

УДК 621.396.96

Ю.А. Авер'янова, к.т.н., доц.  
А.А. Аверьянов, к.т.н., доц.

## КОРЕКЦІЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СИГНАЛУ ЗА КУТОМ МІСЦЯ ПРОМЕНЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО МЕТЕОРОЛОГІЧНОГО РАДІОЛОКАТОРА

*Порівняно розрахунки за аналітичним виразом залежності коефіцієнта корекції радіолокаційного сигналу за кутом місця з відомими експериментальними даними. Показано розроблену структурну схему автоматичної корекції та видалення гравітаційної складової під час оцінювання інтенсивності турбулентності.*

*The analytical calculations of radar signal correction coefficient on elevation angle is compared with known experimental data. The developed structural diagram of automatic correction and gravitational component separation when turbulence intensity estimate is shown.*

### Вступ

У наш час для дослідження атмосферних процесів та явищ широко використовують радіолокаційні засоби та методи. До них належать звичайні радіолокаційні методи, коли оцінюється потужність радіолокаційного сигналу, відбитого від досліджуваного об'єму, а також доплерівські та поляриметричні.

За допомогою доплерівських методів можна одержати інформацію про динамічні процеси в хмарах та опадах, за допомогою поляриметричних можна дізнатися про фазовий склад хмар, а також про інтенсивність опадів.

### Аналіз досліджень і публікацій

Під час вирішення задач локалізації небезпечних метеорологічних явищ цікаві результати одержали в разі використання комбінації доплерівських і поляриметричних методів, які називають доплерівсько-поляриметричними.

У роботах [1; 2] розглянуто поляризацію відбитого поляризаційного сигналу, яка викликана деформацією рідких часточок під дією гравітації, в роботі [3] – деформацію рідких гідрометеорів з одночасною дією сил гравітації та вітру, включаючи такі явища, як зсув вітру та турбулентність, у роботах [4; 5] – можливість використовувати поляриметричні методи для оцінювання інтенсивності турбулентності, а також для оцінювання параметрів вітру. У роботі [6] одержано аналітичний вираз для корекції радіолокаційного сигналу відповідно до кута місця променя поляриметричного радіолокатора. У цій роботі показано можливість практичного використання такого виразу для розв'язання задач оцінювання небезпечних метеорологічних явищ, пов'язаних з вітром.

### Оцінювання сигналу корекції за кутом місця променя

У роботі [5] показано, що зміна поляризації відбитого радіолокаційного сигналу залежить від розміру, форми та просторової орієнтації гідрометеорів. Гідрометеори різних розмірів змінюють свою форму під дією градієнта вітру по-різному та з різною швидкістю.

Таким чином, можна подати відбитий сигнал як набір коливань однієї частоти, але різної поляризації, що змінюється з часом. Назвемо такий набір поляризаційним спектром відбитого сигналу. У такому випадку поляризаційний спектр відбитого сигналу вміщує як складові, які з'являються завдяки дії гравітації (гравітаційні складові), так і складові, що з'явилися як наслідок дії турбулентності (турбулентні складові).

Для оцінювання інтенсивності турбулентності та характеристик вітру необхідно виділити турбулентну складову з повного спектра сигналу поляризації відбитого сигналу. Сепарувати турбулентні складові від викликаних гравітацією можна завдяки різній природі виникнення цих складових. Гравітаційна складову викликана гравітаційним рухом, завжди наявна у спектрі поляризації, її можна розглядати як детерміновану величину. Турбулентна складову сигналу спектра поляризації – випадкова величина, з'являється тільки в турбулентній (нестабільній) атмосфері.

Для того, щоб визначити турбулентну складову спектра поляризації, необхідно мати інформацію про гравітаційну складову, яку можна виміряти під час зондування спокійної атмосфери. Для визначення гравітаційної складової спектра поляризації скористаємося даними експерименту, наведеними в роботі [1], де показано залежність зміни поляризаційних характеристик радіолокаційного сигналу (диференціальної відбиваності та лінійного деполіризаційного відношення) від кута місця променя в спокійній атмосфері (рис. 1).

