

А.М. Пінкова

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

**Урахування ослаблення сигналів
при відновленні інтенсивності дощу
за допомогою двочастотного зондування**

***Предмет і мета роботи.** Опади є основним джерелом вологи для сільськогосподарських угідь, тому визначення їх кількості, особливо упродовж вегетаційного періоду, є важливою інформацією для обґрунтування агротехнічних і меліоративних заходів. Метою цієї роботи є розв'язання оберненої задачі двочастотного зондування опадів у НВЧ-діапазоні на основі методів регуляризації та з урахуванням ослаблення сигналів, а також аналіз впливу помилок розрахунку ефективною поверхні розсіювання (ЕПР) та похибок вимірювання повного ослаблення сигналів на результати відновлення інтенсивності дощу.*

***Методи і методологія роботи** — чисельне моделювання з використанням підходу до розв'язання інтегрального рівняння розсіювання на основі методів регуляризації для випадку двочастотного зондування.*

***Результати роботи.** Проведено чисельне моделювання відновлення рівномірного просторового профілю інтенсивності дощу в діапазоні 1...20 мм/год для робочих довжин хвиль 0,82 і 3,2 см для прямої та оберненої ітераційної процедури урахування ослаблення сигналів. Показано, що пряма ітераційна процедура менш ефективна, ніж обернена. Так, для дощів з інтенсивністю більше 20 мм/год або з інтенсивністю 10...20 мм/год і просторовою протяжністю дощу понад 500 м пряма ітераційна схема призводить до значних помилок відновлення інтенсивності.*

***Висновок.** Аналіз результатів показав, що використання оберненої ітераційної процедури дозволяє відновлювати рівномірний профіль інтенсивності дощу з помилкою 25 % для дощів з інтенсивністю до 20 мм/год і просторовою протяжністю 4 км при помилках розрахунку повного ослаблення і питомих ЕПР ± 20 %. Іл. 17. Бібліогр.: 13 назв.*

***Ключові слова:** обернена задача, інтенсивність дощу, ослаблення сигналу.*

У роботах [1, 2] запропоновано підхід до розв'язання інтегрального рівняння розсіювання з використанням методів регуляризації для випадку двочастотного зондування дощу. Передбачалося, що ослаблення сигналів на траєкторії поширення радіохвиль незначне, що може призводити до великих помилок у разі сильних або протяжних дощів, особливо для довжин хвиль міліметрового діапазону. Тому в цій роботі пропонується процедура урахування ослаблення сигналів у розв'язанні оберненої задачі двочастотного зондування дощів.

1. Вплив ослаблення сигналу уздовж траси поширення на помилку обчислення питомої

ефективної поверхні розсіювання. На основі даних вимірювань величина питомої ефективною поверхні розсіювання (ЕПР) дощу розраховується відповідно до виразу [2, 3]

$$\sigma_0^r(R_i, \lambda) = \frac{P(R_i, \lambda) R_i^4}{C_r(\lambda) V_{ef}(R_i, \lambda) K(R_i, \lambda)}, \quad (1)$$

де $P(R_i, \lambda)$ — прийнята потужність сигналу, відбитого від зони дощу; λ — довжина хвилі; $C_r(\lambda)$ — стала радара; R_i — відстань від радара до ефективного розсіювального об'єму $V_{ef}(R_i, \lambda)$, $i = 1 \dots N_R$; $N_R = (R_1 - R_0) / \Delta R$ — кількість елементів розділення за дальністю; R_0 — відстань від радара до початку зони дощу; R_1 — відстань від радара до

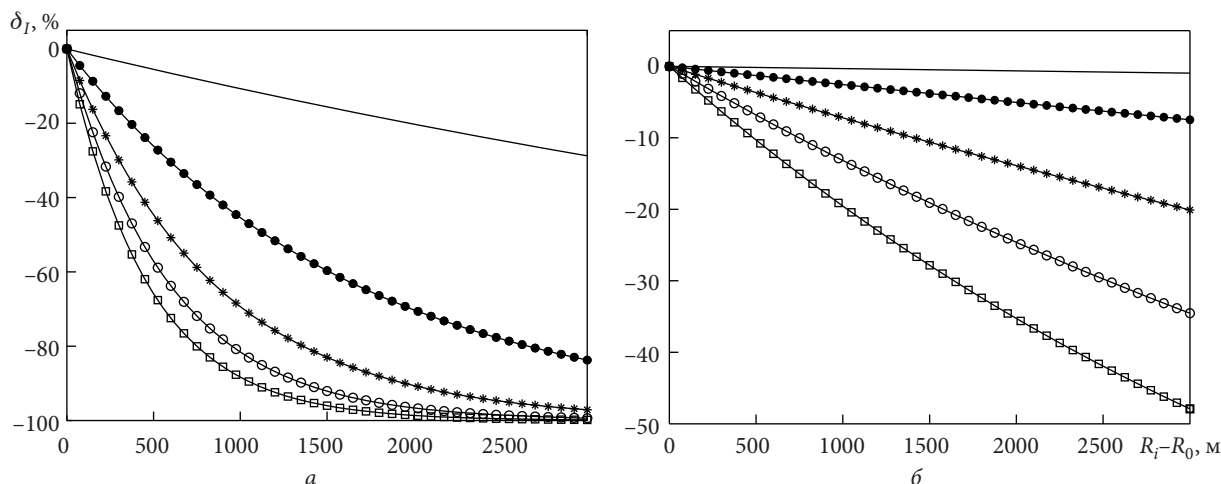


Рис. 1. Залежність помилки обчислення питомої ЕПР від відстані в зоні дощу без урахування ослаблення сигналу для довжини хвилі 8,2 мм (а) і 3,2 см (б) (суцільні криві — $I = 1$ мм/год, точки — $I = 5$ мм/год, зірочки — $I = 10$ мм/год, кружки — $I = 15$ мм/год, квадратики — $I = 20$ мм/год)

