичних частинок або метод Т-матриці [8] для частинок довільної форми.

Для ілюстрації цих особливостей на рис. 1 наведено розраховані за теорією Мі залежності ЕПР зворотного розсіювання сферичної водяної краплі від її діаметра для трьох характерних частот міліметрового діапазону – 24, 35 і 94 ГГц, що відповідають К-, Ка- та W-діапазонам і широко використовуються в сучасних метеорологічних радарних системах.

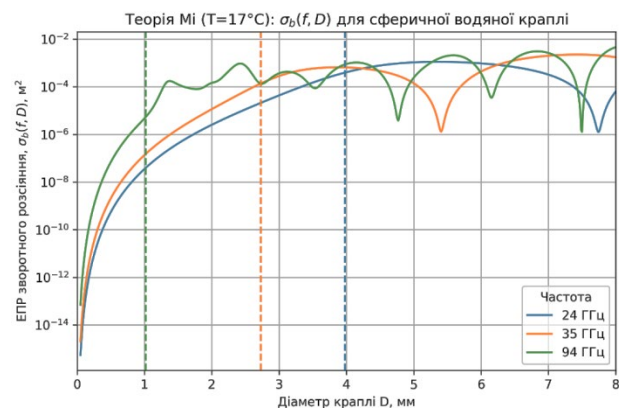


Рис. 1. Ефективна площа зворотного розсіювання водяної сферичної краплі $\sigma_b(f, D)$ як функція її діаметра, розрахована за теорією Мі для частот 24, 35 і 94 ГГц (температура води 17 °C)

На рис. 1 вертикальні пунктирні лінії відповідають умовній межі (для кожної кривої відповідно кольору) переходу від релеївського до нерелеївського режиму розсіювання ($x = \pi D/\lambda \approx 1$). З рис. 1 видно, що характер залежності $\sigma_b(D)$ істотно змінюється з частотою. У К-діапазоні (≈ 24 ГГц) для більшості дощових крапель діаметром до 2–3 мм параметр x залишається меншим за одиницю, тому розсіювання в цьому діапазоні є близьким до релеївського. Відповідна крива має гладкий монотонний характер, а відхилення від закону D^6 проявляються лише для крапель, більших за 4 мм (умовну межу показано на рисунку синьою пунктирною вертикальною лінією).

У Ка-діапазоні (≈ 35 ГГц) перехід до нерелеївського режиму відбувається при менших діаметрах. Для крапель діаметром понад 2 мм вже спостерігаються помітні відхилення від релеївської асимптоти, що відображає початок перехідного режиму розсіювання (оранжева пунктирна лінія в районі 2,7 мм). Перший помітний мінімум виникає приблизно біля $D \approx 5$ мм.

Найбільш виражені нерелеївські ефекти спостерігаються у W-діапазоні (≈ 94 ГГц). Для цієї частоти навіть краплі діаметром близько 1 мм знаходяться поблизу межі застосовності релеївського наближення (зелена пунктирна лінія). При подальшому збільшенні діаметра проявляються

характерні резонансні осциляції зворотного розсіювання Мі, пов'язані з інтерференцією хвиль, що розсіюються всередині та на поверхні частинки. В результаті залежність $\sigma_b(D)$ стає немонотонною – з'являються глибокі мінімуми (майже «провали» у кривих ЕПР. Фактично формується квазірезонансна структура, характерна для великих параметрів розміру x .

Таким чином, різні частоти міліметрового діапазону по-різному реагують на різні частини спектра розмірів гідрометеорів. Довші хвилі (К-діапазон) переважно характеризують інтегральні властивості опадів, тоді як коротші хвилі (W-діапазон) демонструють підвищену чутливість до структури розподілу крапель за розмірами. Саме ця частотна селективність розсіювання є фізичною основою багаточастотного радіолокаційного зондування атмосфери і дозволяє отримувати додаткову інформацію про мікрофізичні параметри опадів, тобто створює фізичну основу багаточастотного зондування.

Радіолокаційна відбиваність і роль розподілу розмірів крапель (DSD). Потужність відбитого сигналу на вході приймача радару, який працює на частоті f , визначається радіолокаційним рівнянням і є пропорційною питомій (по об'єму) ЕПР зворотного розсіювання середовища, що відбиває. У випадку метеорологічного радару це середовище складається з гідрометеорів, наприклад, крапель різних розмірів. Зазначена питома ЕПР, або коефіцієнт об'ємного зворотного розсіювання (volume backscattering coefficient) [2], може бути виражена як:

$$\eta(f) = \int_0^\infty \sigma_b(D, f) N(D) dD, \quad (2)$$

де $\sigma_b(D, f)$ – зворотна ЕПР окремої частинки (краплі) діаметра D на частоті f ; $N(D)$ – розподіл крапель за розмірами (drop size distribution, DSD).

Таким чином, саме величина $\eta(f)$ є фізичною характеристикою середовища, що визначає рівень прийнятої потужності. Залежність σ_b від частоти є особливо суттєвою в міліметровому діапазоні, де розміри частинок можуть бути співрозмірними з довжиною хвилі.

У випадку, коли виконується умова релеївського розсіювання ($D \ll \lambda$), зворотна ЕПР сферичної частинки визначається як:

$$\sigma_b(D, f) = \frac{\pi^5 |K(f)|^2}{\lambda^4} D^6, \quad (3)$$

де $\lambda = c/f$ – довжина хвилі, $K(f)$ – комплексний коефіцієнт, що залежить від діелектричної проникності частинки, частоти і температури.

Тоді підстановка (3) в (2) дає:

$$\eta(f) = \frac{\pi^5 |K(f)|^2}{\lambda^4} \int D^6 N(D) dD. \quad (4)$$

У зв'язку з цим вводиться радіолокаційний фактор відбиваності, або радіолокаційна відбиваність:

$$Z = \int D^6 N(D) dD, \quad (5)$$

що має розмірність $\text{мм}^6/\text{м}^3$. Іноді, коли це не викликає неоднозначності, зазначену величину Z називають просто «відбиваність».

Отже, в релеївському наближенні

$$\eta(f) \propto \frac{|K(f)|^2}{\lambda^4} Z. \quad (6)$$

У загальному випадку, зокрема на міліметрових хвилях, особливо в Ка- та W-діапазонах, співвідношення $\sigma_b(D, f) \propto D^6$ не виконується, і точний розрахунок σ_b потребує використання повних електромагнітних моделей (теорія Мі, метод Т-матриці) [7], [8].

Для забезпечення уніфікованого представлення результатів вимірювань незалежно від діапазону використовують еквівалентний релеївський фактор відбиваності

$$Z_e(f) = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K(f)|^2} \eta(f), \quad (7)$$

тобто таку величину, яка в релеївському режимі давала б ту саму питому (по об'єму) зворотну ефективну площу розсіювання $\eta(f)$.

У більшості прикладних задач дані представляють у логарифмічних одиницях dBZ:

$$\text{dBZ} = 10 \log_{10} Z_e(f), \quad (8)$$

де Z_e вимірюється в $\text{мм}^6/\text{м}^3$.

Важливо підкреслити, що у міліметровому діапазоні (Ка та W) величина $Z_e(f)$ зберігає стандартизовану форму подання результатів, однак її фізична інтерпретація відрізняється від класичного релеївського випадку. У цьому діапазоні ефективна площа зворотного розсіювання $\sigma_b(f, D)$ стає складною функцією діаметра частинки (див. рис. 1), і тому величина $Z_e(f)$ вже не зводиться до інтеграла $\int D^6 N(D) dD$. Саме ця частотна залежність розсіювання лежить в основі багаточастотного радіолокаційного підходу.

Рисунок 2 демонструє залежність багаточастотних радіолокаційних характеристик від форми спектра крапель.

Для ілюстрації ролі DSD у формуванні багаточастотного сигналу на рис. 2а (верхня панель) наведено приклад реального спектра крапель $N(D)$, отриманого за даними дисдрометра.

Використовуючи (2), можна обчислити $\eta(f)$ для робочої частоти кожного радару та, відповідно, еквівалентні $Z_e(f)$.

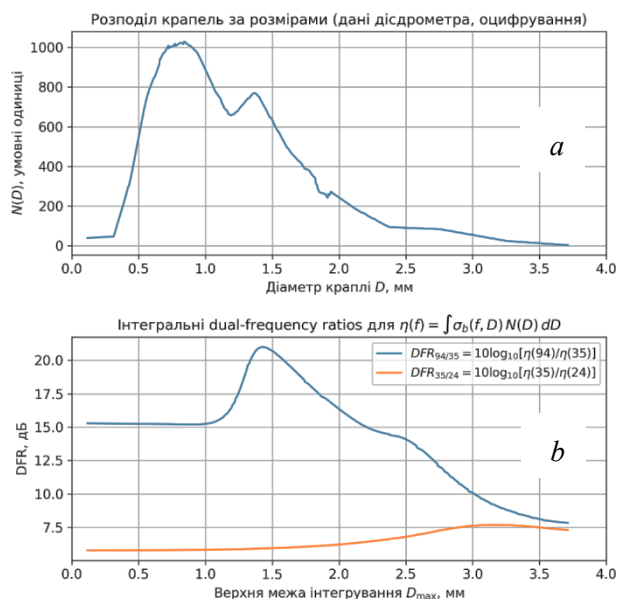


Рис. 2. Формування багаточастотного радіолокаційного сигналу для реального спектра крапель: *a* – приклад розподілу крапель за діаметрами $N(D)$, отриманого за даними дисдрометра; *b* – відповідні значення диференціальної відбивності між частотами $DFR_{94/35}$ та $DFR_{35/24}$, розраховані за інтегралом (2)

Оскільки абсолютні значення $Z_e(f)$ залежать не лише від форми спектра, а й від загальної концентрації крапель, у багаточастотному аналізі особливо інформативними є відношення сигналів на різних частотах, зокрема у вигляді двочастотних відношень (dual-frequency ratio – DFR):

$$DFR_{f_1/f_2} = 10 \log_{10} \frac{\eta(f_1)}{\eta(f_2)} = 10 \log_{10} \frac{Z_e(f_1)}{Z_e(f_2)}. \quad (9)$$

Результати розрахунку $DFR_{94/35}$ та $DFR_{35/24}$ для того ж самого реального DSD показано на рис. 2,б (нижня панель). Вони демонструють, що один і той самий спектр крапель формує різні «еквівалентні відбивності» у К-, Ка- та W-діапазонах, а саме різниця між $Z_e(f)$ (або між $\eta(f)$) на різних частотах несе інформацію про мікрофізичні параметри середовища, зокрема про форму спектра розмірів крапель.

