

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra27.01.038>
УДК 319.61.126

**А.М. ЛІНКОВА, А.А. МОГИЛА,
Г.О. РУДНЄВ, В.М. КАНЦЕДАЛ, С.І. ХОМЕНКО**

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна
E-mail: gannalinkova@gmail.com

ВАЛІДАЦІЯ ДИСТАНЦІЙНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДОЩУ, ЗАСНОВАНОГО НА ДВОЧАСТОТНОМУ РАДІОЛОКАЦІЙНОМУ ЗОНДУВАННІ

Предмет і мета роботи. Розроблення нових радіолокаційних методів вимірювання характеристик рідинно-крапельних опадів представляє значний інтерес для дослідження фізичних процесів у атмосфері та вирішення багатьох прикладних задач. Експериментальне дослідження таких методів у натурних умовах дозволяє визначити рамки їх застосовності та помилки відновлення параметрів дощу. Метою цієї роботи є оцінка ефективності раніше розробленого авторами методу, який засновано на параметризації функції розподілу крапель за розмірами, використанні усереднених даних контактних вимірювань трипараметричного гамма-розподілу параметрів залежно від інтенсивності дощу та на двочастотному дистанційному зондуванні опадів. Визначення ефективності запропонованого методу проводиться шляхом порівняння результатів його застосування з результатами вимірювання інтенсивності дощу з використанням наземного дощоміра.

Методи і методологія роботи. Методологія роботи заснована на порівнянні результатів вимірювання методом, що перевіряється, з результатами вимірювання, що отримані за допомогою еталонного методу.

Результати роботи. Проведено експериментальне дослідження двочастотного зондування рідинно-крапельних опадів на основі раніше розробленого алгоритму і за допомогою модернізованого двочастотного метеорадара МРЛ-1. Отримані результати показують, що запропонований алгоритм обробки даних двочастотного зондування рідинно-крапельних опадів дозволяє визначити інтенсивність дощу і оцінювати їх кількість.

Висновок. Інтенсивність дощу, що виміряна за допомогою метеорадара, має майже повний якісний та кількісний збіг з інтенсивністю, яку визначено за допомогою дощоміра. Запропонований авторами алгоритм обробки даних двочастотного зондування рідинно-крапельних опадів дозволяє визначити інтенсивність дощу та оцінювати кількість рідинно-крапельних опадів.

Ключові слова: обернена задача, двочастотне зондування, інтенсивність дощу, радар, дощомір.

Одним з напрямків дистанційного дослідження атмосфери є радіометеорологія, яка інтенсивно розвивається протягом останніх десятиліть. Її широке застосування обумовлене можливістю проводити вимірювання інтегральних характеристик метеообстановки за допомогою радарів на великих просторах, одночасно обробляти отрима-

ні дані та подавати результати у зручному для використання вигляді. Донині в мережі гідрометеорологічних станцій застосовується одночастотне радіолокаційне зондування, яке засноване на вимірюванні радіолокаційної відбиваності Z та її степеневій залежності $Z = AI^B$ від інтенсивності I рідинно-крапельних опадів. Однак результа-

Цит у в а н н я: Лінкова А.М., Могила А.А., Руднєв Г.О., Канцедал В.М., Хоменко С.І. Валідація дистанційного методу вимірювання характеристик дощу, заснованого на двочастотному радіолокаційному зондуванні. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т 27. № 1. С. 38—47. <https://doi.org/10.15407/rpra27.01.038>

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

ти вимірювань інтенсивності дощу, що засновані на цій методиці, мають значну дисперсію, оскільки коефіцієнт A може набувати значення у межах від 50 до 1 000, а коефіцієнт B — від 1 до 2,87. Проте на практиці коефіцієнти A і B залежать від параметрів розподілу крапель за розмірами (мікроструктурних параметрів дощу) і радіолокаційна відбиваність значною мірою залежить від типу розподілу крапель дощу за розмірами. Для вимірювання мікроструктурних характеристик опадів у статтях [1, 2] пропонувалося використовувати двочастотне радіолокаційне зондування, що дозволяє зменшити невизначеність оцінки виду степеневі залежності. При цьому найзручніше використовувати трипараметричний гамма-розподіл [3].

У статті [4] для вимірювання інтенсивності дощу було запропоновано методику, яку засновано

на використанні усереднених даних контактних вимірювань мікроструктурних параметрів трипараметричного гамма-розподілу крапель дощу за розмірами залежно від його інтенсивності [5] та на результатах обробки даних двочастотного зондування опадів. Для практичного застосування цієї методики необхідна перевірка очікуваного зв'язку її результатів з показниками інших методик, що вимірюють аналогічні характеристики.

Представлені у цій статті експериментальні дослідження присвячені оцінці ефективності двочастотного методу шляхом порівняння результатів радіолокаційного вимірювання інтенсивності дощу з даними наземного дощоміра. Сильна додатна кореляція їх результатів між собою може підтвердити валідність запропонованої методики.