кінця зони дощу; ΔR — розділення за дальністю;

$$K(R_i, \lambda) = \exp \left\{ 2 \int_{R_0}^{R_{i-1}} dR \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \sigma_{at}(\lambda, d) N(R_i, d) dd \right\} -$$

величина ослаблення сигналу при поширенні на трасі; $\sigma_{at}(d, \lambda)$ — поперечний переріз ослаблення окремої краплі; $N(R_i, d)$ — розподіл крапель за розмірами; d — діаметр крапель; d_{\min} і d_{\max} — мінімальний і максимальний діаметри крапель.

Розглянемо вплив ослаблення сигналу уздовж траси поширення на помилку обчислення питомої ЕПР. На рис. 1 наведено залежність помилки обчислення питомої ЕПР для двох довжин хвиль від протяжності зони дощу, яку отримано в разі нехтування ослабленням. Як було показано в [2], для відновлення інтенсивності дощу з помилкою менше 20 % необхідно, щоб помилка обчислення питомої ЕПР не перевищувала ± 20 %.

На рис. 1, а показано, що для коректного відновлення інтенсивності $I = 5$ мм/год необхідно враховувати ослаблення на довжині хвилі 8,2 мм при відстані менш ніж 500 м. У свою чергу, ослаблення на довжині хвилі 3,2 см (рис. 1, б) необхідно враховувати при великій протяжності зони дощу (для $I = 10$ мм/год — починаючи з 3 км, для $I = 20$ мм/год — з 1 км). Також слід звернути увагу, що нехтування ослабленням сигналу призводить до заниження величини питомої ЕПР, що є найгіршим варіантом для відновлення інтенсивності і призводить до найбільших помилок [2].

Таким чином, отримані результати показують, що для коректного відновлення інтенсивності необхідно враховувати ослаблення сигналів міліметрового діапазону при розв'язанні оберненої задачі. Урахування ослаблення для довжини хвилі 3,2 см бажано проводити для сильних дощів ($I > 10$ мм/год) або дощів з великою зоною протяжності.

2. Урахування ослаблення сигналів. Коригування результатів розв'язання оберненої задачі з урахуванням ослаблення сигналів здійснюється за допомогою ітераційних схем [4, 5], розрахунків спеціальних поправок [6, 7] або додаткових вимірювань [8–10].

Зокрема, в роботі [8] було запропоновано два способи урахування ослаблення при двочастотному зондуванні з супутника: пряма рекурсія (рух від радара до поверхні суші/океану) і обернена рекурсія (рух від поверхні суші/океану до радара). У роботі [5] розглянуто ітераційну процедуру оцінки повного ослаблення на трасі при двочастотному зондуванні.

Пряма ітераційна процедура. Застосуємо метод урахування ослаблення, запропонований в роботі [4] і заснований на прямій ітераційній процедурі оцінки ослаблення сигналів у кожному елементі розділення за дальністю.

Представимо зону опадів протяжністю L_{ar} у вигляді сукупності N_R елементів розділення за дальністю (рис. 2 [4]: $R_i = R_0 + (i - 1)\Delta R$), ліворуч від яких розташовано область, вільну від дощу.

Висока просторова роздільна здатність сучасних метеорологічних радарів дозволяє вважати однорідним розподіл параметрів дощу всередині імпульсного об'єму простору. Тоді вираз для величини ослаблення в межах одного елемента розділення можна записати в спрощеному вигляді:

$$K(\lambda) = \exp \left\{ -2\Delta R \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \sigma_{at}(d, \lambda) N(d) dd \right\}. \quad (2)$$

У свою чергу, величину ослаблення в i -му елементі розділення можна подати так:

$$K(R_i, \lambda) = \prod_{q=1}^i \exp \left\{ -2\Delta R \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \sigma_{at}(d, \lambda) N(d, R_q) dd \right\}, \quad (3)$$

де $q = 1 \dots i$.

Для проведення ітераційної процедури необхідно задати початкові умови. Так, для прямої рекурсії можливі два варіанти початкових умов. Перший передбачає, що радар розміщується на відстані R_0 від переднього фронту опадів. У цьому випадку зліва від межі дощу значення інтенсивності $I(R)|_{R < R_0} = 0$ та ослаблення сигналів відсутні $K(R_0, \lambda_{1,2}) = 1$. Другий варіант передбачає, що радар розташовано безпосередньо в зоні дощу. Тоді в якості початкової умови можна обрати значення інтенсивності, яке виміряне за допомогою контактних методів.