Фізичний сенс частотної селективності зручно пояснювати через функції внеску (або «зважування») спектра:

$$w_f(D) = \sigma_b(f, D) N(D), \quad (10)$$

які показують, які саме діаметри роблять основний внесок у інтеграл (2) на певній частоті f .

На рис. 3 наведено криві $w_f(D)$ для частот 24, 35 та 94 ГГц.

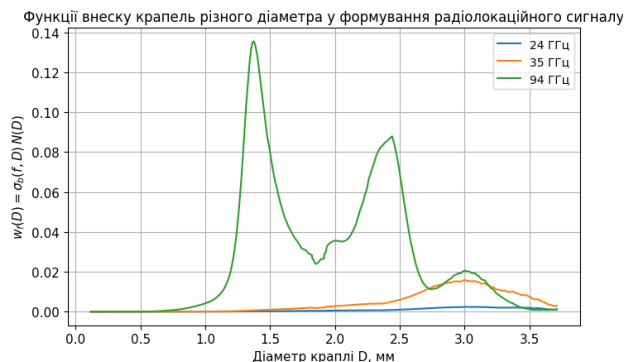


Рис. 3. Функції внеску крапель різного діаметра у формування радіолокаційного сигналу

Видно, що максимуми $w_f(D)$ для різних частот розташовані в різних діапазонах діаметрів: W-діапазон (94 ГГц) є найбільш чутливим до крапель порядку ~ 1 мм і сильніше реагує на нерелеївські ефекти, тоді як К- та Ка-діапазони «зважують» спектр більш плавно і зміщують максимум внеску до більших діаметрів. У цьому сенсі багаточастотна радарна система діє як набір спектральних фільтрів за діаметром крапель, кожен з яких підкреслює іншу частину DSD.

Отже, аналіз частотної поведінки $Z_e(f)$ та DFR дозволяє:

- оцінити внесок дрібної та крупної складових спектра;
- виявити домінування певного діапазону розмірів;
- перевірити фізичну узгодженість багаточастотних вимірювань.

Водночас, для реалізації цього потенціалу необхідно забезпечити єдину абсолютну шкалу вимірювання Z_e (або η) на всіх частотах і коректно врахувати частотно-залежні ефекти поширення та ослаблення сигналу. Саме ці питання – калібрування, міжінструментальна та міждіапазонна узгодженість і злиття даних – розглядаються у наступних розділах.

Затухання хвиль у міліметровому діапазоні.

Однією з ключових особливостей міліметрових систем є суттєве затухання сигналу під час поширення в атмосфері. Повне ослаблення включає:

- 1) затухання в дощі (розсіяння плюс поглинання краплями);
- 2) затухання в атмосферних газах (переважно впливають кисень і водяна пара);
- 3) додаткові втрати в обтічниках та хвилеводах.

Питоме затухання в дощі можна подати як:

$$k(f) = \int_0^\infty \sigma_e(D, f) N(D) dD, \quad (11)$$

де σ_e – коефіцієнт екстинкції, або ЕПР для розсіювання вперед.

У W-діапазоні значення питомого затухання можуть досягати кількох дБ/км навіть при помірному дощі. На відміну від радарів нижчих частот, у цьому діапазоні також не можна нехтувати поглинанням у газах, особливо поблизу ліній резонансного поглинання кисню та водяної пари.

Таким чином, вимірювання відбиваності повинна бути скоригована з урахуванням двостороннього ослаблення (path-integrated attenuation, PIA):

$$Z_{corr}(r) = Z_{meas}(r) + 2 \int_0^r k(s) ds. \quad (12)$$

Без коректної компенсації затухання неможливо забезпечити міждіапазонну узгодженість.

Міждіапазонна узгодженість та передумови мультисенсорного злиття даних. У багаточастотній системі вимірювання виконуються в одному й тому самому об'ємі атмосфери, але на різних частотах. За умови коректного врахування розсіювання та затухання результати повинні узгоджуватися з єдиною моделлю DSD. Міждіапазонна узгодженість передбачає:

- відсутність систематичних зсувів між частотами;
- лінійну статистичну залежність між Z_K , Z_{Ka} та Z_W ;
- фізично пояснювану частотну різницю.

Порушення узгодженості може свідчити про:

- некоректне абсолютне калібрування;
- помилки компенсації затухання;
- нестабільність підсилення;
- частотно-залежні апаратні втрати.

Отже, аналіз міжчастотних співвідношень є інструментом контролю стану системи.

Для забезпечення фізично обґрунтованого калібрування необхідно мати незалежну оцінку параметрів розсіювачів. Таку інформацію надає лазерний дисдрометр, що безпосередньо вимірює розподіл крапель за розмірами DSD.

На основі DSD можна:

- обчислити еталонну відбиваність для кожної частоти за теорією Мі;
- визначити питомі коефіцієнти затухання;
- змодельовати частотну поведінку сигналу.

Мікрохвильовий радіометр дозволяє уточнити профіль температури та вологості, необхідний для розрахунку поглинання у газах атмосфери. Таким чином формується інтегрована модель «середовище – розсіювачі – радіолокаційний сигнал».

Концептуально це можна розглядати як задачу узгодження трьох моделей:

- 1) моделі розсіювання (Мі / T-матриця);
- 2) моделі поширення хвиль;
- 3) моделі апаратного тракту радара.

Лише при одночасному врахуванні всіх трьох складових можна забезпечити коректну роботу системи багаточастотних радарів.

Узагальнення теоретичних положень. Виконаний аналіз фізичних процесів поширення і розсіювання у K/Ka/W-діапазонах показує, що:

- частотна селективність розсіювання є джерелом додаткової інформації;
- затухання стає домінуючим фактором у W-діапазоні;
- навіть невеликі похибки калібрування можуть призвести до порушення міждіапазонної узгодженості;
- багаточастотна система потребує інтегрованого підходу до калібрування.

Отже, теоретичні передумови обґрунтовують необхідність розроблення системної методології калібрування та злиття даних, що розглядається далі.

Система багаточастотних міліметрових радарів та мультіінструментальна експериментальна платформа

Загальна архітектура системи. Досліджувана система є інтегрованою багаточастотною платформою атмосферного зондування, що об'єднує три міліметрові радіолокаційні канали – K-, Ka- та W-діапазонів – разом із допоміжними вимірювальними засобами. Всі прилади розміщені на спільному майданчику з мінімальною просторовою рознесеністю, що дозволяє вважати дані їх вимірювань просторово узгодженими в межах характерних масштабів неоднорідності дощу.

До складу платформи входять:

- радар K-діапазону (≈ 24 ГГц);
- подвійний радар Ka/W-діапазонів ($\approx 35/94$ ГГц);
- лазерний дисдрометр;
- мікрохвильовий радіометр;
- автоматична метеостанція.

Усі датчики працюють у безперервному режимі з синхронізованим записом даних. Узагальнену схему системи показано на рис. 4. Як видно з рисунку, система побудована за принципом: багаточастотні активні вимірювання (міліметровими радарми) $\rightarrow$ незалежна мікрофізична інформація від пасивних датчиків $\rightarrow$ моделювання розсіювання $\rightarrow$ корекція та узгодження $\rightarrow$ єдина калібрована шкала. На виході модуля попередньої обробки радарних даних формуються оцінки вимірюваної радіолокаційної відбиваності Z_{meas} кожного радара. В той же час на виході модуля мікрофізичного моделювання розсіювання з вимірюваних дисдрометром даних про розподіли крапель за розмірами (DSD) і за швидкостями падіння (fall velocity distribution, FVD), а також профілів температури (T) і вологості, розраховуються параметри розсіювання σ_b та σ_e і моделюються очікувані «еталонні» відбиваності Z_{ref} для кожної з трьох робочих частот радарів з урахуванням затухання в

дощі і газах тропосфери.