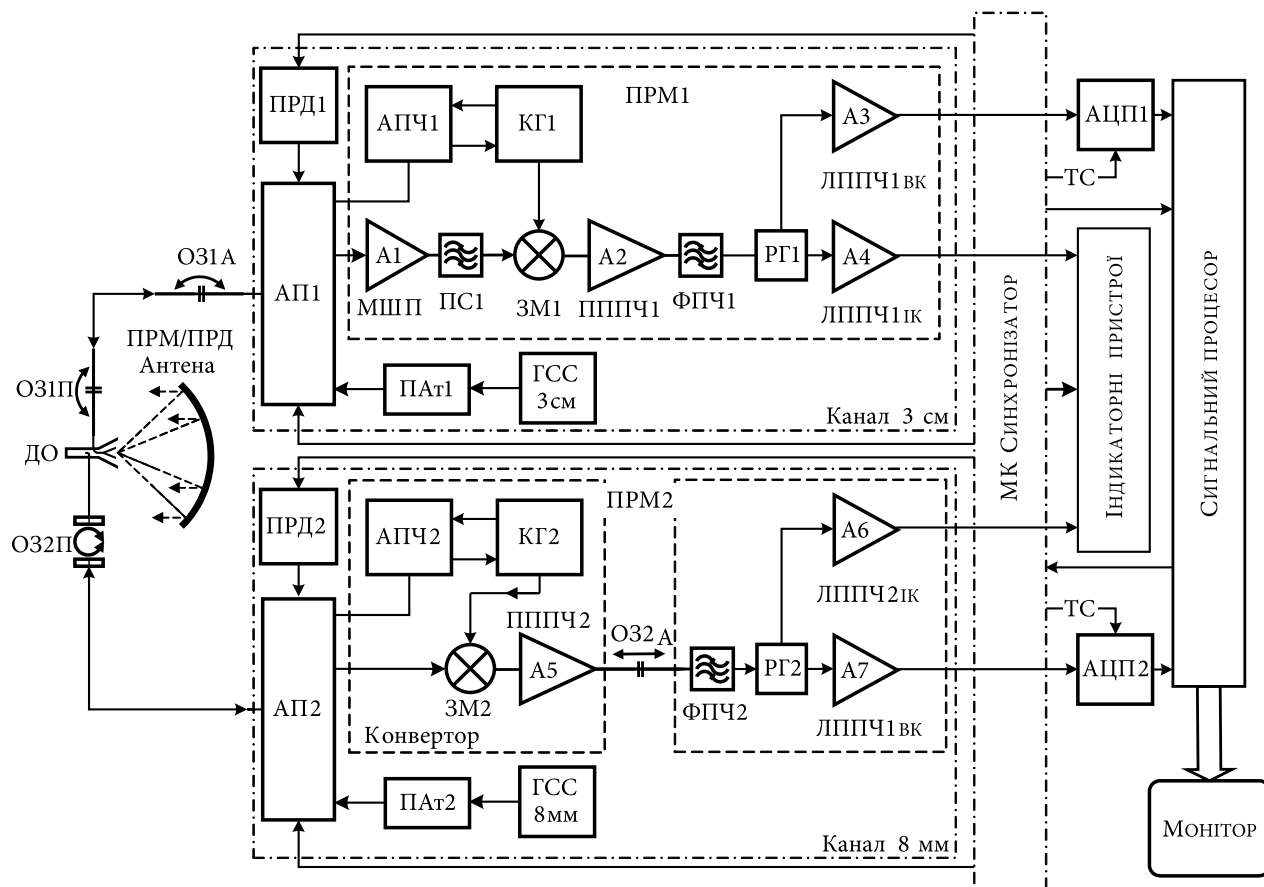


Рис. 1. Функціональна схема вимірювального двочастотного метеорадара МР-1: ДО — диплексерний опромінювач; O31A та O31П — обертове зчленування азимутальне та піднесення; ПРД/ПРМ Антена — приймально-передавальна антена; АП — антенний перемикач; ПРД — передавач; ПРМ — приймач; АПЧ — автоматичне підстроювання частоти; КГ — клістронний гетеродин; ЗМ — змішувач; МШП — малошумливий підсилювач; ПС — преселектор; ПАт — поляризаційний атенюатор; ПППЧ — попередній підсилювач проміжної частоти; ФПЧ — фільтр проміжних частот; РГ — розгалужувач; ЛППЧ1вк — логарифмічний підсилювач проміжної частоти вимірювального каналу; ЛППЧ1к — логарифмічний підсилювач проміжної частоти індикаторного каналу; МК — мікроконтролер; ТС — тактовий сигнал; АЦП — аналого-цифровий перетворювач

1. Апаратура двочастотного вимірювання інтенсивності дощу

Експериментальні дослідження проведено за допомогою модернізованого імпульсного двочастотного некогерентного метеорадара, побудованого на основі МРЛ-1 (рис. 1). Він складається з 3-сантиметрового (Канал 3 см) і 8-міліметрового (Канал 8 мм) каналів, що працюють на спільну приймально-передавальну антену (ПРД/ПРМ Антена), дуплексерного опромінювача (ДО), обертового зчленування (ОЗ1П та ОЗ1А на базі коаксіальної лінії та ОЗ2П на базі круглого хвилеводу), антенного перемикача (АП1 та АП2), передавачів (ПРД1 і ПРД2) і приймачів (ПРМ1 та ПРМ2) першого і другого каналів, синхронізатора та індикаторних пристроїв (індикатор кругового огляду, індикатор вимірювання висоти та індикатор типу А).

Сталість різниці частот зондувального сигналу та гетеродина у радарі забезпечує система автоматичного підстроювання частоти (АПЧ). Системи АПЧ1 та АПЧ2 у приймачах ПРМ1 і ПРМ2 виконано відповідно до частото-різницевої схеми з пошуком і окремим каналом перетворення та підсилення. Вихідні сигнали АПЧ1 та АПЧ2 використовуються для керування частотою клістронних гетеродинів КГ1 і КГ2, сигнали яких подаються на змішувачі каналів сигналу (ЗМ1 та ЗМ2) і змішувачі АПЧ.

Параметри вимірювального метеорадара

Параметр	Канал	
	1	2
Довжина хвилі λ , мм	32	8,2
Імпульсна потужність P_T , кВт	250	50
Тривалість імпульсу, мкс	0,5	0,5
Частота повторювання імпульсів, Гц	600	600
Смуга пропускання, МГц	2	2
Проміжна частота, МГц	60	60
Гранична чутливість, дБВт	-132	-115
Динамічний діапазон, дБ	60	60
Коефіцієнт підсилення антени G_A , дБ	46	58
Ширина діаграми направленості антени, градус	0,7	0,22
Рівень бокових пелюсток, дБ	-21	-23
Розрізнення за дальністю, м	75	75
Енергетичний потенціал, дБ	215	210
Частота дискретизації, МГц	2	2

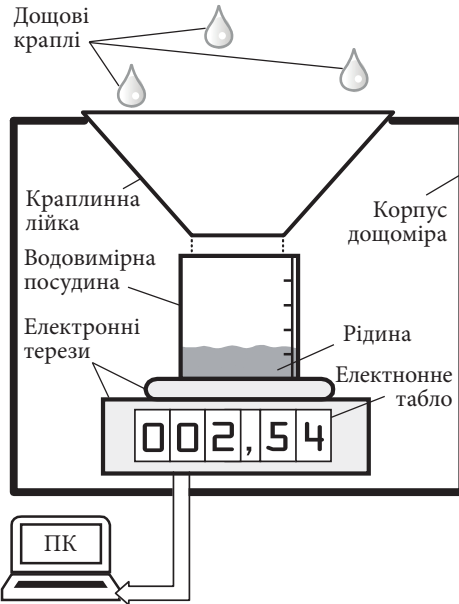


Рис. 2. Функціональна схема дощоміра

Схема Каналу 3 см відрізняється від схеми Каналу 8 мм наявністю малошумливого підсилювача (МШП) та преселектора (ПС1), які дозволяють підвищити чутливість 3 см приймача ПРМ1, а також тим, що обертове зчленування (ОЗ2А) виконано для проміжної частоти 60 МГц на основі мікросмужкової лінії передачі. Параметри вимірювального двочастотного метеорадара наведено у таблиці.