Це дозволяє, задавши початкові значення величин ослаблення $K(R_0, \lambda_{1,2}) = 1$, відновити інтенсивність дощу в першому елементі розділення для випадку середовища без ослаблення сигналу відповідно до запропонованої в [4] процедури розв'язання оберненої задачі. На наступному етапі уточнюють значення ослаблення з урахуванням отриманих результатів, що розглядаються як початкові значення для другої ітерації, і т. д. Таку ітераційну схему застосовують послідовно до кожного окремого елемента розділення, а результати обчислень у $(i-1)$ -му елементі розділення розглядають як початкові умови для i -го елемента.

Корекція величин ослаблення на основі відновленого значення інтенсивності дощу відбувається таким чином. Розраховують величини параметрів гамма-розподілу крапель за розмі-

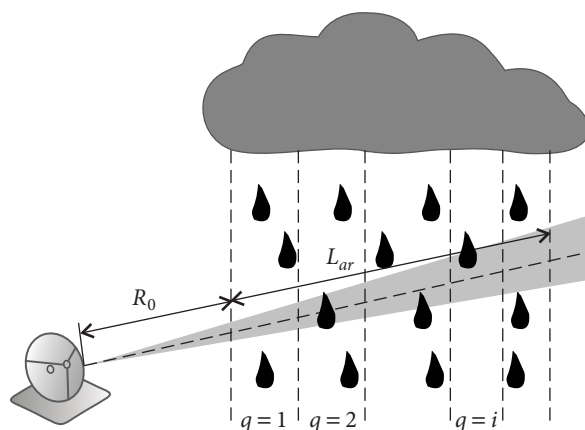


Рис. 2. Полігональна апроксимація профілю дощу

рами [11] на основі усереднених даних контактних вимірювань [4, 12]:

$$\alpha = aI^{-b}, \quad \beta = cI^g,$$

$$N_c = \sigma_0^r(\lambda_2) \times \frac{\Gamma(\alpha + 1)\beta^{\alpha+1}}{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \sigma_p(\lambda_2, d) d^\alpha \exp\left(-\frac{d}{\beta}\right) dd} \quad (4)$$

де α, β — параметри гамма-розподілу; N_c — концентрація крапель; $a = 3,8$, $b = 0,42$, $c = 0,148$, $g = 0,38$ [4]; $\sigma_p(\lambda, d)$ — ЕПР окремих частинок. Потім обчислюють величину ослаблення відповідно до виразу (3).

Нижче наведено результати чисельного моделювання процесу двочастотного зондування просторово однорідного дощу, коли його інтенсивність і параметри розподілу крапель за розмірами залишаються постійними уздовж усієї зони дощу. Помилки відновлення профілю інтенсивності, отримані для випадку гамма-розподілу крапель за розмірами і протяжності зони дощу 5 км, показано на рис. 3—6. На рисунках криві 1 — це результати з урахуванням ослаблення на двох довжинах хвиль, криві 2 — результати з урахуванням ослаблення на меншій довжині хвилі, криві 3 — результати без урахування ослаблення.

Як і в попередніх дослідженнях [2], помилка відновлення інтенсивності для слабких дощів ($I = 1$ мм/год) досить велика (більше 30 %, рис. 3), а нехтування ослабленням призводить до незначного зростання помилки відновлення (10 % на 5 км).

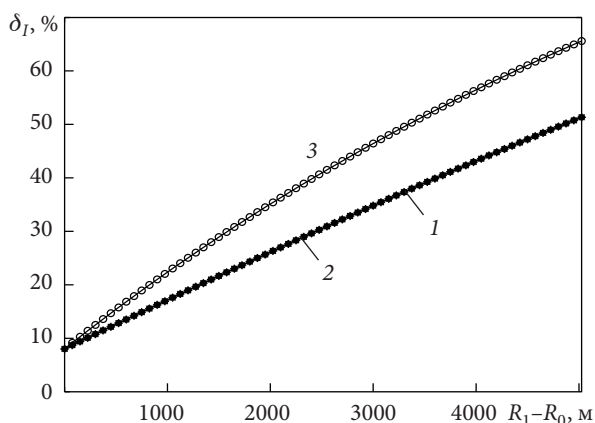


Рис. 3. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності, яку отримано з використанням прямої ітераційної процедури при $I = 1$ мм/год

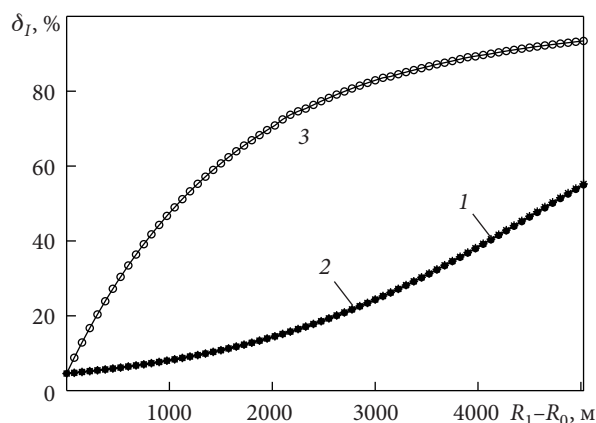


Рис. 4. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності, яку отримано з використанням прямої ітераційної процедури при $I = 5$ мм/год