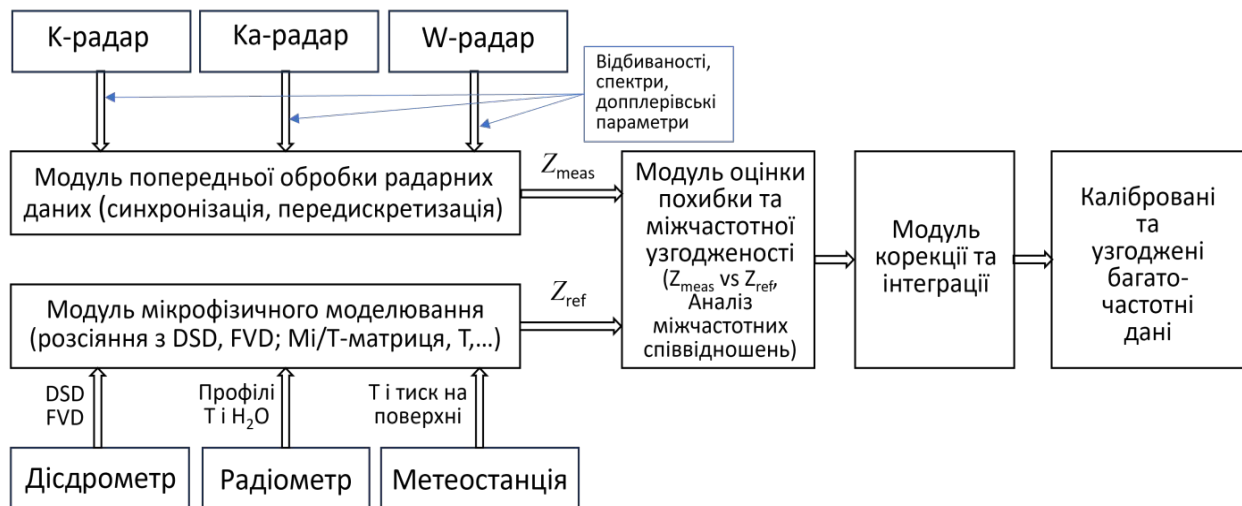


Рис. 4. Структурна схема системи багаточастотних міліметрових радарів та потоків даних у процесі злиття інформації

Радар К-діапазону (≈ 24 ГГц). У К-діапазоні використовується вертикально спрямований FMCW-прецизійний радар опадів Micro Rain Radar MRR-PRO [9], який забезпечує вертикальні профілі відбиваності в межах від 15 до 6000 м з високою часовою роздільною здатністю.

Особливості каналу:

- частота – 24,23 ГГц (K-band);
- роздільна здатність за висотою 10...500 метрів, в наших вимірюваннях – 35 м;
- роздільна здатність за швидкістю 5...600 см/с, у нас 15 см/с;
- ширина променя на рівні 3 дБ – $1,5^\circ$;
- інформація оновлюється кожні 10 секунд;
- висока стабільність підсилення;
- відносно помірне затушення в дощі;
- близький до релеївського режим розсіяння для більшості крапель.

Цей канал виконує роль еталонного щодо стійкості та мінімального впливу нерелеївських ефектів, що важливо при аналізі міждіапазонної узгодженості.

Двочастотний хмарний радар Ka/W-діапазонів ($\approx 35/94$ ГГц). Ka/W-радар RPG Radiometer Physics [10] є двочастотною когерентною системою з частотами приблизно 35 та 94 ГГц. Конструктивно два радіолокаційні канали інтегровані в єдиному апаратурному комплексі, що зменшує геометричні невідповідності та забезпечує синхронність вимірювань. Обидва канали забезпечують вимірювання радіолокаційної відбиваності, доплерівської швидкості, ширини спектра.

Подвійна конфігурація дозволяє безпосередньо порівнювати частотну поведінку сигналу в одному й тому самому об'ємі атмосфери.

Ka-канал (≈ 35 ГГц). Для цього каналу характерним є перехідний режим розсіяння, підвищена чутливість до дрібніших крапель порівняно з К-діапазоном, помірне затушення, компроміс між стабільністю та інформативністю.

Критичні параметри:

- Центральна частота 35 ГГц ($\lambda=8,6$ мм) ± 10 МГц (допуск);
- Смуга пропускання 100 МГц;
- Коефіцієнт підсилення антени: $47,5 \pm 0,5$ дБ;
- Ширина променя (3 дБ): $0,85 \pm 0,05^\circ$;
- Дальність дії: від 100 м до 10 км (типово), мінімум 50 м;
- Вертикальна роздільна здатність: тип. 15–30 м (можливе зниження до 4 м для обмеженого діапазону висот), в наших експериментах – 30 м.

Оновлення інформації (повні профілі) ≥ 1 секунда (у нас – 3 секунди);

Роздільна здатність за швидкістю ± 4 см/с або краще.

W-канал (≈ 94 ГГц). Для цього каналу характерним є виражений нерелеївський режим, висока чутливість до дрібнодисперсних частинок, суттєве затушення в дощі та газах, підвищені вимоги до компенсації втрат.

Критичні параметри:

- Центральна частота 94 ГГц ($\lambda=3,19$ мм) ± 30 МГц (допуск);
- Смуга пропускання 100 МГц;
- Коефіцієнт підсилення антени: $50,1 \pm 0,5$ дБ;
- Ширина променя (3 дБ): $0,56^\circ \pm 0,03^\circ$;
- Дальність дії: від 100 м до 10 км (типово), мінімум 50 м;
- Вертикальна роздільна здатність: тип. 15–30 м (можливе зниження до 4 м для обмеженого діапазону висот), в наших експериментах – 30 м;

– Оновлення інформації (повні профілі) ≥ 1 сек. (у нас – 3 сек.);

Роздільна здатність за швидкістю $\pm 1,5$ см/с або краще.

Лазерний дисдрометр, мікрохвильовий радіометр та метеостанція. Лазерний дисдрометр OTT Parsivel² laser disdrometer [11], [12] встановлений на відстані кількох десятків метрів від радарів. Він безпосередньо оцінює:

- діаметр крапель,
- швидкість падіння,
- тип гідрометеорів.

Основні параметри:

- Довжина хвилі: 650 нм;
- Вимірювальна поверхня: 180 x 30 мм (54 см²);
- Номінальний діапазон вимірювання розміру крапель: 0,2 ... 8 мм (реально – від 0,3 мм);
- Номінальний діапазон вимірювання швидкості частинок: 0,2 ... 20 м/с;
- Класифікація: 32 класи розміру та 32 класи швидкості.

Дані дисдрометра формують матрицю розподілу «розмір–швидкість» з часовою дискретністю порядку однієї хвилини.

У системі дисдрометр виконує роль незалежного джерела мікрофізичної інформації для оцінювання міжінструментальної узгодженості та уточнення шкали відбиваності.

Мікрохвильовий радіометр серії RPG-NATPRO-G5 [13] розташований поруч з радаром використовується для безперервного профілювання атмосфери і забезпечує термодинамічну інформацію вздовж радіолокаційного променя. Він дає безперервні оцінки профілю температури, вологості та водяної пари в стовпі атмосфери.

Ця інформація використовується для розрахунку газового затухання в Ka- та W-діапазонах та характеристику умов поширення відповідно до рекомендованих моделей поширення радіохвиль [14], [15].

Автоматична метеостанція розташована безпосередньо поруч з двочастотним Ka/W-радаром. Метеостанція вимірює інтенсивність опадів, температуру повітря, тиск, відносну вологість, швидкість і напрям вітру на рівні розташування, тобто біля земної поверхні.

Ці параметри необхідні для:

- розрахунку випаровування крапель;
- уточнення діелектричних властивостей води;
- коректного моделювання поширення хвиль.

Геометрія вимірювань та синхронізація. Під час проведення експериментів усі радари працювали в режимі вертикального зондування. Вибір вертикальної геометрії зменшує вплив неоднорідності поля опадів та спрощує компенсацію затухання.

Оскільки дисдрометр розташований на поверхні землі, а радар аналізує об'єм на певній висоті (здебільшого вибирався радіолокаційний об'єм на рівні приблизно 250 м), виникає необхідність:

- корекції часової затримки падіння крапель;
 - врахування можливого випаровування протягом часу падіння;
 - гармонізації часової дискретності.
- Синхронізація даних виконується шляхом:
- приведення всіх часових рядів до спільної часової шкали;
 - використання взаємної кореляції для визначення оптимального зсуву;
 - агрегації високочастотних радарних вимірювань до масштабу дисдрометра.

Архітектура обробки даних. Система обробки даних реалізована в середовищі MATLAB/Simulink і включає такі модулі:

- 1) Імпорт та синхронізація даних;
- 2) Фільтрація та відбір дощових сцен;
- 3) Обчислення еталонної відбиваності за теорією Мі / Т-матриці;
- 4) Розрахунок затухання (дощ плюс газ);
- 5) Компенсація часової затримки та випаровування;
- 6) Абсолютне калібрування кожного частотного каналу;
- 7) Аналіз міждіапазонної узгодженості;
- 8) Побудова статистичних та спектральних характеристик.

Таким чином, експериментальна платформа є не лише сукупністю приладів, а інтегрованою вимірювально-аналітичною системою, що забезпечує повний цикл – від реєстрації сигналу до узгодженого багаточастотного результату.

Методологія абсолютного калібрування та забезпечення міждіапазонної узгодженості

Загальна концепція методології та вибір калібрувальних дощових сцен. Методологія побудована на поєднанні трьох взаємопов'язаних складових:

- 1) фізично обґрунтоване моделювання розсіювання на основі вимірюного розподілу крапель за розмірами (DSD);
- 2) компенсація втрат під час поширення хвиль (затухання в дощі та газах атмосфери);
- 3) статистичне узгодження багаточастотних вимірювань у межах єдиної абсолютної шкали.