Для керування комплексом застосовується програмне забезпечення, яке дозволяє проводити вимірювання, запис і обробку відбитих сигналів.

2. Апаратура для контактних вимірювань інтенсивності дощу

Апаратура для контактних вимірювань інтенсивності дощу, які синхронні з двочастотними безконтактними, містить дощомір (рис. 2), який складається з краплинної лійки, водовимірної посудини та електронних терезів, показання яких вводяться до ПК. Дані зберігаються в окремий файл для подальшої обробки результатів вимірювань. Також їх можна вивести у вигляді графіка на екран монітора (рис. 3). На цьому графіку відображається приріст маси води $\Delta m(n)$ протягом інтервалу часу Δt для n -го моменту часу t_n .

За допомогою розробленого програмного забезпечення розраховуються поточна інтенсив-

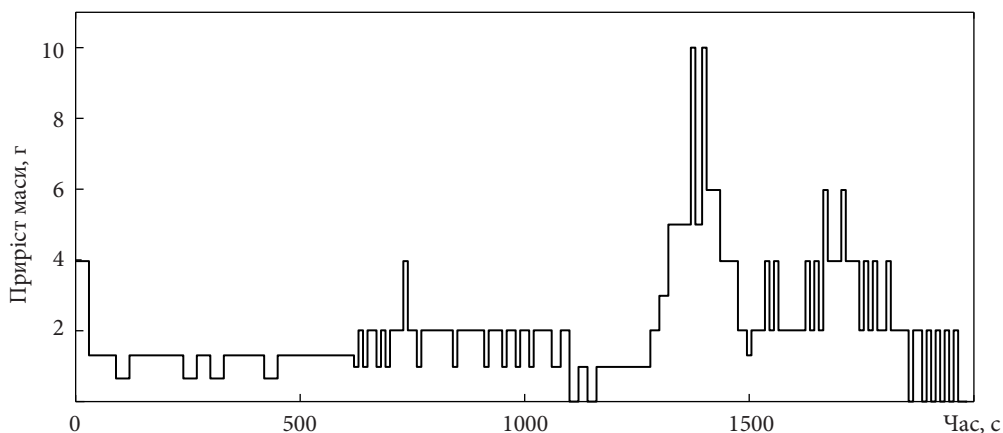


Рис. 3. Дані дощоміра про приріст маси води $\Delta m(t_n)$ у вигляді рідинно-крапельних опадів протягом інтервалу часу Δt

ність $I(n)$ та кількість опадів Q відповідно до виразів

$$I(n) = \frac{3,6 \cdot 10^6 \Delta m(n)}{\rho S_0 \Delta t}, \text{ мм/год,} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\Delta t}{3,6 \cdot 10^3} \sum_{n=0}^{N-1} I(n), \text{ мм,}$$

де $\rho = 998,2$ — густина води для температури 293,15 К, кг/м^3 ; $S_0 = 0,196$ — площа вхідного отвору краплинної лійки, м^2 ; $\Delta m(n)$ — приріст маси води, г, у момент часу t_n за інтервал часу $\Delta t = 10$ с.

3. Алгоритм обробки даних двочастотного зондування

Двочастотне радіолокаційне зондування дозволяє розширити кількість вимірюваних параметрів, необхідних для розв'язання оберненої задачі, і підвищити точність оцінки мікроструктурних параметрів рідинно-крапельних опадів у порівнянні з одночастотними методами [10, 11]. У цьому випадку обернена задача дистанційного зондування дощу для i -го елемента дальності описується системою рівнянь [12]

$$\begin{cases} P(R_i, \lambda_1) = \\ = \frac{C_r(\lambda_1) V_{ef}(R_i, \lambda_1) \sigma_0^r(R_i, \lambda_1)}{R_i^4 K(R_i, \lambda_1)}, \\ P(R_i, \lambda_2) = \\ = \frac{C_r(\lambda_2) V_{ef}(R_i, \lambda_2) \sigma_0^r(R_i, \lambda_2)}{R_i^4 K(R_i, \lambda_2)}, \end{cases} \quad (2)$$

де $C_r(\lambda) = \frac{P_T(\lambda) G_A^2(\lambda) \lambda^2}{(4\pi)^3 L_0}$ — стала радара; $P_T(\lambda)$ —

потужність передавача; λ — робоча довжина хвилі; G_A — коефіцієнт підсилення приймально-передавальної антени; $R_i = R_0 + (i - 1)\Delta R$ — відстань від радара до для i -го елемента дальності, $i = 1 \dots N_R$; $N_R = (R_1 - R_0) / \Delta R$ — кількість елементів розрізнення за дальністю; ΔR — розрізнення за дальністю; R_0 — відстань від радара до початку зони дощу; R_1 — відстань від радара до кінця зони дощу; $V_{ef}(R_i, \lambda)$ — ефективний розсіюваль-

ний об'єм; $\sigma_0^r(R_i, \lambda) = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \sigma_p(\lambda, D) N(D) dD$ — питома ефективна поверхня розсіювання (ЕПР);

$\sigma_p(\lambda, D)$ — ЕПР окремої краплі; $N(D)$ — розподіл крапель за розмірами; D_{\min} і D_{\max} — мінімальний і максимальний діаметри крапель;

$K(R_i, \lambda) = \exp \left\{ -2 \int_{R_0}^{R_i} \alpha_{AT}(R, \lambda) dR \right\}$ — ослаблення

сигналу при поширенні на трасі для довжини хвилі λ ; $\alpha_{AT}(R, \lambda) = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \sigma_{AT}(D, \lambda) N(R, D) dD$ —

дистанційна залежність питомого ослаблення сигналу у дощі; R — відстань у дощі; $\sigma_{AT}(D, \lambda)$ — перетин ослаблення одиночної краплі; L_0 — коефіцієнт втрат, який враховує різні чинники, в тому числі ослаблення сигналу в трактах радара, вплив підстильної поверхні та ін. [13].

