

Д. М. Глушко, Ф. Й. Яновський

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ОЦІНКИ РОЗПОДІЛУ КРАПЕЛЬ ЗА РОЗМІРАМИ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ДОЩУ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИМИ РАДІОЛОКАЦІЙНИМИ СТАНЦІЯМИ

Національний Авіаційний Університет

У роботі представлені результати аналізу сигналів когерентного доплерівського поляриметричного радіолокатора при зондуванні рідких опадів. Показано, що за даними вимірювання диференціальної доплерівської швидкості можна оцінити параметри розподілу крапель за розмірами, використовуючи моделі гама-розподілу.

Ключові слова: метеорологічний радіолокатор, поляриметричний радіолокатор, диференціальна доплерівська швидкість, гама-розподіл.

I. Вступ

У роботі [1] наведені визначення й моделі диференціальної доплерівської частоти і швидкості, а також показаний зв'язок диференціальної доплерівської швидкості (DDV) з інтенсивністю турбулентності у роздільному об'ємі опадів при дистанційному зондуванні когерентним метеорологічним радіолокатором. У той же час розрахунки показали, що результати вимірювань і оцінки турбулентності будуть різними за різних характеристик мікроструктури метеорологічного об'єкту.

Метою даної роботи є подальший аналіз моделей диференціальної доплерівської швидкості як вимірювальної змінної і оцінка можливостей її застосування для оцінки характеристик мікроструктури дощу.

У розділі II наведено визначення вимірювального параметру DDV, розділ III присвячений аналізу зв'язку між параметром DDV і мікроструктурою об'єкту, що відбиває, у розділі IV показано можливість оцінки характеристик розподілу крапель за розмірами за даними дистанційного зондування дощу, в останньому розділі VI сформульовані основні висновки виконаного дослідження.

II. Диференціальна доплерівська швидкість

Середню доплерівську швидкість за даної поляризації можна визначити і розрахувати як перший початковий момент доплерівсько-поляриметричного спектру $S_{mn}(v/\varepsilon, \theta)$, де v - доплерівська швидкість, ε - параметр, що характеризує інтенсивність турбулентності, θ - кут нахилу антени у вертикальній площині, m - поляризація на передавання, n - поляризація на приймання, $m = H; V$, $n = H; V$, H - спеціальний випадок горизонтальної поляризації, V - вертикальної. Параметр DDV може бути визначений наступним чином:

$$DDV = \bar{v}_{HH} - \bar{v}_{VV} = \int_{-\infty}^{\infty} v S_{HH}(v) dv - \int_{-\infty}^{\infty} v S_{VV}(v) dv, \quad (1)$$

тобто він є різницею середніх доплерівських швидкостей, визначених за умовою двох ортогональних поляризацій – горизонтальної і вертикальної. За такого визначення DDV залежить від кута нахилу антени, який завжди є відомим і може бути скомпенсованим, наприклад, шляхом ділення на синус кута місця.

Якщо спектр відомий з математичних моделей або з результатів вимірювань, то вираз (1) є досить зручним для розрахунку параметра DDV за різноманітних умов. Наприклад, відомо, що великі краплі дощу сплюснуті сильніше за дрібні краплі. Крім того, вони і падають в повітрі швидше ніж дрібні краплі. Великі краплі роблять також суттєво більший внесок у середнє значення доплерівської швидкості на горизонтальній поляризації, ніж на вертикальній поляризації через те, що зазвичай несферична (сплюснута) крапля дощу, яка моделюється сфероїдом, під час падіння орієнтована таким чином, що більша вісь сфероїда розташована переважно горизонтально [2]. Тому з формули (1) випливає, що для параметра DDV характерні позитивні або близькі до нуля значення.