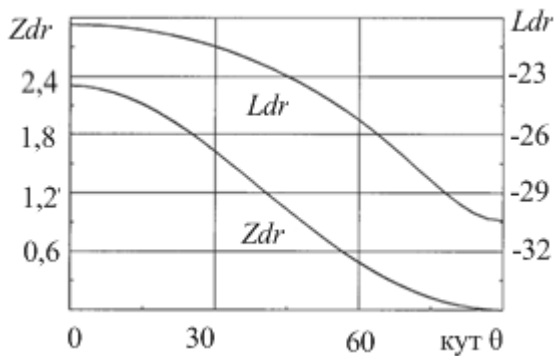


Рис. 1. Залежність поляризаційних характеристик радіолокаційного сигналу  $Z_{dr}$  (диференціальної відбиваності) та  $L_{dr}$  (лінійного деполаризаційного відношення) від кута  $\theta$

Диференціальна відбиваність визначається як радіолокаційна відбиваність за різної поляризації зондувального та прийнятого радіолокаційних сигналів:

$$Z_{dr} = 10 \log \frac{|S_{hh}|^2}{|S_{vv}|^2},$$

де  $S_{hh}(v)$ ,  $S_{vv}(v)$  – сополяризаційні доплерівські спектри при горизонтальній та вертикальній поляризаціях відповідно.

Лінійне деполаризаційне відношення враховує перехресну складову відбитого сигналу відповідно до такого виразу:

$$L_{dr} = 10 \log \frac{|S_{hv}|^2}{|S_{vh}|^2},$$

де  $S_{hv}(v)$  – кросполяризаційний доплерівський спектр.

У спокійній атмосфері гідрометеори, що падають, набувають форми сплющеного сфероїда. Наслідком цього є деполаризація відбитого сигналу навіть у спокійній атмосфері. Ступінь деполаризації буде залежати від видимої форми гідрометеора і, таким чином, від кута місця променя метеорологічного радіолокатора.

У випадку вертикального зондування спостерігається диск, у іншому випадку крапля спостерігається як деформований еліпсоїд [1]. Результатом цього є поява кросполяризаційної складової, величина якої залежить від кута місця променя зондування.

Форма краплі, що падає у спокійній атмосфері, обумовлюється тим, що на неї діють сили аеродинамічного опору та сили поверхневого натягу (сили Стокса). Для крапель з діаметром меншим за  $D \leq 0,5-1$  мм, переважають сили поверхневого натягу, і краплі зберігають сферичну форму. Краплі з діаметром більшим за  $D \leq 0,5-1$  набувають форми сфероїда. Аеродинамічні сили сплющують сфероїд знизу, а форма його верхньої частини лишається близькою до сферичної форми [3; 6].

Проекція краплі, що сплющена знизу, на площину напрямку променя зондування змінюється від диска у випадку вертикального зондування до майже півкулі у випадку горизонтального зондування (рис. 2).

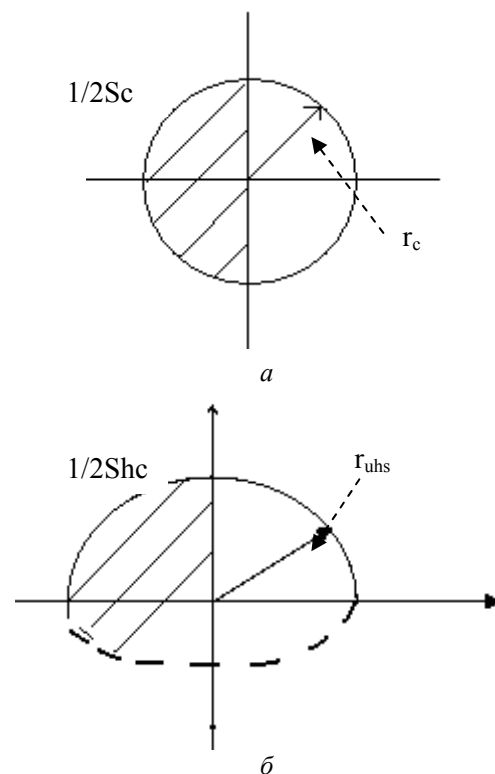


Рис. 2. Проекція краплі на площину напрямку променя зондування:

*a* - вертикальне зондування;

*б* - горизонтальне зондування

Потужність відбитого від крапель радіолокаційного сигналу з основною поляризацією залежить тільки від ефективної площі розсіювання гідрометеора, яка, у свою чергу, визначається площею проекції гідрометеора на напрямок зондувального променя.

Для розрахунку площі проекції на напрямок зондувального променя в роботі [6] було зроблено

спрощення: радіус кулі  $r_c$  дорівнює радіусу верхньої півкулі  $r_{uhs}$ .