Обробка даних двочастотного радара здійснювалася згідно з методом [4, 14], який засновано на параметризації невідомої функції розподі-

лу крапель за розмірами у системі інтегральних рівнянь (2). Зокрема, запропоновано використувувати гамма-розподіл [3], параметри якого залежать від відстані R у дощі:

$$N(D, R) = \frac{N_c(R) D^{\alpha(R)}}{\Gamma(\alpha(R)+1) \beta(R)^{\alpha(R)+1}} \times \exp\left(-\frac{D}{\beta(R)}\right), \quad (3)$$

де α, β – параметри розподілу; N_c – концентрація крапель.

Покладемо, що параметри мають рівномірний розподіл у рамках одного елемента дальності, тобто $\alpha(R) = \alpha(R_i), \beta(R) = \beta(R_i), N_c(R) = N_c(R_i)$. Тоді (2) можна записати як

$$\left\{ \begin{aligned} P(R_i, \lambda_1) &= \frac{C_r(\lambda_1) V_{ef}(R_i, \lambda_1)}{R_i^4} \times \\ &\times \frac{\int_{D_{min}}^{D_{max}} \sigma_p(\lambda_1, D) N(R_i, D) dD}{\exp\left\{2 \int_{R_0}^{R_i} dR \int_{D_{min}}^{D_{max}} \sigma_{AT}(\lambda_1, D) N(R_i, D) dD\right\}}, \\ P(R_i, \lambda_2) &= \frac{C_r(\lambda_2) V_{ef}(R_i, \lambda_2)}{R_i^4} \times \\ &\times \frac{\int_{D_{min}}^{D_{max}} \sigma_p(\lambda_2, D) N(R_i, D) dD}{\exp\left\{2 \int_{R_0}^{R_i} dR \int_{D_{min}}^{D_{max}} \sigma_{AT}(\lambda_2, D) N(R_i, D) dD\right\}}. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Далі розглядається розв’язання рівняння (4) для одного елемента розрізнення за дальністю.

Оскільки результати вимірювань на двох частотах не дозволяють обчислити три параметри розподілу, запропоновано [4] використовувати усереднені дані контактних вимірювань параметрів гамма-розподілу залежно від інтенсивності дощу у вигляді

$$\alpha = aI^{-b}, \quad \beta = wI^g, \quad N_c = 495,45(1 - \exp\{-I/3,17\}), \quad (5)$$

де $a = 3,8, b = 0,42, w = 0,148, g = 0,38$ [4].

З урахуванням параметризації і даних контактних вимірювань (5) запишемо систему рівнянь для випадку двочастотного зондування опадів через диференціальне значення питомої

$$\text{ЕПР } \sigma_D^r(\lambda_1, \lambda_2, \alpha, \beta) = \frac{\sigma_0^r(\lambda_1, \alpha, \beta, N_c)}{\sigma_0^r(\lambda_2, \alpha, \beta, N_c)};$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_D^r(\lambda_1, \lambda_2, \alpha, \beta) &= \\ &= \frac{P_D(\lambda_1, \lambda_2)}{C_D(\lambda_1, \lambda_2) K_D(\lambda_1, \lambda_2, \alpha, \beta, N_c)}, \\ \beta &= w \left(\frac{a}{\alpha}\right)^{\frac{g}{b}}, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

де $P_D(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{P(\lambda_1)}{P(\lambda_2)}$ – диференціальне значення прийнятої потужності; $C_D(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{C_r(\lambda_1)}{C_r(\lambda_2)}$ – диференціальне значення сталої двочастотного радара; $K_D(\lambda_1, \lambda_2, \alpha, \beta, N_c) = \frac{K(\lambda_1, \alpha, \beta, N_c)}{K(\lambda_2, \alpha, \beta, N_c)}$ – диференціальне значення коефіцієнта ослаблення, яке дорівнює відношенню коефіцієнтів ослаблення, виміряних на двох довжинах хвиль.

У роботі [14] розв’язання (6) розглядається для малого і великого ослаблення сигналів на трасі поширення. У першому випадку передбачається, що ослаблення на обох довжинах хвиль мале: $K(\lambda_{1,2}) = 1, K_D(\lambda_1, \lambda_2) = 1$. Для другого випадку запропоновано ітераційну процедуру врахування ослаблення сигналів на трасі поширення.

Нижче розглядається випадок малого ослаблення, тоді

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_D^r(\lambda_1, \lambda_2, \alpha, \beta) &= \frac{P_D(\lambda_1, \lambda_2)}{C_D(\lambda_1, \lambda_2)}, \\ \beta &= w \left(\frac{a}{\alpha}\right)^{\frac{g}{b}}. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

На рис. 4 представлені результати чисельного моделювання [4] залежності диференціальної ЕПР від інтенсивності дощу для $\lambda_1 = 8,2$ мм та $\lambda_2 = 3,2$ см.

Крім того, результати аналізу наведеної на рис. 4 залежності показують, що в області малих інтенсивностей диференціальна ЕПР має характерний екстремум, який не дозволяє однозначно відновлювати інтенсивність дощу в області малих значень за значеннями диференціальної ЕПР.

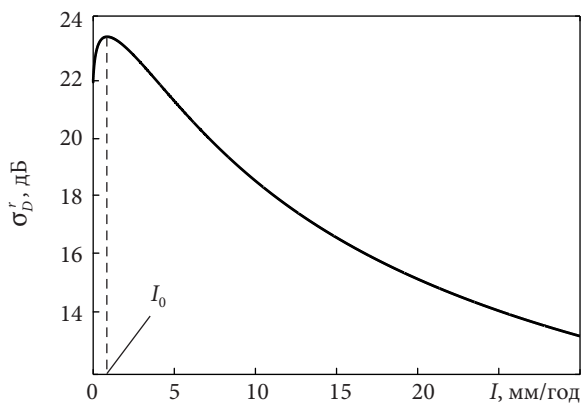


Рис. 4. Графік залежності диференціальної ЕПР від інтенсивності дощу

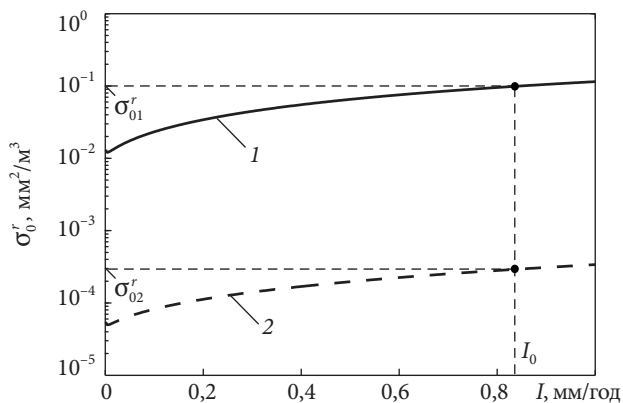


Рис. 5. Графік залежності питомої ЕПР від інтенсивності дощу: крива 1 — $\lambda = 8,2$ мм; крива 2 — $\lambda = 3,2$ см