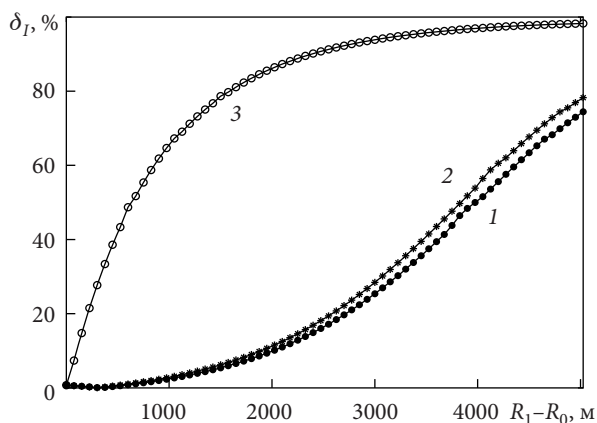


Рис. 5. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності, яку отримано з використанням прямої ітераційної процедури при $I = 10$ мм/год

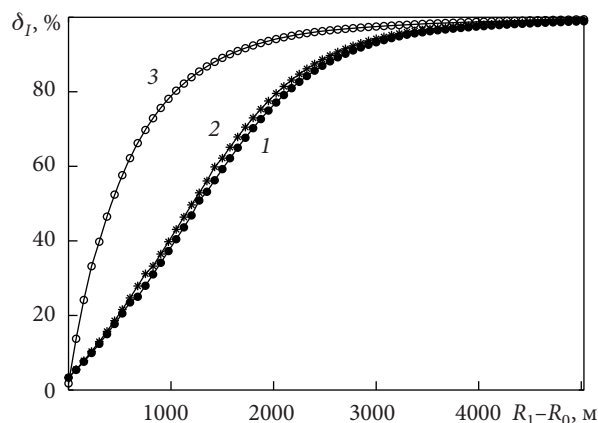


Рис. 6. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності, яку отримано з використанням прямої ітераційної процедури при $I = 20$ мм/год

Для більш сильних дощів ($I = 1 \dots 10$ мм/год) з протяжністю до 2,5 км запропонований підхід дозволяє відновлювати профіль інтенсивності з прийнятною точністю (помилка не більше 20 %). Протяжність дощів з інтенсивністю $I = 10 \dots 20$ мм/год повинна бути не більше 500 м. Для дощів з інтенсивністю понад 20 мм/год або дощів з більшою протяжністю ефективність запропонованої ітераційної процедури значно знижується через сильне зростання величини ослаблення сигналів.

Крім цього, отримані результати показують, що нехтування ослабленням призводить до дуже великих помилок вже починаючи з інтенсивності 5 мм/год. Вплив ослаблення на довжині хвилі 3,2 см незначний, а нехтування ним практично не відображається на результатах відновлення (криві 2 на рис. 3–6).

Оскільки процедура урахування ослаблення використовує усереднені дані контактних вимірювань для гамма-розподілу (4), то важливо оцінити вплив виду розподілу крапель за розмірами на результати відновлення профілю інтенсивності. Для цього було проведено порівняння результатів моделювання двочастотного зондування дощу (рис. 7–9) з гамма-розподілом крапель за розмірами (криві 1) та логнормальним розподілом [13] (криві 2) для різних значень інтенсивності дощу.

Видно, що тип розподілу якісно не змінює попередніх висновків (рис. 3–6) щодо ефективності ітераційної процедури — результати, отримані для гамма-розподілу (криві 1) і логнормального розподілу (криві 2), досить близькі.

Обернена ітераційна процедура. Оскільки запропонована методика урахування ослаблення

сигналу для великих значень інтенсивності та протяжності дощу дає незадовільні результати, пропонується розглянути обернену ітераційну процедуру, в якій ітераційний процес рухається від останнього елемента розділення за дальністю до першого. Однак у цьому випадку необхідне проведення незалежних оцінок повних ослаблень сигналів на трасі в якості початкових умов для ітераційного процесу. Такі оцінки можуть бути отримані, наприклад, за допомогою радіометра.

Не зупиняючись на конкретному способі оцінки повного ослаблення на трасі, розглянемо результати відновлення однорідного профілю інтенсивності, отримані за допомогою оберненої ітераційної процедури для гамма-розподілу крапель за розмірами.

Як було показано (рис. 3–6), нехтування ослабленням на довжині хвилі 3,2 см практично не впливає на результати відновлення, тому розглянемо випадок урахування ослаблення тільки на меншій довжині хвилі (8,2 мм). Результати чисельного відновлення рівномірного профілю інтенсивності наведено на рис. 10–13 для різних значень інтенсивності та різних похибок вимірювання повного ослаблення на довжині хвилі 8,2 мм (криві 1 – похибка 0 %, криві 2 – похибка 50 %, криві 3 – похибка 100 %, криві 4 – похибка –20 %, криві 5 – похибка –50 %).

Отримані результати показують, що використання оберненої ітераційної схеми дозволяє знизити помилку відновлення інтенсивності порівняно з результатами, що отримані для прямої ітераційної процедури.