Насправді радіус верхньої півкулі буде дещо більшим за радіус кулі у випадку деформації краплі постійного об'єму. За прийнятих умов форми краплі перетворення нижньої частини кулі  $S_c$  у півкулю  $S_{hc}$ , що є функцією кута місця  $\theta$ , визначається як відношення цих площ, як функцій кута місця променя радіолокатора:

$$\alpha(\theta) = \frac{S_c(\theta)}{S_{hc}(\theta)}. \quad (1)$$

Для верхньої півкулі у випадку, коли  $r_c = r_{uhs} = \text{const}$  залежність (1) можна записати у такому вигляді:

$$\alpha(\theta) = \frac{S_c}{S_{hsh} + S_{lhs}(\theta)}, \quad (2)$$

де  $S_{lhs}$  – площа екваторіального перерізу нижнього сегмента деформованої краплі-сфероїда (рис. 3). Проекція на площу, яка є нормаллю до радіолокаційного променя, зображена на рис. 3.

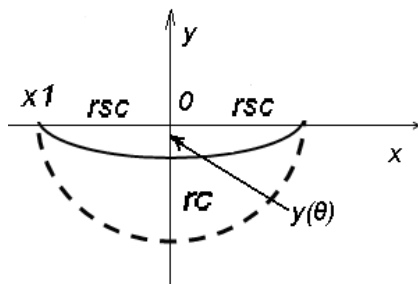


Рис. 3. Площа екваторіального перерізу нижньої півкулі як функція кута місця променя  $\theta$

Таким чином, для вирішення поставленої задачі у роботі [6] визначали залежність площі екваторіального перетину нижньої півкулі як функції кута місця  $\theta$ . Одержаний вираз для визначення площі підставимо в формулу (2). Потрібну площу знаходимо як площу сегмента еліпса, який сформувався у процесі стискування краплі-сфери уздовж осі  $y$  [6]. Виразимо потрібну залежність як функцію  $y(\theta)$ . Потрібна функція є функцією півосі еліпса, яка з'являється під час переходу сфери з радіусом  $r_c$  в еліпс з піввіссю  $y(\theta)$ , що змінюється зі зміною кута нахилу. За горизонтального сканування кут нахилу дорівнює нулю і відповідає мінімальній площі. Максимальний кут нахилу за вертикального зондування відповідає площі півкулі.

Для того, щоб розрахувати сегмент еліпса, скористаємося формулою для визначення площі се-

гмента еліпса між дугою та хордою, що проходить крізь точки  $(x1;y1)$  та  $(x1;-y1)$ :

$$S_{hs} = \frac{1}{2} \pi ab + \frac{b}{2} (x1 \sqrt{a^2 - x1^2} + a^2 \arcsin \frac{x1}{a}),$$

де

$a = r_c$  – радіус краплі, що апроксимується кулею;

$b = r_c \sin$ ;

$x1 = 0$ ,

та збігається з центром координатної системи.

Скінченний вираз для площі сегмента еліпса має вигляд:

$$S_{hs} = \pi ab \quad (3)$$

Підставимо вираз (3) у формулу (2) та одержимо:

$$\alpha(\theta) = \frac{\pi a^2}{\frac{1}{2} \pi a^2 + \pi a^2 \sin \theta}. \quad (4)$$

Після спрощення виразу (4) одержуємо формулу розрахунку коефіцієнта для корекції радіолокаційного сигналу за кутом місця під час зондування хмар та опадів:

$$\alpha(\theta) = \frac{1}{\frac{1}{2} + \sin \theta}. \quad (5)$$

Графічну залежність коефіцієнта показано на рис.4.