III. Зв'язок параметра DDV з мікроструктурою відбивального об'єкта

Розроблене раніше [3] програмне забезпечення було модернізовано для розрахунку параметра DDV за різних значеннях характеристик розподілу крапель за розмірами, що описує мікроструктуру опадів, і параметрів вітру, точніше, його турбулентних пульсацій. За модель розподілу за розмірами (еквівалентними діаметрами D крапель) брався гама-розподіл у стандартній для радіолокаційної

метеорології формі

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp\left(-\frac{3.67 + \mu}{D_0} D\right), \quad (2)$$

де N_0 - концентрація крапель, D_0 - медіанний діаметр крапель, μ - параметр ширини (і форми) гама-розподілу.

Вихідними даними є:

- параметри розподілу крапель за розмірами μ та D_0 ;
- кут місця, або кут нахилу антени θ ;
- середня швидкість вітру W і параметри турбулентності, а саме, швидкість дисипації кінетичної енергії ε і максимальний зовнішній масштаб L_{out} турбулентності [4], тобто, найбільший розмір вихору L , який береться до уваги;

- поляризаційна модель, а саме: радіолокаційний сигнал з лінійною поляризацією, що може бути задана як «горизонтальна» або «вертикальна» на передавання і приймання, формуючи основні ортогональні поляризаційні комбінації HH , VV і перехресні HV (VH) комбінації.

Програмне забезпечення формує моделі розподілу крапель за розмірами у відповідності із заданими вихідними даними. Далі розраховуються розподіли швидкостей падіння крапель і розподіл турбулентних швидкостей крапель з урахуванням інерційності крапель різної маси. Такі дані відкривають можливість отримати статистичні характеристики руху розсіювачів (крапель) у відбивному (роздільному) об'ємі. Після інтегрування зі зважуванням на ефективну площу відбивання крапель, яка розраховується з урахуванням розміру і форми крапель, розроблене програмне забезпечення дозволяє отримати доплерівські спектри за різних комбінацій поляризації на передавання і приймання. В результаті розраховуються параметри DDV за різних вихідних даних. Це дає можливість дослідити залежність параметра DDV від особливостей мікроструктури дощу і характеристиками турбулентності у ньому.

Досліджуючи моделі доплерівських спектрів $S_{mn}(v/\varepsilon, \theta)$ за допомогою зазначеного програмного забезпечення, вдається прослідити поведінку параметра DDV за різних умов і визначити зв'язок цього параметра з мікроструктурою дощу, яка задається вихідним розподілом крапель за розмірами. Були виконані численні розрахунки і проаналізовані їх результати. Нижче подані деякі приклади. Зокрема, на рис. 1 показана залежність між параметром DDV і одним з основних параметрів гама-моделі розподілу крапель за розмірами, який характеризує мікроструктуру дощу – параметром форми μ .

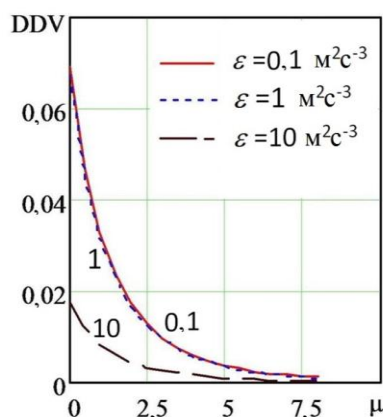


Рис. 1. Параметр DDV як функція параметра форми μ за $D_0 = 2,0$ мм, $\theta = 30^\circ$ і трьох значеннях параметра інтенсивності турбулентності ε .

З рис.2 видно, що більші значення μ відповідають меншим значенням DDV (нагадаємо, що $\mu = 0$ відповідає розподілу Маршалла-Пальмера. Ці розрахунки доцільно доповнити дослідженням впливу другого параметра розподілу крапель за розмірами – медіанного діаметра крапель D_0 на поведінку DDV. Як відомо, медіанний діаметр можна надійно зв'язати з інтенсивністю дощу. На рис.2, де представлено залежність параметра DDV з D_0 , три криві відповідають різним значенням швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності за однакових параметрах $\mu = 2$.