Виявлено, що найбільший вплив на результати відновлення надає від'ємна похибка вимірювання повного ослаблення –50 % (за винятком $I = 1$ мм/год), тоді як аналогічна додатна похибка призводить до менших помилок відновлення інтенсивності.

Для зони дощу більше 3,5...4 км наявність похибки більш |50| % для повного ослаблення призводить до різкого зростання помилки відновлення.

На рис. 14–17 наведені результати відновлення, аналогічні рис. 10–13, проте отримані для похибок вимірювання повного ослаблення ± 50 % і з урахуванням помилки обчислення питомих ЕПР на робочих довжинах хвиль ± 20 % (криві 1 – похибка вимірювання повного ослаб-

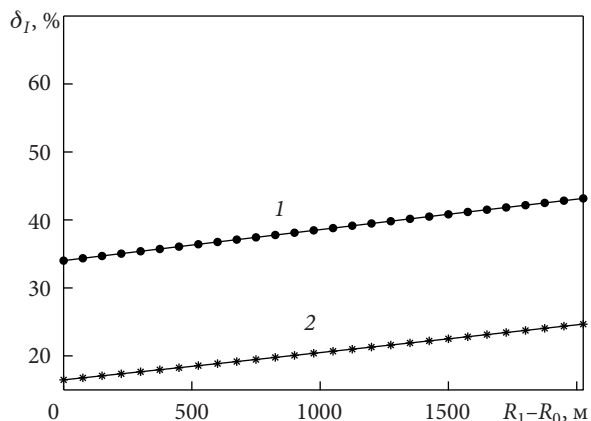


Рис. 7. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності, яку отримано для різних розподілів крапель за розмірами при $I = 1$ мм/год

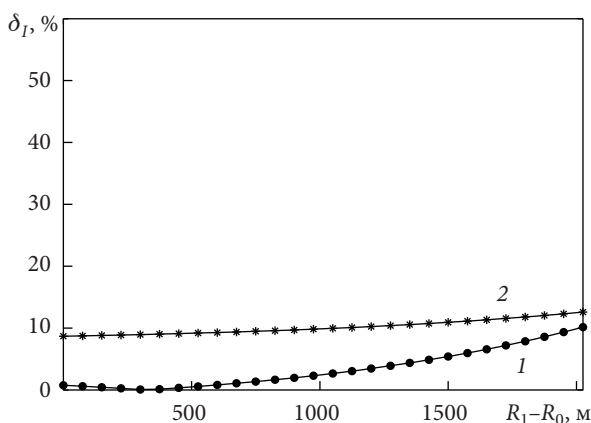


Рис. 8. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності, яку отримано для різних розподілів крапель за розмірами при $I = 10$ мм/год

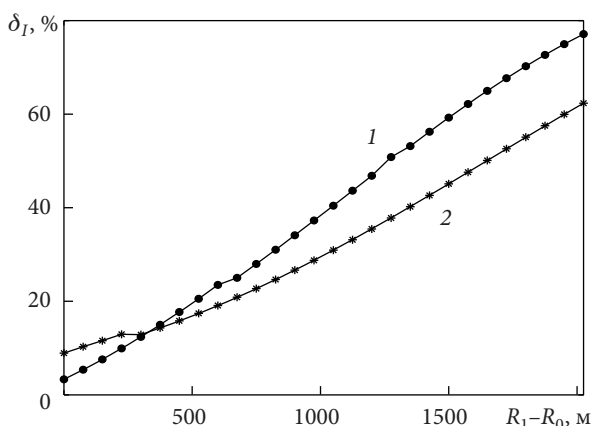


Рис. 9. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності, яку отримано для різних розподілів крапель за розмірами при $I = 20$ мм/год

лення +50 % і помилка розрахунку питомих ЕПР +20 %; криві 2 – похибка вимірювання повного ослаблення +50 % і помилка розрахун-

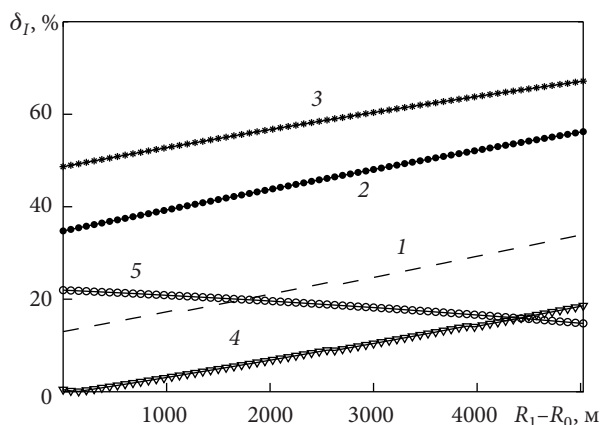


Рис. 10. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності при $I = 1$ мм/год, яку отримано з використанням оберненої ітераційної процедури для різних похибок вимірювання повного ослаблення на довжині хвилі 8,2 мм