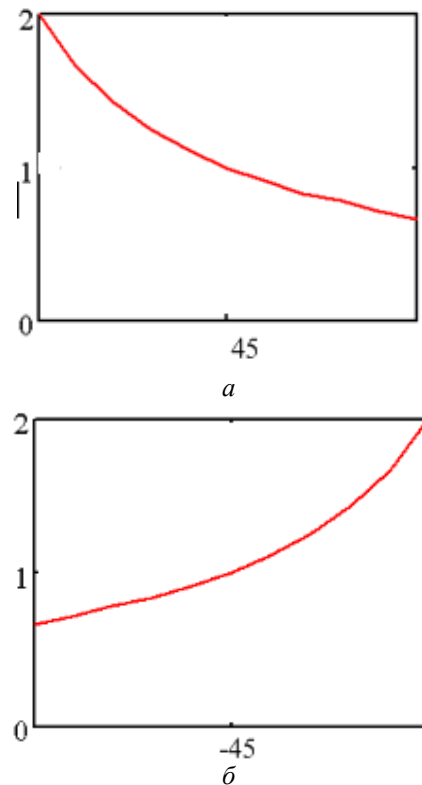
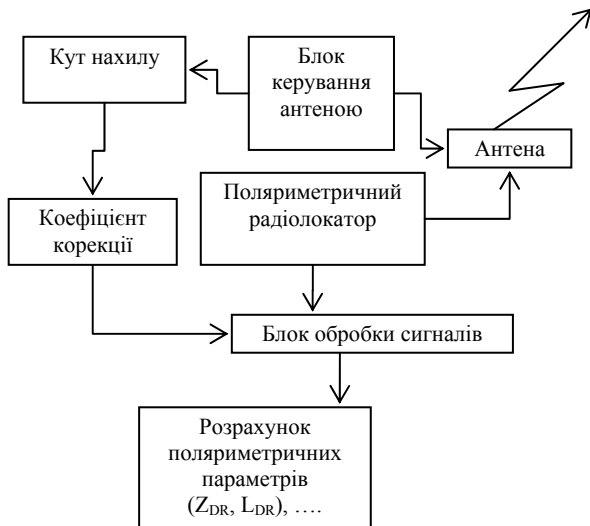


Рис. 4. Залежність коефіцієнта корекції за кутом місця:

$a$  – зміна кута  $\theta$  від 0 до  $90^\circ$ ;  
 $b$  – зміна кута  $\theta$  від 0 до мінус  $90^\circ$

Результати цього моделювання можуть бути використані для автоматичної корекції повного сигналу та видалення гравітаційної складової для оцінювання інтенсивності турбулентності.

Структурну схему пристрою автоматичної корекції та видалення гравітаційної складової для оцінювання інтенсивності турбулентності за до-



помогою поляриметричного радіолокатора зображено на рис. 5.

Рис. 5. Структурна схема автоматичної корекції та видалення гравітаційної складової під час оцінювання інтенсивності турбулентності

## Висновки

Порівняння діаграм теоретичної моделі (рис. 4) та даних експерименту (рис.1) показало, що вони мають однаковий характер. Відмінності в лівій частині діаграм, на ділянках малих кутів, можна

пояснити тим фактом, що для розрахунку коефіцієнта корекції використовувалась залежність видимої площі гідрометеора. Експериментальні залежності  $Z_{DR}$  та  $L_{DR}$  мають логарифмічну залежність.

Одержаний аналітичний вираз (5) може бути використаний для того, щоб визначити гравітаційну складову радіолокаційного сигналу для оцінювання перехресної компоненти радіолокаційного сигналу, що викликана наявністю турбулентності. Слід також зазначити, що залежність коефіцієнта корекції буде такою ж самою у випадку азимутального сканування.

Розроблену структурну схему пристрою можна використовувати для здійснення автоматичної корекції та видалення гравітаційної складової під час оцінювання інтенсивності турбулентності.

## Література

1. *Russchenberg, H.W.J.*, Ground-based remote sensing of precipitation using a multi-polarized FM-CW Doppler radar// Delft University Press, 1992. – 206 p.
2. *Яновський Ф.* Бортові метеорологічні радіолокатори: навч. посіб. – К.: НАУ, 2003. – 324 с.
3. *Averyanova Yu. A.* Use of Doppler-Polarimetric parameters for wind phenomena localization// EuRAD 2004, Proc. of the 34th European microwave Conf., 11-15 October 2004, Amsterdam. The Netherlands.
4. *Авер'янова Ю.А., Авер'янов А.А., Яновський Ф.Й.* Оцінка інтенсивності атмосферної турбулентності за допомогою поляриметричного радіолокатора // Вісн. НАУ. – 2006. – № 2. – С. 38–40.
5. *Averyanova Yu.* The possibility to use polarimetric radar for atmospheric turbulence intensity estimate // Proc. of the NAU. – 2006. № 3 (29). – P. 46–48.
6. *Averyanova Yu., Averyanov A., Yanovsky F.J.* Correction of Radar Signal on Elevation Angle when Reflecting from Turbulent Zone // Proc. SPIE. – 2007. – Iss. 12. – P. 191–196.

Стаття надійшла до редакції 14.10.08.