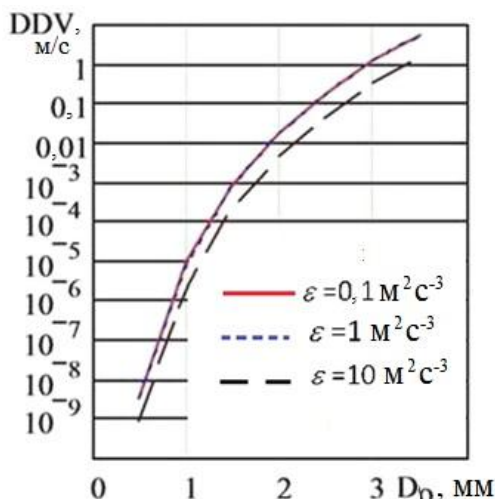


Рис.2. DDV як функція D_0 за $\mu=2$, $\theta=30^\circ$ і трьох значеннях ε .

Фактично, знаючи μ і D_0 , можна відтворити розподіл крапель за розмірами, тобто отримати повну інформацію про мікроструктуру дощу як об'єкту радіолокаційного спостереження. З цих самих даних можна побачити, що слабка турбулентність несуттєво впливає на DDV. Інакше кажучи, взаємозв'язки між параметром DDV як вимірюваною змінною і параметрами розподілу крапель за розмірами як необхідними даними є дійсно сильними у випадку відсутності турбулентності. Отже параметр DDV можна використовувати як характеристику мікроструктури досліджуваного об'єкту, принаймні за слабкої турбулентності, а також, якщо дані про турбулентність є відомими.

Збільшення медіанного діаметру крапель D_0 безперечно веде до зростання параметра DDV, а збільшення параметру μ призводить до зменшення DDV.

IV. Можливість оцінки характеристик розподілу крапель за розмірами за даними дистанційного зондування дощу

Зв'язок DDV з характеристиками мікроструктури опадів та слабка (у більшості випадків) залежність DDV від турбулентності дає можливість розглядати DDV як вимірюваний параметр для дистанційної оцінки характеристик мікроструктури дощу, що раніше було неможливо. За відсутності вітру і турбулентності параметр DDV залежить від середніх швидкостей падіння крапель, які знаходяться у радіолокаційному відбивальному об'ємі, зважених на радіолокаційну відбиваність, яка виявляється є більшою за горизонтальної поляризації аніж за вертикальної через сплюснутість великих крапель. Відомий поляризаційний параметр диференціальна відбиваність $ZDR = 10 \lg(Z_{HH}/Z_{VV})$ за тих же умов також є додатним і збільшується із зростанням медіанного діаметра та інтенсивності дощу. Розроблені математичні моделі і програмне забезпечення [1], засновані на теорії доплерівсько-поляриметричних спостережень [3], [5], [6], дозволяють розрахувати DDV і ZDR за однакових значень кута нахилу антени і параметрів розподілу крапель за розмірами з урахуванням інтенсивності турбулентності. Результати таких розрахунків представлені на рис. 3 у вигляді залежності DDV від ZDR за різних значень параметрів μ .

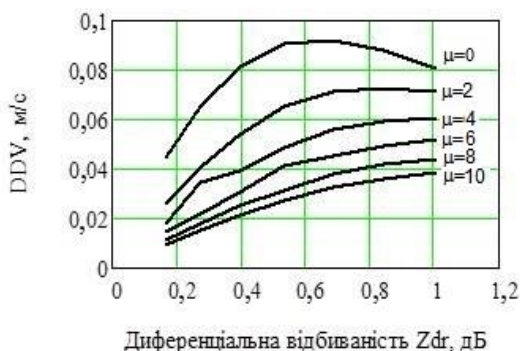


Рис. 3. Розрахункові оцінки параметрів DDV і ZDR за різних μ .