Для усунення неоднозначності в [4] пропонується використовувати залежність питомої ЕПР від інтенсивності дощу, що має монотонний характер, як показано на рис. 5 для $\lambda_1 = 8,2$ мм та $\lambda_2 = 3,2$ см.

Це дозволяє використовувати характерні точки зростання залежності інтенсивності дощу від питомого значення ЕПР (I_0 , σ_{01}^r та σ_{02}^r на рис. 5) і сформулювати наступну умову для однозначного обчислення інтенсивності дощу [4]:

$$\begin{cases} I \leq I_0 \text{ для } \sigma_0^r(\lambda_1) \leq \sigma_{01}^r; \sigma_0^r(\lambda_2) \leq \sigma_{02}^r, \\ I > I_0 \text{ для } \sigma_0^r(\lambda_1) > \sigma_{01}^r; \sigma_0^r(\lambda_2) > \sigma_{02}^r, \end{cases} \quad (8)$$

де $I_0 = 0,86$ мм/год — точка максимуму залежності $\sigma_D^r(I)$ (рис. 4, 5); $\sigma_{01}^r = 1,94$ мм²/м³; $\sigma_{02}^r = 0,035$ мм²/м³.

Як показує аналіз [4, 14], наведені у (8) значення констант однакові для всіх трьох параметрів і не залежать від характеристик МРЛ. Як зазначено у [4], сформульована система нерівностей (8) справедлива тільки при використанні даних контактних вимірювань параметрів гамма-розподілу $\alpha(I)$ і $\beta(I)$ (5). Для інших значень мікроструктурних характеристик потрібне уточнення відповідних даних.

4. Експериментальні дослідження

Проведення експериментальних досліджень схематично показано на рис. 6. Радіолокаційні вимірювання проводилися для випадку вертикального зондування, при цьому дощомір розташовувався поруч з радаром.

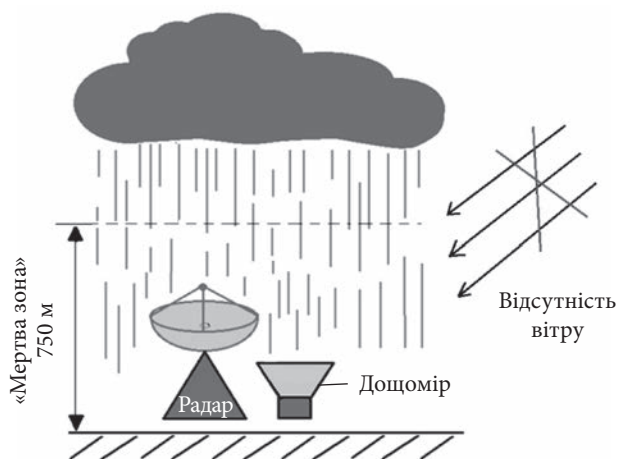


Рис. 6. Вимірювання характеристик дощу

Використовуваний радар дозволяє вимірювати параметри дощу на висоті не менше 750 м, оскільки тривалість бланкувального імпульсу становить 5 мкс, що призводить до появи так званої «мертвої зони». Контактні вимірювання інтенсивності дощу за допомогою дощоміра проводяться на поверхні землі. У зв'язку з цим порівняння даних наземних та дистанційних вимірювань є дуже складною задачею, тому що необхідно забезпечити проведення вимірювань для однієї і тієї ж просторової області дощу. Необхідною умовою для цього є відсутність бічного зносу дощових мас (відсутність вітру), причому не тільки поблизу земної поверхні, але і по всій висоті.

Крім цього, оскільки швидкість падіння дощових мас невідома, то дані радіолокаційного зондування і дощоміра рознесені у часі на невизначений інтервал. Для порівняння даних бу-

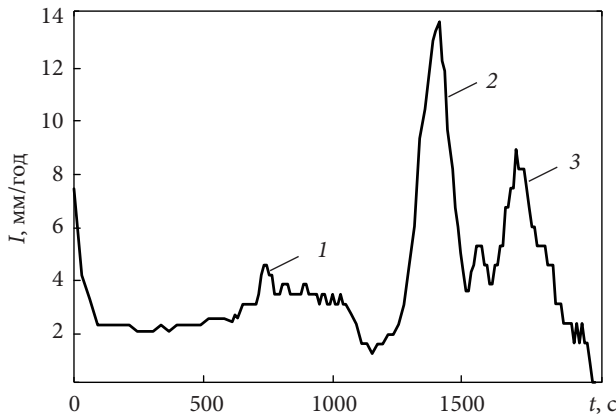


Рис. 7. Виміряні значення інтенсивності дощу в реальному масштабі часу за даними дощоміра

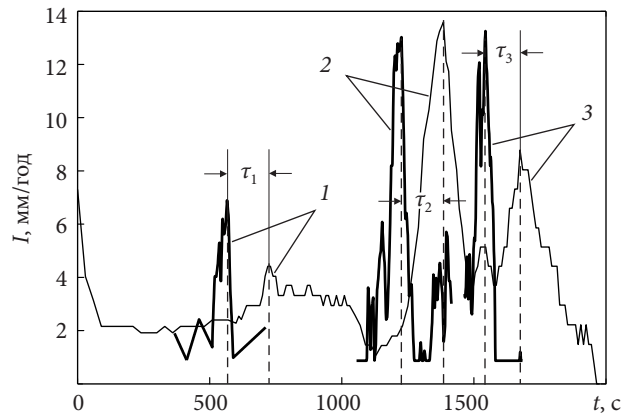


Рис. 8. Виміряні значення інтенсивності дощу за даними дощоміра (тонка крива) і метеорадара (товсті криві) у реальному масштабі часу ($\tau_1 = 184$ с, $\tau_2 = 163$ с, $\tau_3 = 157$ с)