На відміну від традиційних методів, що базуються на стандартних відбивачах або внутрішніх еталонних сигналах, використано підхід, що використовує дощ як природну розподілену еталонне середовище з високим рівнем сигнал/шум та відомими мікрофізичними характеристиками.

Для забезпечення коректності абсолютного калібрування відбір фрагментів даних здійснюється за такими критеріями:

- вертикальне зондування;
- відсутність змішаної фази (тобто дощ, а не сніг або град);
- достатній рівень сигнал/шум у всіх трьох діапазонах;
- відносна стаціонарність DSD протягом обраного інтервалу;
- відсутність аномальних збурень (поривчастий вітер, сильна турбулентність).

Використання природної дощової сцени дозволяє оцінювати повний тракт «передавач – середовище – приймач», що відповідає зовнішньому калібруванню.

Методика абсолютного калібрування на основі мікрофізичного моделювання. Абсолютне калібрування багаточастотної системи виконується шляхом порівняння вимірної та модельної об'ємної зворотної ефективної площі розсіювання для однієї й тієї самої дощової сцени.

Розрахунок модельної об'ємної зворотної ефективної площі розсіювання. Для кожної частоти f на основі вимірного розподілу крапель за розмірами $N(D)$ обчислюється модельна величина:

$$\eta_{ref}(f) = \int \sigma_b(D, f) N(D) dD, \quad (13)$$

де $\sigma_b(D, f)$ визначається за допомогою повних електромагнітних моделей розсіювання (теорія Мі або метод Т-матриці).

У розрахунках враховуються:

- частотна залежність комплексної діелектричної проникності води;
- температурні параметри середовища;
- поправки на форму частинок (за необхідності).

Після цього виконується нормалізація до еквівалентного релєвського фактора відбиваності:

$$Z_{e,ref}(f) = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K(f)|^2} \eta_{ref}(f), \quad (14)$$

що забезпечує представлення результатів у стандартизованих одиницях $\text{мм}^6/\text{м}^3$.

Обробка вимірних радарних даних. Для кожного радарного каналу після попередньої обробки (синхронізація, компенсація затухання, усунення апаратних ефектів) визначається виміряна величина

$$Z_{e,meas}(f), \quad (15)$$

яка також інтерпретується як еквівалентний релєвський фактор відбиваності.

Таким чином, для кожної частоти формується пара величин:

$$Z_{e,meas}(f) \text{ та } Z_{e,ref}(f) \quad (16)$$

визначених у одній і тій самій шкалі.

Оцінка калібрувальної поправки. Калібрувальна похибка для частоти f визначається як різниця в логарифмічній шкалі:

$$\Delta Z(f) = Z_{e,meas}(f) - Z_{e,ref}(f). \quad (17)$$

Систематичне зміщення оцінюється за ансамблем дощових сцен, що відповідають критеріям однорідності та стаціонарності.

Калібрувальна поправка для відповідного каналу визначається як середнє значення $\Delta Z(f)$ по вибірці:

$$C(f) = \langle \Delta Z(f) \rangle. \quad (18)$$

Після внесення поправки

$$Z_{e,corr}(f) = Z_{e,meas}(f) - C(f), \quad (19)$$

досягається узгодження вимірної та модельної відбиваності в середньому по ансамблю сцен.

Особливості для міліметрових діапазонів. У Ka- та W-діапазонах відхилення від релєвського режиму є суттєвими, тому величина $Z_e(f)$ не дорівнює інтегралу D^6 , а визначається через повну частотно-залежну ефективну площу розсіювання $\sigma_b(D, f)$.

Запропонований підхід забезпечує:

- коректне врахування частотної селективності розсіювання;
- узгоджене порівняння між різними діапазонами;
- метрологічно обґрунтоване визначення абсолютної шкали відбиваності.

Корекція фізичних факторів

Компенсація часової затримки. Оскільки дисдрометр вимірює краплі на поверхні, а радар – на висоті H , необхідно врахувати час падіння:

$$\tau = \frac{H}{v(D)}, \quad (20)$$

де $v(D)$ – швидкість падіння краплі.

Часовий зсув визначається методом взаємної кореляції часових рядів відбиваності радару та еталонної моделі.

Урахування випаровування. Під час падіння крапля може змінювати розмір. Корекція виконується шляхом перерахунку діаметра краплі на висоті H на основі моделі дифузійного випаровування з урахуванням температури та вологості [6].

У більшості випадків вплив цього чинника є невеликим, але для точного калібрування W-каналу його врахування підвищує узгодженість.

Компенсація затухання. Вимірну відбиваність можна скоригувати (12):

$$Z_{corr}(f, r) = Z_{meas}(f, r) + \text{PIA}(f, r), \quad (21)$$

де $\text{PIA} = 2 \int_0^r k(s) ds$, а $k(f)$ визначається шляхом інтегрування ЕПР розсіювання вперед σ_e (коефіцієнт екстинкції) по всім краплям згідно рівняння (11).

Саме скориговане значення використовується для порівняння з еталонною відбиваністю. Інший шлях, що призводить до аналогічного результату, полягає у корегуванні Z_{ref} замість Z_{meas} , віднімаючи від нього РІА.

Абсолютне калібрування окремих частотних каналів. Для кожного діапазону визначається систематичне зміщення:

$$\Delta Z(f) = \langle Z_{corr}(f) - Z_{ref}(f) \rangle. \quad (22)$$

Це зміщення інтерпретується як похибка коефіцієнта підсилення системи. Відповідний калібрувальний коефіцієнт вноситься до апаратурної або програмної моделі радара.

Процедура повторюється для багатьох дощових подій, що дозволяє оцінити стабільність підсилення у часі.

Забезпечення міждіапазонної узгодженості та злиття даних. Після індивідуального калібрування кожного каналу виконується аналіз міжчастотних співвідношень:

$$Z_K \text{ vs } Z_{Ka} \text{ і } Z_{Ka} \text{ vs } Z_W, \quad (23)$$

а також оцінюється статистична лінійна регресія між парами частот.

Узгодженість вважається досягнутою, якщо:

- середнє зміщення між каналами мінімізоване;
- коефіцієнт кореляції наближається до одиниці;
- залишкові відхилення узгоджуються з фізично очікуваною частотною поведінкою DSD.

За потреби застосовується ітеративна процедура уточнення коефіцієнтів калібрування з мінімізацією сумарної квадратичної похибки всієї системи.

Ключовою особливістю запропонованого підходу є інтеграція:

- радіолокаційних вимірювань (три частоти);
- мікрофізичних даних дисдрометра;
- термодинамічних даних радіометра;
- параметрів поверхневого шару атмосфери.

Таким чином формується узгоджена фізична модель, у якій калібрування кожного каналу перевіряється не лише статистично, а й фізично.

Підсумок методології. Запропонована методологія дозволяє:

- виконувати абсолютне калібрування в природних умовах;
- компенсувати частотно-залежне згущання;
- мінімізувати міждіапазонні зміщення;
- сформувати узгоджену багаточастотну шкалу відбиваності;
- створити основу для подальшого поляриметричного розширення системи.

Програмна реалізація та алгоритмічна структура системи

Загальні принципи програмної реалізації.

Реалізація методології багаточастотного калібрування та забезпечення міждіапазонної узгодженості виконана у середовищі MATLAB/Simulink. Вибір цієї платформи зумовлений:

- можливістю обробки великих масивів експериментальних даних;
- наявністю інструментів для чисельного моделювання розсіювання;
- зручністю реалізації модульної архітектури;
- розвиненими засобами статистичного аналізу та візуалізації.

Програмна система побудована за модульним принципом, що забезпечує розділення фізичних моделей, процедур синхронізації та статистичного аналізу.

Структура програмного комплексу. Алгоритмічна структура включає такі основні функціональні блоки:

- 1) Імпорт та попередня обробка даних;
- 2) Синхронізація часових рядів;
- 3) Формування DSD та мікрофізичних параметрів;
- 4) Моделювання розсіювання (Мі / Т-матриця);
- 5) Розрахунок згущання;
- 6) Компенсація фізичних ефектів;
- 7) Абсолютне калібрування;
- 8) Аналіз міждіапазонної узгодженості;
- 9) Статистична верифікація та візуалізація.

Така структура дозволяє відокремити фізичні моделі від процедур статистичної оптимізації та забезпечує можливість подальшого розширення системи.

Імпорт і гармонізація даних. Радарні дані зберігаються у форматі netCDF з часовою дискретністю порядку кількох секунд. Дані дисдрометра – з інтервалом 1 хвилина. Дані радіометра та метеостанції мають власні частоти оновлення.

На першому етапі виконується:

- автоматичне зчитування відповідних файлів;
- приведення часових міток до єдиної шкали UTC;
- перевірка повноти даних;
- усереднення радарних вимірювань до інтервалу дискретності дисдрометра.

Цей етап забезпечує узгодженість часової бази для подальшого аналізу.

Модуль моделювання розсіювання. На основі вимірюного розподілу крапель за розмірами формується масив діаметрів та концентрацій. Для кожного діаметра та кожної частоти обчислюються:

- коефіцієнт зворотного розсіювання;
- коефіцієнт екстинкції;

– частотна залежність ефективної площі розсіювання.