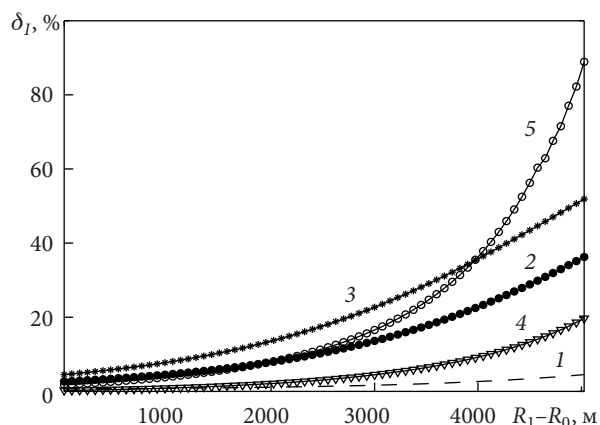


Рис. 11. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності при $I = 5$ мм/год, яку отримано з використанням оберненої ітераційної процедури для різних похибок вимірювання повного ослаблення на довжині хвилі 8,2 мм

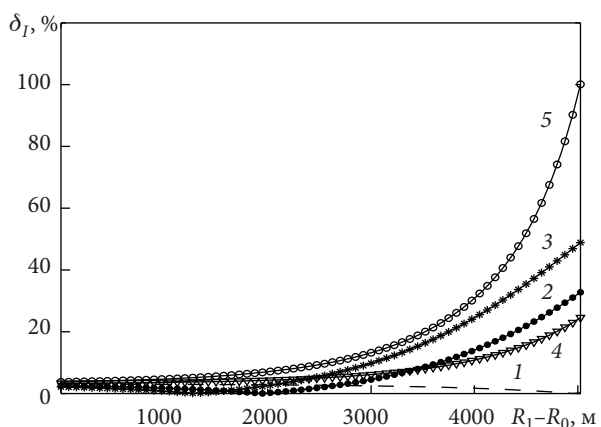


Рис. 12. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності при $I = 10$ мм/год, яку отримано з використанням оберненої ітераційної процедури для різних похибок вимірювання повного ослаблення на довжині хвилі 8,2 мм

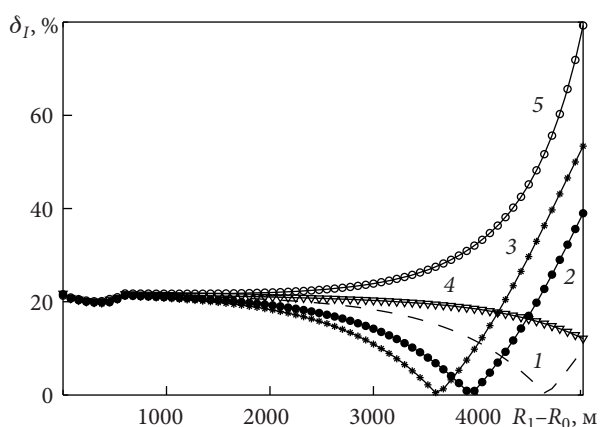


Рис. 13. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності при $I = 20$ мм/год, яку отримано з використанням оберненої ітераційної процедури для різних похибок вимірювання повного ослаблення на довжині хвилі 8,2 мм

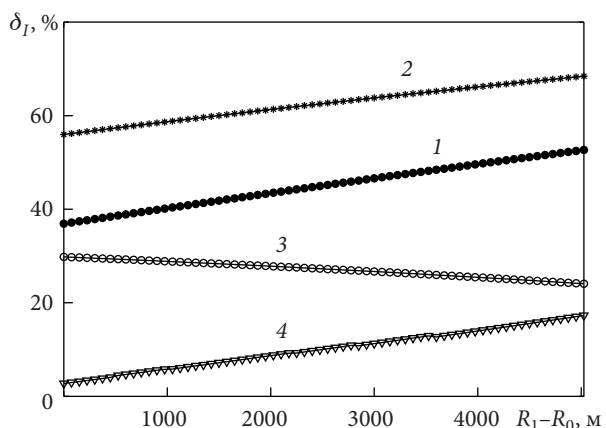


Рис. 14. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності при $I = 1$ мм/год, яку отримано з використанням оберненої ітераційної процедури для похибок вимірювання повного ослаблення $\pm 50\%$ та помилок обчислення питомих ЕПР на робочих довжинах хвиль $\pm 20\%$

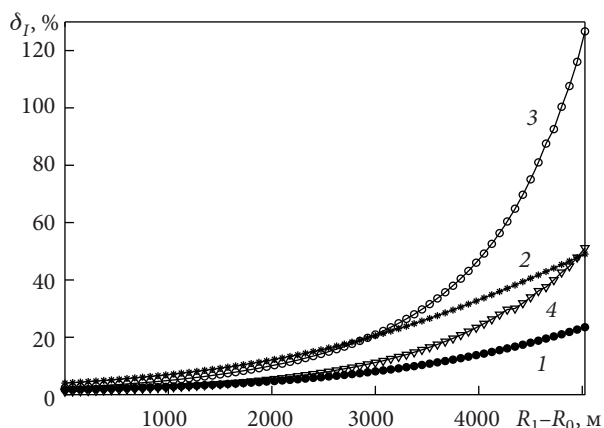


Рис. 15. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності при $I = 5$ мм/год, яку отримано з використанням оберненої ітераційної процедури для похибок вимірювання повного ослаблення $\pm 50\%$ та помилок обчислення питомих ЕПР на робочих довжинах хвиль $\pm 20\%$