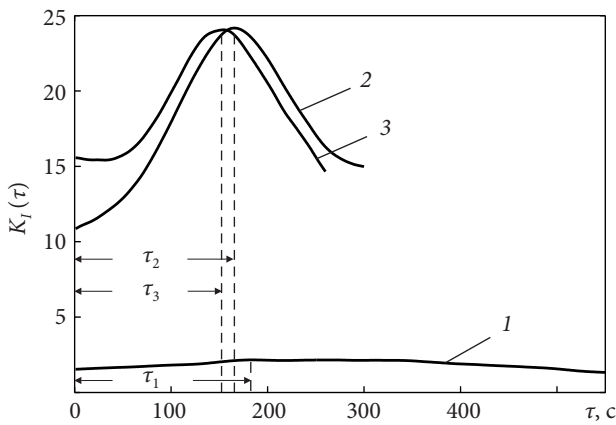


Рис. 9. Взаємна кореляційна залежність між інтенсивністю дощу за даними дощоміра та метеорадара ($\tau_1 = 184$ с, $\tau_2 = 163$ с, $\tau_3 = 157$ с)

ло обчислено взаємну кореляційну функцію інтенсивності дощу за даними, які вимірюються дистанційно $I_r(n)$ та за допомогою наземного дощоміра $I_{rg}(n)$:

$$K_I(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} I_{rg}(n) I_r(n-m), \quad (9)$$

де $N = T_0/\Delta t$ — кількість періодичних вимірювань інтенсивності дощу на інтервалі спостереження; T_0 — тривалість інтервалу спостереження; $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $m = -M, \dots, -1, 0, 1, \dots, M$; $m\Delta t = \tau$ — поточна затримка; $M\Delta t$ — максимальна затримка. Множник $1/(N-m)$ у цій функції є поправним коефіцієнтом на поступове зменшення числа значень, що перемножуються та підсумовуються (від $N-1$ до $N-m-1$) у міру збільшення

зсуву m . Час затримки $\tau_d = m_d \Delta t$ між фіксованими змінами інтенсивності дощу, що вимірюються радаром та за допомогою дощоміра, відповідає максимуму коефіцієнта кореляції $K(m_d) = K_I^{\max}$.

Така схема має недоліки, які накладають деякі обмеження на типи досліджуваних дощів і кліматичні умови, для яких можна проводити вимірювання (просторово однорідні дощі, відсутність вітру і сильного випаровування крапель під час падіння). Передбачається, що при падінні з висоти 750 м розподіл крапель досліджуваного обсягу дощу може істотно змінитися, однак за відсутності бокового зносу і випаровування кількість води, яка потрапить у дощомір, залишиться незмінною.

Крім того, при вертикальному зондуванні сигнал зазнає ослаблення у дощі на всій відстані від 0 до 750 м, що необхідно брати до уваги, розв'язуючи обернену задачу для першого елемента розрізнення за дальністю. Для цього на першому етапі розв'язування оберненої задачі відбувалося згідно з (7) для випадку незначного ослаблення ($K(\lambda_{1,2}) = 1$). Отримані дані використовувалися для обчислення затримки τ_d даних дощоміра відносно радіолокаційних даних. Після цього на основі залежності $I_d(t)$, рис. 7, на інтервалі від t_{pi} до $t_{pi} + \tau_d$ (t_{pi} — i -й момент випромінювання першого імпульсу послідовності, котра включає 256 зондувальних радіоімпульсів, що повторюються з частотою 600 Гц, де $i = 1, 2, \dots, N_{sc}$; N_{sc} — кількість зондувальних послідовностей, що розглядаються) обчислювалися часові залежності параметрів гама-розподілу $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $N_c(t)$ (5)

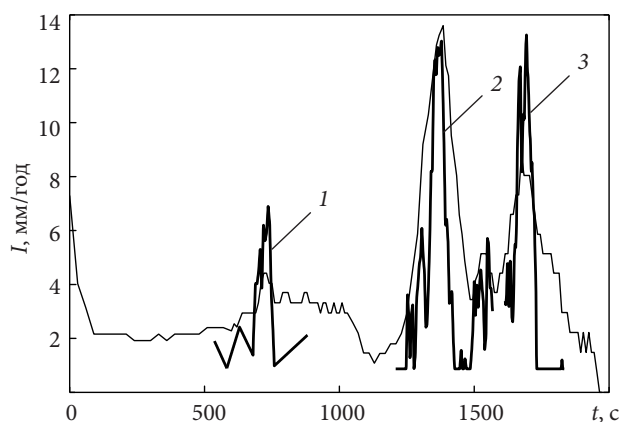


Рис. 10. Порівняння результатів вимірювання інтенсивності дощу за даними дощоміра (тонка крива) і метеорадара (товсті криві), які зміщені на τ_1 , τ_2 , τ_3

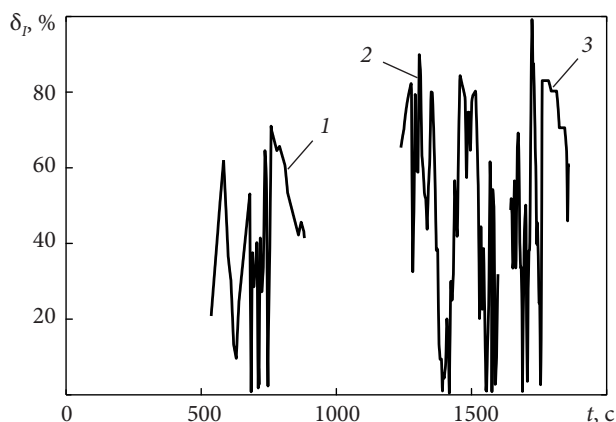


Рис. 11. Відносна різниця між контактними та відновленими за даними радара вимірюваннями інтенсивності дощу

і питомого ослаблення $\alpha_{AT}(t)$, які можна розглядати як відповідні дистанційній залежності на інтервалі $0 \dots 750$ м для моменту часу t_{pi} , що відповідає початку послідовності випромінюваних радіоімпульсів. Далі відбувається повторне розв'язання оберненої задачі з урахуванням отриманої величини ослаблення сигналу і корекція результатів, отриманих на першому етапі для випадку малого ослаблення. Така процедура застосовується для кожного моменту часу t_{pi} радіолокаційного зондування.