Обчислення реалізовані у вигляді окремої функції, що дозволяє:

- використовувати як сферичну модель (M_i), так і модель несферичних частинок (Т-матриця);
- варіювати комплексну діелектричну проникність залежно від температури;
- виконувати пакетну обробку великих масивів даних.

Результатом є масив еталонних відбиваностей $Z_{ref}(f, t)$ та питомих коефіцієнтів затухання.

Затухання, калібрування та міждіапазонна узгодженість. Модуль затухання включає:

- інтегрування питомого затухання вздовж шляху;
- додавання газового ослаблення, розрахованого за термодинамічними профілями;
- формування скоригованих значень відбиваності.

Алгоритм дозволяє окремо вмикати або вимикати: затухання в дощі; газове затухання; комбіновану компенсацію.

Це забезпечує можливість аналізу впливу кожного фізичного чинника.

Абсолютне калібрування реалізовано як процедура мінімізації середньої різниці між скоригованою радарною відбиваністю та еталонною моделлю.

Для кожної частоти визначається: середнє систематичне зміщення; стандартне відхилення; часовий дрейф підсилення.

Передбачено можливість: одноразового визначення коефіцієнта калібрування; оцінки стабільності за місячними або сезонними інтервалами; автоматичного оновлення коефіцієнтів.

Після індивідуального калібрування виконується статистичний аналіз міжчастотних співвідношень:

- побудова діаграм розсіювання;
- оцінка коефіцієнтів кореляції;
- визначення залишкових систематичних зсувів;
- лінійна регресія між парами частот.

За необхідності реалізується ітеративна процедура уточнення коефіцієнтів з урахуванням глобальної мінімізації сумарної похибки.

Візуалізація, масштабованість та перспективи розширення. Програмний комплекс забезпечує автоматичне формування:

- часових рядів відбиваності (усі частоти + еталон);
- спектрів доплерівських швидкостей;
- діаграм розсіювання для коротких подій та довготривалих періодів;
- статистики за місяць або сезон.

Передбачена можливість аналізу впливу окремих фізичних факторів шляхом їх поетапного увімкнення/вимкнення.

Архітектура програмної системи дозволяє:

- інтегрувати додаткові частотні канали;
- додати поляриметричні параметри;
- реалізувати автоматичний моніторинг стану калібрування;
- інтегрувати алгоритми машинного навчання для оптимізації параметрів.

Таким чином, програмна реалізація є не лише інструментом обробки експериментальних даних, а й основою для побудови повноцінної інформаційної системи багаточастотного атмосферного зондування.

Результати експериментальної перевірки та статистичний аналіз

Загальна характеристика використаних даних. Для експериментальної перевірки запропонованої методології використано багаторічний архів синхронізованих багаточастотних вимірювань К-, Ка- та W-діапазонних радарів, лазерного дисдрометра, мікрохвильового радіометра та метеостанції. Аналіз проводився як для окремих дощових подій тривалістю до 1 години, так і для довготривалих інтервалів (місячні вибірки).

Як тестовий випадок розглянуто дощову подію тривалістю близько однієї години.

На рис. 5 наведено часові залежності еквівалентної радіолокаційної відбиваності $Z_e(t)$, виміряної одночасно у трьох частотних діапазонах. На цьому ж графіку фіолетовим кольором показано також оцінку відбиваності за даними дисдрометра, який вимірював DSD і розраховував $Z(t)$ вбудованим програмним забезпеченням на основі моделі Релея згідно формули (5).



Рис. 5. Часові залежності еквівалентної радіолокаційної відбиваності Z_e дощу на висоті приблизно 250 м, виміряної одночасно у К-, Ка- та W-діапазонах протягом однієї години

Видно, що всі три криві мають загальну часову структуру, яка відображає еволюцію інтенсивності опадів: періоди наростання, максимуму та затухання дощу. Разом з тим спостерігаються суттєві відмінності між частотними каналами:

- абсолютні рівні відбиваності відрізняються, причому значення Z_e у W-діапазоні систематично менші порівняно з Ka- та K-діапазонами;
- форма сигналів не повністю збігається, особливо в області локальних максимумів;
- між каналами наявна суттєва часова неузгодженість, зокрема між каналом 24 ГГц і парою 35/94 ГГц.

Дані дисдрометра також неузгоджені за часом, за величинами ближчі до каналу 24 ГГц, а від'ємні величини відбиваності в dBZ замінені нулем, що є очевидною вадою вбудованого програмного забезпечення дисдрометра OTT Parsivel² [11].

Зазначені відмінності обумовлені поєднанням кількох факторів. По-перше, у міліметровому діапазоні суттєву роль відіграє двостороннє ослаблення сигналу в атмосфері, яке зростає з частотою і призводить до зниження вимірюваної відбиваності у W-діапазоні. По-друге, різні частоти по-різному реагують на спектр розмірів крапель через нерелеївський характер розсіяння. По-третє, залишкова неузгодженість у часі пов'язана з відмінностями у геометрії вимірювань, алгоритмах обробки та інерційності різних каналів.

Таким чином, рис. 5 ілюструє вихідний рівень узгодженості багаточастотних вимірювань і підкреслює необхідність подальших процедур синхронізації, компенсації ослаблення та приведення до єдиної фізично узгодженої шкали відбиваності.

Розрахунок відбиваності за даними дисдрометра. Для незалежної оцінки радіолокаційних вимірювань було використано дані дисдрометра, що забезпечують інформацію про розподіл крапель за розмірами $N(D, t)$. На основі цих даних було обчислено еталонні значення об'ємного коефіцієнта зворотного розсіяння:

$$\eta(f, t) = \int \sigma_b(f, D) N(D, t) dD, \quad (24)$$

а також відповідні значення еквівалентної відбиваності $Z_e^d(f, t)$ за даними оцінки DSD $N(D, t)$ для кожної частоти.

При розрахунках враховувались:

- частотно-залежні властивості зворотного розсіяння (на основі теорії Мі);
- втрати сигналу при поширенні, різні для кожної частоти;
- часові зсуви між рядами еквівалентної відбиваності, вимірюваної радаром $Z_e^r(t)$ і розрахованої

за даними дисдрометра $Z_e^d(t)$, викликані часом падіння крапель від місця розташування досліджуваного радіолокаційного роздільного об'єму на висоті до точки вимірювання дисдрометром на поверхні землі;

- можливі ефекти випаровування та трансформації спектра крапель.

Часові ряди $Z_e^d(t)$, показані на рис. 6 пунктиром, відображають очікувану поведінку відбиваності за умови повної узгодженості вимірювань і можуть використовуватися як незалежна опорна мікрофізична оцінка, отримана рівноправним інструментом.

Порівняння вимірюваних $Z_e^r(t)$ (суцільні лінії) та розрахованих $Z_e^d(t)$ (пунктир) дозволяє виявити та оцінити систематичні відхилення кожного частотного каналу. Аналіз показує, що після обробки згідно із запропонованими алгоритмами, що усувають часові неузгодженості, а також розраховують $Z_e^d(t)$ з вимірюваного дисдрометром DSD з урахуванням відхилення від апроксимації Релея, відповідність між пунктирними і суцільними кривими є досить хорошою, особливо для найбільш проблемної частоти 94 ГГц, завдяки урахуванню ослаблення сигналу дощем та газами атмосфери на шляху поширення сигналу.

Статистичний аналіз та оцінка узгодженості. Для кількісної оцінки узгодженості багаточастотних радіолокаційних вимірювань було виконано статистичне порівняння вимірюваної радаром еквівалентної відбиваності $Z_e^r(f, t)$ з дисдрометричною оцінкою $Z_e^d(f, t)$, розрахованою за даними вимірюваного розподілу крапель за розмірами $N(D, t)$ з використанням частотно-залежних моделей зворотного розсіяння та з урахуванням ослаблення сигналу в атмосфері.

При цьому дисдрометричні дані не розглядалися як абсолютний еталон, до якого необхідно примусово «підганяти» радіолокаційні вимірювання. Навпаки, Z_e^d використовувалась як незалежна мікрофізична опорна оцінка, що дозволяє аналізувати фізичну узгодженість між різними вимірювальними системами.

Залишкові відмінності між радарною та дисдрометричною відбиваністю можуть бути зумовлені не лише похибками калібрування радара, але й різною чутливістю приладів до дрібних крапель, відмінностями вимірювальних об'ємів, вертикальною неоднорідністю опадів, випаровуванням крапель під час падіння, а також обмеженнями самого дисдрометра Parsivel щодо реєстрації дрібнодисперсної фракції.