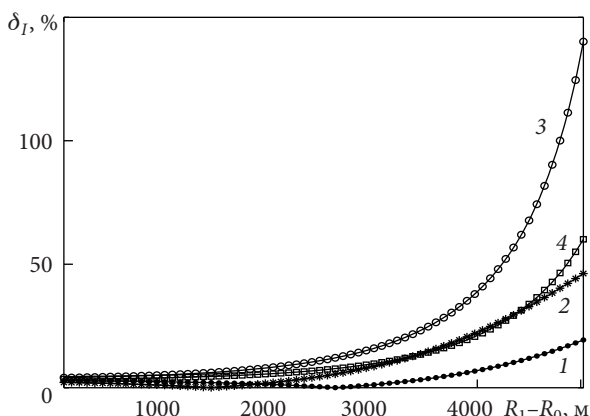


Рис. 16. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності при $I = 10$ мм/год, яку отримано з використанням оберненої ітераційної процедури для похибок вимірювання повного ослаблення $\pm 50\%$ та помилок обчислення питомих ЕПР на робочих довжинах хвиль $\pm 20\%$

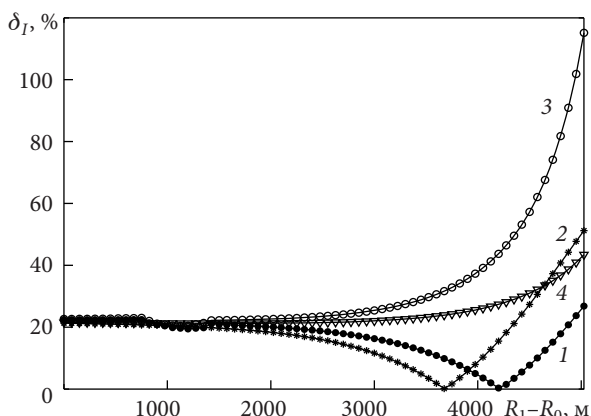


Рис. 17. Помилка відновлення рівномірного профілю інтенсивності при $I = 20$ мм/год, яку отримано з використанням оберненої ітераційної процедури для похибок вимірювання повного ослаблення $\pm 50\%$ та помилок обчислення питомих ЕПР на робочих довжинах хвиль $\pm 20\%$

ку питомих ЕПР -20% , криві 3 — похибка вимірювання повного ослаблення -50% і помилка розрахунку питомих ЕПР $+20\%$, криві 4 — похибка вимірювання повного ослаблення -50% і помилка розрахунку питомих ЕПР -20%).

Найбільші помилки відновлення спостерігаються для випадку похибок вимірювання повного ослаблення -50% і помилок розрахунку питомих ЕПР $+20\%$ (криві 3), а найменші — для випадку $+50\%$ і $+20\%$ (криві 1), за винятком $I = 1$ мм/год. У цілому, запропонований підхід дозволяє відновлювати профіль інтенсивності дощу з помилкою 25% аж до $I = 20$ мм/год для протяжності зони дощу 4 км при похибках вимірювання повного ослаблення і помилках розрахунку питомих ЕПР $\pm 20\%$.

Підвищити точність відновлення інтенсивності дощу можна шляхом зниження похибок вимірювань (радіояскравісної температури, прийнятої потужності та ін.), а також удосконаленням запропонованого підходу до розв'язан-

ня інтегрального рівняння розсіювання шляхом пошуку нових критеріїв вибору рішень, застосуванням інших видів регуляризації.

Висновки. Проведено чисельне моделювання відновлення рівномірного профілю інтенсивності дощу з використанням прямої та оберненої ітераційних процедур урахування ослаблення сигналів, а також розглянуто вплив помилок розрахунку повного ослаблення і питомих ЕПР на результати відновлення інтенсивності дощу.

Показано, що пряма ітераційна процедура неефективна для дощів з інтенсивністю більше 20 мм/год або з інтенсивністю $10 \dots 20$ мм/год і протяжністю зони дощу понад 500 м.

Використання оберненої ітераційної процедури дозволяє відновлювати профіль інтенсивності дощу з помилкою 25% , якщо $I = 20$ мм/год і протяжність зони дощу 4 км, при похибках вимірювання повного ослаблення і помилках розрахунку питомих ЕПР $\pm 20\%$.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Линкова А.М. Восстановление интенсивности дождя путем решения интегрального уравнения рассеяния при двухчастотном зондировании. *Радиофизика и электроника*. 2017. Т. 22, № 3. С. 23–32.
2. Линкова А.М. Влияние ошибки расчета пометной эффективной поверхности рассеяния на результат восстановления интенсивности дождя с помощью двухчастотного зондирования. *Радиофизика та електроніка*. 2021. Т. 26, № 2. С. 16–22.
3. Степаненко В.Д. *Радиолокация в метеорологии*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. 344 с.
4. Войтович О.А., Линкова А.М., Хлопов Г.И. Двухчастотное профилирование параметров дождя. *Радиофизика и электроника*. 2011. Т. 2(16), № 3. С. 51–60.
5. Mardiana R., Iguchi T., Takahashi N. A dual-frequency rain profiling method without the use of a surface reference technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2004. Vol. 42, Iss. 10. P. 2214–2225.
6. 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.