5. Результати експериментальних досліджень

Для аналізу були відібрані випадки, коли спостерігалася практично повна відсутність вітру біля поверхні землі, що дозволяло вважати падіння крапель вертикальним.

Оскільки дані радіолокаційного зондування та дощоміра рознесені у часі на невизначений інтервал, то наочними є випадки, коли спостерігалася помітна за часом зміна інтенсивності (рис. 7, ділянки 1–3). Наведені дані відповідають одному дощу, інтенсивність якого змінювалася з часом.

Досліджуваному часовому інтервалу запису дощоміра відповідали три записи радіолокаційних даних тривалістю 5...7 хвилин, котрі оброблено згідно з описаною вище методикою. Отримані результати представлені на рис. 8, де показана інтенсивність дощу у реальному масштабі часу, яка виміряна за допомогою радара (товсті криві 1–3) для першого елемента розрізнення за

дальністю (висота 750 м) та дощоміра (тонка крива), котрий розташовувався на поверхні землі.

При цьому, як впливає з графіка взаємної кореляційної функції (рис. 9), затримка τ_d даних дощоміра відносно до радіолокаційних даних складає $\tau_1 = 184$ с, $\tau_2 = 163$ с і $\tau_3 = 157$ с відповідно для кривих 1–3 (рис. 10), що відповідає швидкості падіння дощової маси 4,08, 4,6 та 4,77 м/с.

Необхідно зазначити, що, незважаючи на якісно схожий характер залежностей, збігу між радіолокаційними та контактними даними для кожного моменту часу не спостерігалось. Це пов'язано із зазначеними недоліками схеми проведення експерименту, а також з тим, що застосований метод двочастотного зондування засновано на усереднених даних контактних вимірювань (5) [4]. З цієї причини для конкретних моментів часу різниця може бути значною. На рис. 11 показано часову залежність відносної різниці відновлення інтенсивності дощу між даними радара та дощоміра, $\delta_r(t) = 100 \times |I_r(t) - I_{rg}(t)| / I_{rg}(t)$. Можна бачити, що у деякі моменти часу вона сягає 100 %.

У середньому відносна різниця становить 42, 50,5 і 59,2% відповідно для кривих 1–3. Крім того, обчислена кількість опадів за даними радара Q_r і дощоміра Q_{rg} та їх відносна різниця $\delta_Q = 100 \times |Q_r - Q_{rg}| / Q_{rg}$:

- для кривої 1 – $Q_r = 0,219$ мм, $Q_{rg} = 0,305$ мм і $\delta_Q = 28,1$ %;
- для кривої 2 – $Q_r = 0,398$ мм, $Q_{rg} = 0,702$ мм і $\delta_Q = 43,2$ %;
- для кривої 3 – $Q_r = 0,268$ мм, $Q_{rg} = 0,341$ мм і $\delta_Q = 21,4$ %.

Висновки

У статті розглянуто експериментальне дослідження двочастотного зондування рідинно-крапельних опадів на основі розробленого авторами алгоритму з використанням модернізованого двочастотного метеорадара МРЛ-1. Запропонована методика зіставлення даних наземного дощоміра і двочастотного радара дозволяє оцінити ефективність методу двочастотного зондування рідинно-крапельних опадів.

Отримані результати показують, що алгоритм обробки даних двочастотного зондування рідинно-крапельних опадів дає можливість ви-

значати інтенсивність дощу та оцінювати кількість опадів такого типу. При цьому не слід очікувати повного збігу результатів вимірювання інтенсивності дощу для кожного моменту часу у зв'язку з особливостями методу і схеми вимірювань.

Удосконалення методики проведення експерименту та проведення додаткових порівняльних експериментальних досліджень у широкому діапазоні інтенсивності дощів дозволять точніше оцінити можливості методу. Відповідні розрахунки та експерименти з валідації запропонованої методики тривають.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Сулаквелидзе Г.Л., Абшаев М. Т. Измерение интенсивности осадков мультисектором. *Тр. Высокоточного геофизического института*. 1968. Вып. 11. С. 198–214.
2. Абшаев М.Т., Дадали Ю.А. О возможностях радиолокационного исследования микроструктуры облаков и осадков. *Тр. Высокоточного геофизического института*. 1966. Вып. 5. С. 71–85.
3. Литвинов И.В. *Структура атмосферных осадков*. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 153 с.
4. Линкова А.М. Использование микроструктурных параметров для обработки данных двухчастотного измерения интенсивности дождя. *Радиофизика и электроника*. 2011. Т. 2(16), № 1. С. 33–38.
5. Заболоцкая Т.Н. Связь параметров гамма-распределения по размерам с характеристиками осадков. *Тр. Укр. науч.-исслед. гидрометеорологического ин-та*. 1970. Вып. 86. С. 127–131.
6. Белов Е.Н., Войтович О.А., Макулина Т.А., Руднев Г.А., Хлопов Г.И., Хоменко С.И. Аппаратурно-программный комплекс для исследования отражений от метеорообразований. *Радиофизика и электроника*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2009. Т. 15, № 1. С. 57–63.
7. Mogyła A.A., Mytsenko I.M., Voytovich O.A., Khomenko S.I. Building a Passive-Active Radiometeorological Measuring System Based on Dual-Frequency Radar. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78, Iss. 15. P. 1355–1367.
8. Войтович О.А. Радиофизический комплекс дистанционного зондирования метеорообъектов. *Системы обработки информации*: сб. науч. пр. Харк. нац. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. Харків: 2013. Вип. 2(109). С. 21–26.
9. Мыценко И.М., Халамейда Д.Д. Импульсный логарифмический усилитель с автоматической регулировкой усиления в диапазоне частот 1 МГц...8 ГГц. *Радиофизика и электроника*. 2018. Т. 23, № 1. С. 4–9.
10. Rincon R.F., Lang R.H. Microwave link dual-wavelength measurements of path-average attenuation for the estimation of drop size distributions and rainfall. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002. Vol. 40, Iss. 4. P. 760–770.
11. Marzoug M, Amayenc P. A Class of Single- and Dual-Frequency Algorithms for Rain-Rate Profiling from a Spaceborne Radar. Part I: Principle and Tests from Numerical Simulations. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1994. Vol. 11. P. 1480–1506.
12. Линкова А.М. Урахування ослаблення сигналів при відновленні інтенсивності дощу за допомогою двочастотного зондування. *Радиофизика та електроніка*. 2021. Т. 26, № 3. С. 3–10.
13. Базлова Т.А., Бочарников Н.В., Брылев Г.Б., Кузнецова Л.И., Линев А.Г., Маланичев С.А., Оленев В.А., Паркинен Т.В., Солонин А.С., Устинов В.К., Фролов В.И., Четверикова Е.С., Якимайнен Н.А. *Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети*. СПб.: Гидрометеиздат, 2002.
14. Войтович О.А., Линкова А.М., Хлопов Г.И. Двухчастотное профилирование параметров дождя. *Радиофизика и электроника*. 2011. Т. 2(16), № 3. С. 51–60.