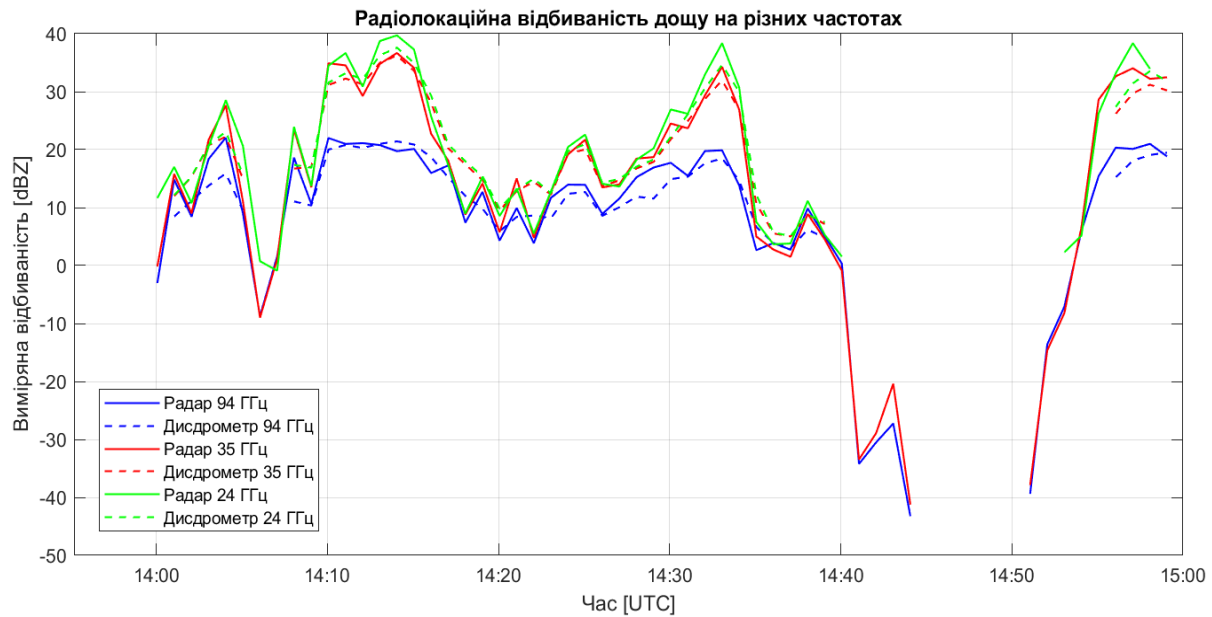


Рис. 6. Часові ряди очікуваної відбиваності, розраховані для різних частот за даними вимірювань розподілу крапель за розмірами за допомогою дисдрометра (пунктирні лінії) і відповідні дані радарних оцінок відбиваності (суцільні лінії). Кольором позначено частоти: 24 ГГц – зелений, 35 ГГц – червоний, 94 ГГц – синій

Для кожної частоти аналізувалася різниця

$$\Delta Z(f, t) = Z_e^r(f, t) - Z_e^d(f, t). \quad (25)$$

Під час статистичної обробки використовувалися лише фізично валідні відліки, для яких значення відбиваності були скінченними в обох часових рядах:

$$\text{isfinite}(Z_e^r) \wedge \text{isfinite}(Z_e^d), \quad (26)$$

тобто використовувалися лише ті моменти часу, для яких значення відбиваності були визначені одночасно як для радіолокаційних, так і для дисдрометричних даних.

Додатково виключалися випадки дуже слабких опадів, для яких похибки дисдрометричних оцінок суттєво зростають, а вбудоване програмне забезпечення дисдрометра замінює від'ємні значення відбиваності у dBZ на нульові значення. Саме така ситуація особливо виражена для W-діапазону, де області відсутності надійного дисдрометричного сигналу можуть призводити до методично некоректних оцінок зміщення. Тому для основного статистичного аналізу використовувався поріг

$$Z_e^d > 5 \text{ dBZ}. \quad (27)$$

На основі отриманих даних визначалися:

- середнє зміщення між радарною та дисдрометричною відбиваністю $\bar{\Delta Z}$;
- середньоквадратичне відхилення $\sigma_{\Delta Z}$;
- коефіцієнт кореляції між радарними та дисдрометричними даними $\rho_{Z_r Z_d}$;
- коефіцієнти кореляції між радіолокаційними каналами.

Результати статистичного аналізу наведено в таблиці 1. Вони показують, що найбільша міжінструментальна неузгодженість до корекції спостерігається у W-діапазоні (94 ГГц), де середня міжінструментальна різниця становить близько – 8 dB, а середньоквадратичне відхилення перевищує 10 dB. Це узгоджується з фізичними особливостями W-діапазону: значним двостороннім ослабленням у дощі, впливом газового поглинання, підвищеною чутливістю до дрібної фракції крапель і, головне, – нерелеївським характером розсіювання.

Таблиця 1

Результати статистичного аналізу узгодженості багаточастотних радіолокаційних вимірювань і розрахунків за даними дисдрометра

Статистична характеристика	Частота	Без корекції	Скореговані дані
Середня міжінструментальна різниця відбиваності за даними радара і дисдрометра $\bar{\Delta Z}$, dB	94 ГГц	-7,86	1,32
	35 ГГц	-2,03	0,68
	24 ГГц	0,03	1,07

Закінчення табл. 1

Статистична характеристика	Частота	Без корекції	Скореговані дані
Середньоквадратичне відхилення даних радарів і дисдрометра $\sigma_{\Delta Z}$, dB	94 ГГц	11,96	4,39
	35 ГГц	9,84	5,74
	24 ГГц	6,20	5,70
Коефіцієнт кореляції між даними радарів і дисдрометра $\rho_{Z_r Z_d}$	94 ГГц	0,522	0,731
	35 ГГц	0,661	0,878
	24 ГГц	0,856	0,897
Коефіцієнт кореляції між радіолокаційними каналами $\rho_{Z_{94} Z_{35}}$	94–35 ГГц	0,934	0,959
Коефіцієнт кореляції між радіолокаційними каналами $\rho_{Z_{24} Z_{35}}$	24–35 ГГц	0,462	0,942
Коефіцієнт кореляції між радіолокаційними каналами $\rho_{Z_{94} Z_{24}}$	94–24 ГГц	0,314	0,847

Для Ка-діапазону (35 ГГц) початкова неузгодженість також є суттєвою, однак після врахування частотно-залежного ослаблення та часового узгодження спостерігається помітне зменшення середнього зміщення і $\sigma_{\Delta Z}$, а коефіцієнт кореляції зростає. Це підтверджує ефективність запропонованої процедури корекції для середнього міліметрового діапазону.

У К-діапазоні (24 ГГц) початкова узгодженість є найкращою, що пояснюється значно меншим впливом атмосферного ослаблення та близькістю режиму розсіювання до апроксимації Релея. Для цього каналу корекція не призводить до принципової зміни характеру міжінструментальної різниці, однак дозволяє краще врахувати підвищену чутливість радарів до дрібнодисперсної фракції опадів та покращує загальну структурну узгодженість часових рядів.

Особливо показовими є результати для 94 ГГц після корекції: коефіцієнт кореляції між радарними та дисдрометричними даними суттєво зростає з 0.52 до 0.73, а середньоквадратичне відхилення зменшується з 11.96 до 4.39 dB. Одночасно усувається значне систематичне заниження відбиваності W-діапазонного каналу: середня міжінструментальна різниця змінюється від -7.86 dB до $+1.32$ dB.

Подальше додатне зміщення не слід трактувати як похибку калібрування радарів. Воно є фізично очікуваним і може бути пов'язане з більшою чутливістю W-діапазонного радарів до дрібнодисперсної фракції опадів, обмеженнями дисдрометра щодо реєстрації малих крапель, а також різницею між радіолокаційним вимірюванням у зондувальному об'ємі та локальним наземним вимірюванням дисдрометра.

Додатково аналіз коефіцієнтів кореляції між самими радіолокаційними каналами показує суттєве зростання міжчастотної узгодженості після

корекції, що підтверджує формування єдиної фізично узгодженої шкали відбиваності для багаточастотної системи. Таким чином, запропонований підхід слід розглядати не як просте «калібрування радарів за дисдрометром», а як процедуру забезпечення міжінструментальної консистентності та фізично обґрунтованого злиття багатовимірних даних, необхідного для подальшого використання таких систем у задачах метеорологічного моніторингу, кліматичних досліджень та високоточного дистанційного зондування атмосфери.

Отримані результати підтверджують, що основними джерелами міжінструментальної неузгодженості є частотно-залежне ослаблення сигналу, особливості нерелеївського розсіювання, відмінності вимірювальних об'єктів та обмеження дисдрометричного представлення DSD. Після врахування цих факторів спостерігається суттєве покращення міжчастотної узгодженості та формування взаємно узгодженого багаточастотного представлення відбиваності.

Аналіз доплерівських характеристик. Окрім інтегральної відбиваності, важливим критерієм фізичної узгодженості багаточастотних вимірювань є відповідність доплерівських характеристик сигналу, зокрема середньої доплерівської швидкості, ширини доплерівського спектра та форми спектрального розподілу потужності.

Зважаючи на це було виконано порівняння середніх швидкостей падіння гідрометеорів, оцінених за даними радарів у К-, Ка- та W-діапазонах, із відповідними швидкостями, розрахованими за вимірюванням дисдрометром розподілом крапель за розмірами. Оскільки усталена швидкість крапель безпосередньо пов'язана з їх діаметром, таке порівняння дозволяє незалежно перевірити не лише калібрування відбиваності, але й фізичну коректність відновленого спектрального складу опадів.

На рис. 7–9 наведено діаграми розсіяння для середньої швидкості, визначеної за даними радарів і відповідної оцінки за даними дисдрометра для частот 24, 35 та 94 ГГц відповідно. Зеленою лінією показано ідеальну залежність $y = x$, а червоною – лінію лінійної регресії за експериментальними даними.

Як видно з рис. 7–9, для всіх трьох частот спостерігається виражена позитивна кореляція між радарними та дисдрометричними оцінками швидкості. При цьому для 24 та 35 ГГц регресійні залежності мають більший нахил і кращу концентрацію точок поблизу лінії $y = x$, що свідчить про високу узгодженість середніх швидкостей у випадку помірних дощів.