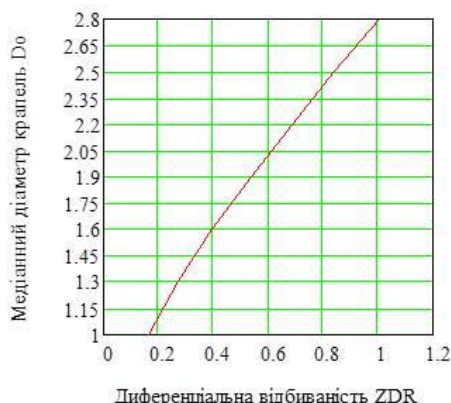


Рис. 4. Відповідність між медіанним діаметром розподілу крапель за розмірами і диференціальною відбиваністю

Ці розрахунки проведені за постійних значень $\theta=45^\circ$, $\varepsilon=1 \text{ cm}^2/\text{c}^3$, $N_0=8000$ шляхом змінення D_0 у

межах від 1 мм до 2,8 мм з кроком 0,3 мм. Зворотна функція $D_0 = f(ZDR)$ показана на рис. 4.

Наведені результати показують, що спостережувані значення DDV разом з такими традиційними поляриметричними параметрами, як диференціальна відбиваність ZDR , а також іншою апріорною інформацією, наприклад про інтенсивність дощу, може бути використана для отримання всіх трьох параметрів розподілу крапель за розмірами: D_0 , μ і масштабного параметра N_0 , особливо якщо відбиваність Z також вимірюється, неважливо за горизонтальної Z_{VV} або вертикальної Z_{HH} поляризації.

V. Висновки

У випадку опису мікроструктури опадів розподілом крапель за розмірами у формі гама – розподілу з параметрами форми μ і медіанного діаметру крапель D_0 , доведено, що за інших рівних умов величина DDV є меншою, якщо параметр форми μ менше, в той час як DDV збільшується за зростанням D_0 .

Вплив турбулентності призводить до часткового перемішування розсіювачів, змінює їх просторову орієнтацію і викликає зменшення величини DDV.

Параметр DDV можна розглядати як нову вимірювану змінну у дистанційному зондуванні опадів, яка містить інформацію про мікроструктуру дощу.

Абсолютні величини змінення параметра DDV під впливом турбулентності суттєво менше, аніж зміни, викликані відмінностями у мікроструктурі опадів. Тому параметр DDV, перш за все доцільно розглядати як інформаційний параметр для дослідження мікроструктури дощу і отримання інформації про розподіл крапель за розмірами. При цьому необхідно враховувати ступінь турбулізованості метеоб'єкту для уточнення кількісного зв'язку параметра DDV з характеристиками мікроструктури відбивального об'єкту, що відповідає роздільній здатності радіолокатора.

Очікувана ефективність застосування DDV як додаткового вимірювального параметра до відомих доплерівських і поляризаційних параметрів пояснюється незалежністю параметра DDV та інших вимірювальних змінних, тоді як зв'язок між DDV і параметрами мікроструктури дощу є досить істотною.

Література

1. Глушко, Д.М.: Моделі диференціальної доплерівської частоти у радіолокаційних спостереженнях опадів. Вісник інженерної академії, вип. 1-2, 2014.- С. 66-70.
2. Doviak, R.; Zmic, D.: Doppler Radar and Weather Observations, 2nd ed., London: Academic Press, 1993.
3. Yanovsky, F. J.: Phenomenological Models of Doppler-Polarimetric Microwave Remote Sensing of Clouds and Precipitation. IEEE IGARSS, 2002, Toronto, Canada, Vol. 3, pp. 1905 -1907.
4. Tatarski, V. I. : Wave Propagation in a Turbulent Medium. McGraw-Hill, 1961.
5. Yanovsky, F.J.; Russchenberg, H.W.J.; Ligthart, L.P.; Fomichev, V.S. : Microwave Doppler-Polarimetric Technique for Study of Turbulence in Precipitation. Proc. IEEE IGARSS, 2000, Honolulu, USA, Vol. V, pp. 2296-2298.
6. Yanovsky, F.; Russchenberg, H.; Unal, C.: Retrieval of Information about Turbulence in Rain by Using Doppler-Polarimetric Radar. IEEE Trans.MTT, Feb., Vol. 53, No 2, 2005, pp. 444-450.