Стаття надійшла 24.11.2021

REFERENCES

1. Sulakvelidze, G.L., Abshaev, M.T., 1968. Measurement of precipitation intensity by multi frequency radar. *Trudy Vysokotchnogo geofizicheskogo instituta*, **11**, pp. 198–214 (in Russian).
2. Abshaev, M.T., Dadali, Yu.A., 1966. About the possibilities of microstructural studies of clouds and precipitation by radar methods. *Trudy Vysokotchnogo geofizicheskogo instituta*, **5**, pp. 71–85 (in Russian).
3. Litvinov, I.V., 1974. *The structure of atmospheric precipitation*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
4. Linkova, A.M., 2011. Using microstructural parameters for data processing of double frequency measurements of rain intensity. *Radiofiz. Elektron.*, **2(16)**(1), pp. 33–38 (in Russian).

5. Zabolotskaya, T.N., 1970. Relationship between the parameters of the gamma distribution by size and the characteristics of precipitation. *Trydy UkrNIGMI*, **86**, pp. 127–131 (in Russian).
6. Belov, E.N., Voitovich, O. A., Makulina, T.A., Rudnev, G.A., Khlopov, G.I., Khomenko, S.I., 2009. Hardware and software complex for the study of reflections from meteorological formations. In: V.M. Yakovenko, ed. 2009. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **15**(1), pp. 57–63 (in Russian).
7. Mogyla, A.A., Mytsenko, I.M., Voytovich, O.A., Khomenko, S.I., 2019. Building a Passive-Active Radiometeorological Measuring System Based on Dual-Frequency Radar. *Telecommunications and Radio Engineering*, **78**(15), pp. 1355–1367.
8. Voytovich, O.A., 2013. Radiophysical complex for remote sensing of meteorological objects. In: *Information processing systems*. Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University (KNAFU) Kharkov: KNAFU Publ. **2**(109), pp. 21–26 (in Russian).
9. Mytsenko, I.M., Halameida, D.D., 2018. Pulse logarithmic amplifier with automatic gain control in the frequency range 1 MHz...8 GHz. *Radiofiz. Elektron.*, **23**(1), pp. 5–9 (in Russian).
10. Rincon R.F., Lang R.H., 2002. Microwave link dual-wavelength measurements of path-average attenuation for the estimation of drop size distributions and rainfall. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **40**(4), pp. 760–770.
11. Marzoug, M., Amayenc, P., 1994. A Class of Single- and Dual-Frequency Algorithms for Rain-Rate Profiling from a Spaceborne Radar. Part I: Principle and Tests from Numerical Simulations. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **11**, pp. 1480–1506.
12. Linkova, A.M., 2021. Taking into account the signal attenuation for retrieval of rain intensity by double-frequency sensing. *Radiofiz. Elektron.*, **26**(3), pp. 3–10 (in Ukrainian).
13. Bazlova, T.A., Bocharnikov, N.V., Brylev, G.B., Kuznetsova, L.I., Linev, A.G., Malanichev, S.A., Olenev, V.A., Parkinen, T.V., Solonin, A.S., Ustinov, V.K., Frolov, V.I., Chetverikova, E.S., Yakimainen, N.A., 2002. *Meteorological automated radar networks*. S-P: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
14. Voytovich, O.A., Linkova, A.M., Khlopov, G.I., 2011. Double frequency sensing of rain parameters. *Radiofiz. Elektron.*, **2**(16)(3), pp. 51–60 (in Russian).

Received 24.11.2021

A.M. Linkova, A.A. Mogyla, H.O. Rudnev, V.M. Kantsedal, S.I. Khomenko

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NASU
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, UkraineVALIDATION OF REMOTE MEASUREMENT OF RAIN CHARACTERISTICS
BY THE METHOD OF DOUBLE FREQUENCY RADAR SENSING

Subject and Purpose. The development of radar methods for measuring liquid-drop precipitation characteristics is of great importance for studying physical processes in the atmosphere and for lots of applied problems to be solved. At the same time, an experimental research of these methods *in situ* is essential to determine their frames and scope and estimate retrieval errors of the rain parameters. The purpose of the work is to evaluate effectiveness of the previously proposed method that is based on the parametrization of the distribution function of drops by size, uses averaged touch-probing data of the three-parameter gamma distribution of the parameters versus the rain intensity, and employs the double-frequency method of precipitation remote sensing. For its validation, the rain intensity results obtained by the radar sensing are compared with the data taken from the ground raingauge.

Methods and Methodology. The measurement results gained by the proposed method are compared with the measurement results obtained by the standard technique.

Results. An experimental study using the previously developed algorithm and with a refined double-frequency weather radar MRL-1 has been given to the double-frequency sensing of liquid-drop precipitation. The obtained results show that the proposed data processing algorithm for double-frequency sensing of liquid-drop precipitation is good at the rain intensity retrieval and makes it possible to estimate liquid precipitation amounts over long periods of time.

Conclusion. The rain intensity measured with the use of meteo radar almost completely coincides, both qualitatively and quantitatively, with the data from the ground raingauge. The algorithm proposed by the authors for processing double-frequency radar sensing data on liquid-drop precipitation retrieves the rain intensity and, also, evaluates liquid-drop precipitation amounts.

Keywords: inverse problem, double frequency sensing, rain intensity, radar, raingauge.