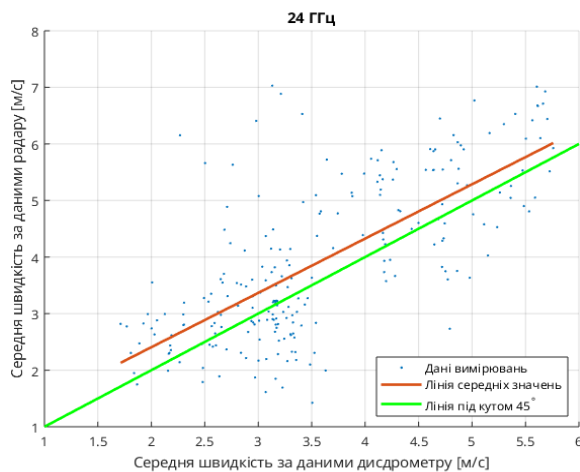


Рис. 7. Порівняння середньої доплерівської швидкості за даними радара 24 ГГц і відповідної оцінки за даними дисдрометра

Для 94 ГГц розкид точок є дещо більшим, що пояснюється підвищеною чутливістю W-діапазону до дрібнодисперсної фракції крапель, сильнішим впливом ослаблення сигналу та більшою чутливістю до турбулентних флуктуацій швидкості в досліджуваному об'ємі. Водночас навіть для цього каналу загальна тенденція залишається добре вираженою, а регресійна залежність є фізично узгодженою.

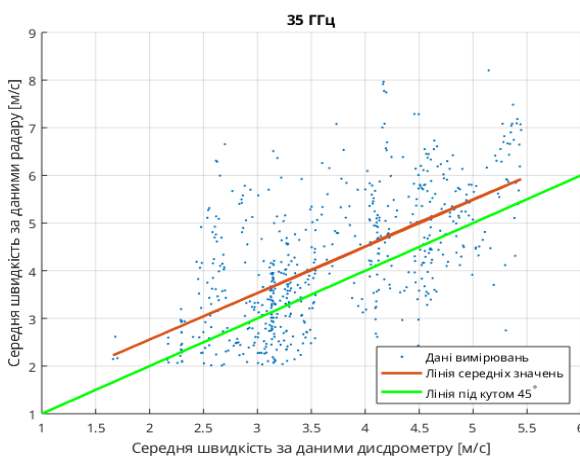


Рис. 8. Порівняння середньої доплерівської швидкості за даними радара 35 ГГц і відповідної оцінки за даними дисдрометра

Окремо аналізувалася ширина доплерівського спектра (RMS Doppler velocity), яка характеризує дисперсію швидкостей частинок у роздільному об'ємі радара. Було встановлено, що збільшення ширини спектра корелює з періодами інтенсивних опадів і підвищеної турбулентності, що узгоджується з одночасним зростанням відбиваності та середньої швидкості падіння крапель. Це додатково підтверджує фізичну узгодженість між спектральними та інтегральними характеристиками сигналу.

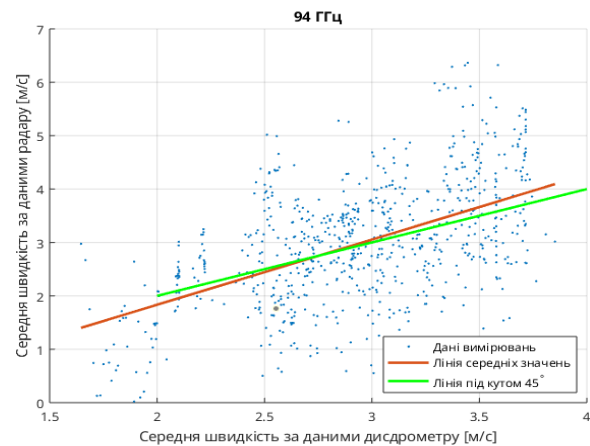


Рис. 9. Порівняння середньої доплерівської швидкості за даними радара 94 ГГц і відповідної оцінки за даними дисдрометра

Таким чином, аналіз доплерівських характеристик підтверджує, що після виконання часового узгодження, компенсації ослаблення та приведення відбиваності до єдиної фізично консистентної шкали узгоджуються не лише інтегральні значення $Z_e(t)$, але й структура доплерівських спектрів. Це є важливим підтвердженням коректності запропонованого підходу до міжінструментального узгодження багаточастотних радіолокаційних вимірювань.

Довготривала стабільність. Аналіз місячних вибірок показав:

- відсутність суттєвого дрейфу коефіцієнтів калібрування;
- стабільність міждіапазонних співвідношень;
- можливість використання системи для довготривалих кліматичних спостережень.

Це є важливим підтвердженням придатності методології для безперервного моніторингу.

Узагальнення результатів. Отримані результати демонструють, що багаточастотна радарна система забезпечує узгоджену інформацію про мікрофізичну структуру опадів лише за умови коректного врахування частотно-залежних ефектів. Використання даних дисдрометра як незалежного джерела інформації дозволяє:

- оцінити міжінструментальну узгодженість;

- оцінити вплив ослаблення сигналу;
- виявити часові зсуви між каналами.

Таким чином, поєднання багаточастотних радарних вимірювань із наземними спостереженнями та використання фізично обґрунтованих моделей розсіяння створює основу для побудови узгодженої системи дистанційного зондування атмосфери.

Експериментальна перевірка показала, що запропонована методологія дозволяє:

- зменшити систематичні зміщення в усіх трьох діапазонах;
- забезпечити фізично обґрунтовану міждіапазонну узгодженість;
- стабілізувати абсолютну шкалу відбиваності;
- створити основу для подальшого розширення до поляриметричного аналізу [16], [17].

Отримані результати підтверджують ефективність інтегрованого підходу «калібрування – узгодженість – злиття даних» у рамках системи багаточастотних міліметрових радарів.

Прикладне значення та технологічні перспективи

Значення для авіаційної метеорології. Підвищення точності та узгодженості вимірювань у K/Ka/W-діапазонах має безпосереднє значення для задач авіаційної метеорології та безпеки польотів. Міліметрові радары, особливо W-діапазону, демонструють високу чутливість до дрібнодисперсних гідрометеорів [18]. [19] і здатні виявляти області з підвищеною концентрацією переохолоджених крапель води, що є критичним фактором обмерзання літаків [20].

Узгоджена багаточастотна система дозволяє:

- точніше оцінювати вертикальну структуру опадів;
- виявляти зони інтенсивного затухання та турбулентності;
- аналізувати частотну поведінку сигналу як індикатор мікрофізичної структури хмар;
- зменшити невизначеність оцінки інтенсивності опадів.

Отримані результати можуть бути використані для валідації та вдосконалення алгоритмів обробки даних бортових метеорологічних радарів [21], які працюють у X- та Ka-діапазонах. Багаточастотна наземна система виступає в цьому випадку як фізично узгоджена верифікаційна платформа для дослідження фізичних процесів розсіяння та затухання.

Таким чином, забезпечення міжінструментальної узгодженості сприяє підвищенню достовірності інформації, що використовується для прийняття рішень у реальному часі в умовах складної метеорологічної обстановки.

Значення для кліматичних моделей та довготривалих спостережень. Однією з головних невизначеностей сучасних кліматичних моделей є параметризація хмар та пов'язаних з ними мікрофізичних процесів. Навіть невеликі систематичні похибки у вимірюванні радіолокаційної відбиваності можуть призводити до суттєвих похибок у реконструкції:

- вмісту рідкої води;
- розподілу крапель за розмірами;
- вертикального профілю опадів.

Запропонована система багаточастотного узгодження забезпечує:

- стабільну абсолютну шкалу відбиваності;
- фізично узгоджену частотну залежність сигналу;
- зменшення міжсезонних та міжрічних систематичних зсувів.

Особливу цінність має довготривала стабільність коефіцієнтів калібрування, продемонстрована в попередньому розділі. Це створює передумови для формування однорідних багаторічних рядів спостережень, необхідних для:

- валідації супутникових місій;
- уточнення параметризацій у чисельних моделях атмосфери;
- дослідження кліматичних трендів.

Міждіапазонна узгодженість є важливою умовою для коректного аналізу змін мікрофізичних характеристик хмар у довгостроковій перспективі.

Значення для систем 5G/6G та міліметрового зв'язку. Частотний діапазон 24–100 ГГц активно використовується та планується до розширення у системах мобільного зв'язку п'ятого та шостого поколінь [22]. У цьому діапазоні затухання в дощі та атмосферних газах є одним із ключових факторів, що обмежують дальність та надійність зв'язку.

Отримані в роботі результати мають значення для: уточнення моделей дощового затухання; валідації рекомендацій щодо поширення радіохвиль; моделювання сценаріїв gain fade; оцінки статистики інтенсивності ослаблення сигналу.

Фізичні механізми, що аналізуються у контексті радіолокаційного зондування (розсіяння, екстинкція, газове поглинання), є тими самими процесами, які визначають втрати у системах зв'язку міліметрового діапазону.

Багаточастотна система дозволяє експериментально досліджувати частотну залежність затухання в реальних атмосферних умовах, що може бути використано для вдосконалення моделей поширення сигналів у 5G/6G мережах.