7. Яновський Ф.Й. *Метеонавігаційні радіолокаційні системи повітряних суден*. Київ: Міністерство освіти і науки України. Національний авіаційний університет, 2003.
8. Meneghini R., Kumagai H., Wang J.R., Iguchi T., Kozu T. Microphysical retrievals over stratiform rain using measurements from an airborne dual-wavelength radar radiometer. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1997. Vol. 35, Iss.3. P. 487–506.
9. Meneghini R., Liao L. On the equivalence of dual-wavelength and dual-polarization equations for estimations of the rain-drop size distribution. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2007. Vol. 24, Iss. 5. P. 806–820.
10. Линкова А.М., Хлопов Г.И. Восстановление интенсивности жидких осадков с помощью многочастотного активно-пассивного зондирования. *Радиофизика и электроника*. 2014. Т. 5(19), №3. С. 26–32.
11. Левин Л.М. *Исследование по физике грубодисперсных аэрозолей*. Москва: Изд. АН СССР, 1961. 267 с.
12. Литвинов И.В. *Структура атмосферных осадков*. Ленинград: Гидрометеоздат, 1974. 153 с.
13. Reist P.C. *Aerosol Science and Technology*. McGraw-Hall, 1993. 379 p.

Стаття надійшла 22.03.2021

REFERENCES

1. Linkova, A.M., 2017. Reconstruction of rain intensity by solving the integral scattering equation for two-frequency sounding. *Radiofiz. Elektron.*, **22**(3), pp. 23–32 (in Russian).
2. Linkova, A.M., 2021. Influence of error of calculation of specific effective scattering surface on the result of rain intensity recovery by means of two-frequency sounding. *Radiofiz. Elektron.*, **26**(2), pp. 16–22 (in Russian).
3. Stepanenko, V.D., 1973. *Radiolocation in meteorology*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
4. Voitovych, O.A., Linkova, A.M., Khlopov, G.I., 2011. Double frequency profiling of rain parameters. *Radiofiz. Elektron.*, **2**(16)(3), pp. 51–60 (in Russian).
5. Mardiana, R., Iguchi, T., Takahashi, N., 2004. A dual-frequency rain profiling method without the use of a surface reference technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **42**(10), pp. 2214–2225.
6. 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*. SPb: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
7. Yanovsky, F.I., 2003. *Radar systems for meteorological navigation of aircraft*. Kyiv: Ministry of Education and Science of Ukraine, National Aviation University Publ. (in Ukrainian).
8. Meneghini, R., Kumagai, H., Wang, J.R., Iguchi, T., Kozu, T., 1997. Microphysical retrievals over stratiform rain using measurements from an airborne dual-wavelength radar radiometer. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **35**(3), pp. 487–506.
9. Meneghini, R., Liao, L., 2007. On the equivalence of dual-wavelength and dual-polarization equations for estimations of the raindrop size distribution. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **24**(5), pp. 806–820.
10. Linkova, A.M., Khlopov, G.I., 2014. Reconstruction of the intensity of liquid precipitation using multifrequency active-passive sensing. *Radiofiz. Elektron.*, **5**(19)(3), pp. 26–32 (in Russian).
11. Levin, L.M., 1961. *Research on the physics of coarse aerosols*. Moscow: AN SSSR Publ. (in Russian).
12. Litvinov, I.V., 1974. *Structure of atmospheric precipitation*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
13. Reist, P.C., 1993. *Aerosol Science and Technology*. McGraw-Hall Publ.

Received 22.03.2021

A.M. Linkova

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NASU
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

CONSIDERATION OF THE SIGNAL ATTENUATION IN DOUBLE-FREQUENCY SENSING FOR RAIN INTENSITY RETRIEVAL

Subject and Purpose. Precipitation is the main source of agricultural land moisture. The knowledge of its amount, especially during the growing season, is important information to justify necessary agronomic and land reclamation measures. The purpose of this work is to solve by regularization the inverse problem of double-frequency sensing of precipitation in the microwave range with the signal attenuation considered and analyze the influence of radar cross-section (RCS) calculation errors and the total signal attenuation measuring precision on the rain intensity retrieval results.

Methods and Methodology. Numerical simulation is used in double frequency retrievals to solve the integral scattering equation by regularization methods.

Results. Numerical simulation has been performed for the rain intensity retrieval with a uniform spatial profile of rain intensity in the range 1...20 mm/h. Direct and inverse iterative procedures were used for having the signal attenuation at 0.82 and 3.2 cm operating wavelengths. It has been shown that the direct iterative procedure is less effective than the inverse one. Thus, when the rain intensity exceeds 20 mm/h or when it is within 10...20 mm/h and a rain spatial extent goes over 500 m, the direct iteration scheme causes significant errors in the rain intensity retrieval.

Conclusion. The analysis of the results has shown that the use of the inverse iterative procedure makes it possible to retrieve a uniform-profile rain intensity with a 25% error for rains with a 20 mm/h intensity and a 4 km spatial extent and $\pm 20\%$ errors in the total signal attenuation and specific RCS calculated.

Key words: inverse problem, rain intensity, signal attenuation.