Перспективи інтегрованих систем зв'язку та зондування. У сучасних концепціях розвитку бездротових систем активно обговорюється інтеграція функцій зв'язку та зондування (Integrated

Sensing and Communication, ISAC). У таких системах ті самі частотні ресурси використовуються як для передачі інформації, так і для отримання даних про навколишнє середовище.

Результати, отримані у цій роботі, демонструють можливість побудови узгодженої фізичної моделі розсіяння та згасання в міліметровому діапазоні, що є основою для:

- створення адаптивних каналів зв'язку з урахуванням атмосферних умов;
- використання інфраструктури зв'язку як сенсорної мережі;
- побудови цифрових моделей атмосфери в реальному часі.

Таким чином, система багаточастотних міліметрових радарів може розглядатися не лише як інструмент метеорологічного моніторингу, а й як компонент ширшої інфраструктури інтелектуальних бездротових мереж.

Узагальнення прикладного значення. Отримані результати підтверджують, що абсолютне калібрування окремих частотних каналів є лише складовою ширшого завдання побудови фізично узгодженої багаточастотної системи атмосферного зондування. Визначальне значення має насамперед міжінструментальна та міждіапазонна консистентність усієї вимірювальної архітектури.

Поєднання багаточастотних радіолокаційних спостережень з нерадарними даними, зокрема дисдрометрів і радіометрів, дозволяє зменшити невизначеність оцінки мікрофізичних параметрів опадів, підвищити достовірність відновлення радіолокаційної відбиваності та забезпечити стабільність довготривалих спостережень.

Практичне значення запропонованого підходу виходить за межі класичної радіолокаційної метеорології та охоплює задачі авіаційної безпеки, кліматичного моніторингу, супутникової валідації, а також моделювання поширення радіохвиль у системах зв'язку міліметрового діапазону та перспективних ISAC-платформах [23].

Таким чином, багаточастотні міліметрові радари слід розглядати не лише як інструмент спостереження, а як основу інтегрованих мультисенсорних платформ нового покоління для комплексного дистанційного зондування атмосфери.

Висновки

Отримані результати показали, що побудова системи багаточастотних міліметрових радарів атмосферного зондування в К-, Ka- та W-діапазонах потребує не лише абсолютного калібрування окремих каналів, а насамперед забезпечення фізично обґрунтованої міжінструментальної та міждіапазонної узгодженості вимірювань.

Запропонований підхід базується на поєднанні фізично обґрунтованого моделювання розсіяння, компенсації згасання під час поширення хвиль та мультисенсорного злиття даних, що дозволяє сформувати єдину узгоджену шкалу радіолокаційної відбиваності для багаточастотної системи.

Основні результати дослідження можна узагальнити таким чином:

1) Показано, що використання дощових сцен як природної розподіленої еталонної цілі дозволяє забезпечити абсолютне калібрування окремих частотних каналів та сформувати єдину міжчастотно узгоджену шкалу радіолокаційної відбиваності.

2) Реалізовано процедуру обчислення відбиваності за даними лазерного дисдрометра на основі вимірюного розподілу крапель за розмірами з використанням теорії Мі та методу Т-матриці, з урахуванням згасання в дощі, атмосферних газах, випаровування крапель і часової затримки їх падіння.

3) Встановлено, що найбільша початкова міжінструментальна неузгодженість спостерігається у W-діапазоні (94 ГГц), де вплив двостороннього ослаблення, нерелеївського розсіяння та підвищеної чутливості до дрібнодисперсної фракції є найбільш вираженим.

4) Після виконання корекції суттєво зростає кореляція між радарними та дисдрометричними даними, зменшується середньоквадратичне відхилення та формується фізично обґрунтована міжінструментальна узгодженість у всіх трьох частотних каналах.

5) Показано, що залишкова додатна різниця між радарною та дисдрометричною відбиваністю у W-діапазоні не повинна трактуватися як похибка калібрування, а є фізично очікуваним наслідком різної чутливості приладів до дрібної фракції крапель, відмінностей вимірювальних об'ємів та обмежень наземних дисдрометричних спостережень.

6) Аналіз доплерівських характеристик підтвердив, що після узгодження відновлюється не лише інтегральна відбиваність, але й фізично узгоджується структура доплерівських спектрів, що є важливим критерієм коректності багаточастотного підходу.

Отримані результати підтверджують, що запропонований підхід слід розглядати не як просте «калібрування радара за дисдрометром», а як процедуру забезпечення міжінструментальної консистентності та побудови фізично узгодженої мультисенсорної системи дистанційного зондування атмосфери.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] D. Atlas, "Advances in radar meteorology," in *Advances in geophysics*, Elsevier, vol. 10, January, 1964, pp. 317–478. DOI: 10.1016/S0065-2687(08)60009-6

- [2] R.J. Doviak and D.S. Zrnic, Doppler Radar and Weather Observations, *Accademic Press*, 1993. DOI: 10.1016/C2009-0-22358-0
- [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. 349–352, 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. DOI: 10.1201/9780849382284-12
- [5] J. Yin, P. Hoogetboom, 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: 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: 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. 269–276. 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: 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: 10.3390/rs13152936
- [12] N. Küchler, S. Kneifel et al, "A W-Band Radar Radiometer System for Accurate and Continuous Monitoring of Clouds and Precipitation," *J. Atmos. and Ocean. Tech*, vol. 34, 2017, pp. 2375–2392. DOI: 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: 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: 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. 572–580. DOI: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: 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: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., Рушенберг Х.В.Й., Уналь К.М.Х.
СИСТЕМА БАГАТОЧАСТОТНИХ МІЛІМЕТРОВИХ РАДАРІВ АТМОСФЕРНОГО
ЗОНДУВАННЯ: КАЛІБРУВАННЯ, УЗГОДЖЕНІСТЬ ТА ЗЛИТТЯ ДАНИХ

Зростаюче використання міліметрових радарів K-, Ka- та W-діапазонів вимагає фізично узгодженого багаточастотного калібрування та узгодження між приладами. У роботі розглянуто принципи побудови системи багаточастотних міліметрових радарів атмосферного зондування, що об'єднує K-, Ka- та W-діапазони в межах єдиної виміральної архітектури. Запропоновано методологію забезпечення міжінструментальної та міждіапазонної узгодженості на основі мультисенсорного злиття даних. Підхід базується на використанні дощових сцен як природної розподіленої еталонної цілі з обчисленням оцінки радіолокаційної відбиваності за даними дисдрометра із застосуванням теорії Мі та методу T-матриці, а також з урахуванням затухання в дощі та атмосферних газах.

Реалізовано алгоритми компенсації часової затримки падіння крапель, випаровування та двостороннього ослаблення сигналу. Показано, що після внесення корекцій досягається фізично обґрунтована міжчастотна узгодженість, зменшуються систематичні міжінструментальні зміщення відбиваності та покращується кореляція між радарними й дисдрометричними даними в усіх трьох частотних каналах. Проаналізовано також довготривалу стабільність міждіапазонних співвідношень і коефіцієнтів узгодження.

Отримані результати мають значення для авіаційної метеорології, кліматичних досліджень та удосконалення моделей поширення радіохвиль у системах зв'язку міліметрового діапазону (5G/6G). Запропонований системний підхід створює основу для розвитку інтегрованих багаточастотних платформ атмосферного зондування нового покоління.

Ключові слова: багаточастотні міліметрові радари, атмосферне зондування, міжінструментальна узгодженість, міждіапазонна консистентність, злиття даних, теорія Мі, дисдрометр, затухання в дощі, K/Ka/W-діапазони.

Yanovsky F., Pitertsev O., Russchenberg H.W.J., Unal C.M.H.
MULTIFREQUENCY MILLIMETER-WAVE RADAR SYSTEM FOR ATMOSPHERIC
SONDING: CALIBRATION, CONSISTENCY, AND DATA MERGE

The growing use of K-, Ka-, and W-band millimeter-wave radars requires physically consistent multi-frequency calibration and inter-instrument agreement. This paper presents the principles of designing a multi-frequency radar system for atmospheric remote sensing that integrates K-, Ka-, and W-band channels within a unified and physically consistent measurement architecture. A methodology for inter-instrument and interband consistency is proposed based on multi-sensor data fusion. The approach employs rain events as natural distributed reference targets, with disdrometer-based reflectivity estimates computed from measured drop size distributions using Mie theory and T-matrix methods, together with attenuation correction for rain and atmospheric gases.

Algorithms for compensating fall-time delay, drop evaporation, and two-way path-integrated attenuation are implemented. The results demonstrate that after applying these corrections, physically consistent interband agreement is achieved, systematic inter-instrument reflectivity offsets are reduced, and correlation between radar and disdrometer observations improves across all three frequency bands. The long-term stability of interband relationships and consistency coefficients is also analyzed.

The obtained results are relevant for aviation meteorology, climate research, and millimeter-wave propagation modeling in 5G/6G communication systems. The proposed integrated framework of “consistency – physical coherence – data fusion” provides a foundation for the development of next-generation multi-frequency atmospheric sensing platforms.

Keywords: multi-frequency millimeter-wave radar, atmospheric remote sensing, inter-instrument consistency, interband consistency, data fusion, Mie scattering, disdrometer, rain attenuation, K/Ka/W bands.

Дата першого надходження: 24.07.2026 р.

Дата прийняття до друку: 20.08.2026 р.

Дата публікації: 10.09.2026 р.