

УДК 621.396.96

¹Ю.А. Авер'янова, канд. техн. наук
 А.О. Аверьянов
²Ф.Й. Яновський

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРУ

НАУ, кафедра аеронавігаційних систем
 e-mail: ¹Yuliya_ans@yahoo.co.uk; ²ynovsrj@.com.ua

Досліджено вплив вітру на параметри руху та форму гідрометеорів. Показано можливість визначення характеристик вітру за допомогою бортового поляриметричного радіолокатора. Визначено характеристики вітру за реакцією середовища під дією вітру.

Вступ

Розвиток сучасної авіації, вимоги до планування повітряного руху (ПР) та виконання польотів потребують забезпечення пілотів і працівників обслуговування повітряного руху (ОПР) оперативною інформацією про умови польоту.

Однією зі складових служби ОПР є служба метеорологічного забезпечення польотів. Важливим її обов'язком є інформування працівників ПР про можливі складні та небезпечні метеоявища (НМЯ) по всій трасі польоту і під час виконання зльоту та посадки повітряного судна (ПС).

Згідно з ІКАО небезпечними явищами, які можуть вплинути на виконання польоту і/або заподіяти шкоди авіаційному обладнанню та призвести до катастрофічних наслідків, є явища, що пов'язані з вітром [1].

До них належать сильна атмосферна турбулентність і зсув вітру. Під час зльоту та посадки ПС особливу увагу приділяють різновидам зсуву вітру – мікробибуху або мікропориву.

Аналіз досліджень і публікацій

У теперішній час більшість інформації про небезпечні метеорологічні умови прогнозується для всієї траєкторії польоту з використанням даних аерологічного зондування та даних біляземних вимірювань. Ці дані мають значні просторові та часові обмеження.

Небезпечні вітрові явища, в свою чергу, мають невеликі просторові та часові масштаби, можуть виникати та зникати зненацька і повністю несподівано для ПС. Саме це зумовило необхідність розвитку засобів, за допомогою яких можна здійснювати вчасне виявлення зон НМЯ, та оперативно попереджати їх можливі наслідки.

Часткове рішення проблеми стало можливим з появою доплерівських РЛС. Ці засоби дозволяють одержати інформацію про радіальну складову швидкості вітру [2].

Постановка завдання

Подальші дослідження методів дистанційного зондування, а саме поляриметричних і доплерівсько-поляриметричних [3; 4], показали можливість і доцільність їх використання у вирішенні цього питання.

Поляриметричні параметри

Традиційними поляриметричними параметрами, які найчастіше використовують, є радіолокаційні відбиття при різних поляризаціях випроміненої та прийнятої хвилі, диференціальне відбиття та лінійне деполаризаційне відношення, яке враховує перехресну складову відбитого сигналу:

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{|S_{hh}|^2}{|S_{vv}|^2};$$

$$L_{DR} = 10 \log \frac{|S_{hv}|^2}{|S_{vv}|^2}.$$

Ці параметри, насамперед, чутливі до просторової орієнтації гідрометеорів, що дозволяє використовувати їх для ідентифікації мікроструктури опадів. У праці [5] був проведений аналіз впливу вітру на параметри руху й орієнтацію гідрометеорів, які, в свою чергу, мають зв'язок з поляриметричними параметрами.

Вплив вітру на параметри руху й орієнтацію гідрометеорів

У разі появи бокового вітру крапля почне рухатися і горизонтально з прискоренням $\frac{dV_d}{dt}(t)$, де

V_d – швидкість краплі. Сумарний вектор руху краплі буде відхилюватися від вертикального напрямку на деякий кут δ (рис. 1), який є пропорціональним відношенню

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\frac{dV_d}{dt}(t)}{g},$$

де g – прискорення гравітації.

Як результат дії двох прискорень dV_d/dt і g , крапля почне рухатися впродовж ОА та змінювати свою форму (рис. 1).

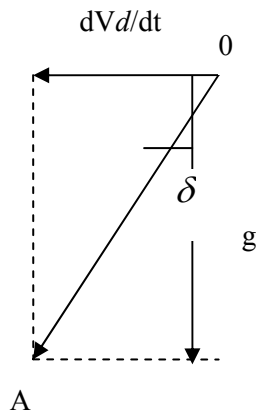


Рис. 1. Діаграма сил, які діють на краплю за наявності вітру

Якщо частинка опромінюється горизонтально і вертикально поляризованими хвилями, то у відбитому сигналі з'явиться перехресна складова, яка зумовлена деформацією краплі та враховує кут δ нахилу частинки. Параметр, який враховує перехресну складову відбитого сигналу, – це L_{DR} . Залежність цього параметра від кута δ нахилу частинки показано на рис. 2.

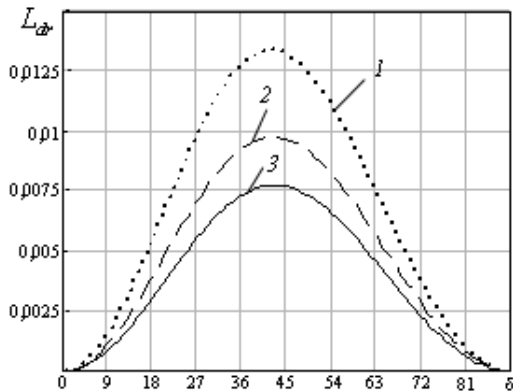


Рис. 2. Залежність L_{dr} від δ :
1 – $D_c = 3,5$ мм; 2 – $D_c = 3,2$ мм; 3 – $D_c = 3$ мм

Максимально можливе значення параметра L_{dr} з деяким фіксованим кутом орієнтації гідрометеора δ , який залежить від градієнта вітру, завжди досягається при значенні кута $\alpha = 90^\circ$. Ця умова виконується тоді, коли зондувальний промінь радіолокатора спрямований за нормаллю до напрямку вітру.

Розрахунки проводилися за співвідношенням, яке зв'язує параметр лінійного деполаризаційного відношення L_{dr} з кутом вітру α і напрямком зондувального променя:

$$L_{dr} = \frac{q_{hv}}{q_{vv}} = \frac{\left(\frac{1}{4} \sin 2\delta \sin \alpha (\Lambda_1 - \Lambda_3)\right)^2}{\left((\Lambda_3 - \Lambda_1) \cos^2 \delta + \Lambda_1\right)^2},$$

де L_{dr} – лінійне деполаризаційне відношення; q_{hh} , q_{vv} , q_{hv} – коефіцієнти форми та просторової орієнтації гідрометеорів в розсіюваному об'ємі; δ – кут нахилу частинки; α – між напрямком вітру та напрямком зондування; Λ_3, Λ_1 – електромагнітні коефіцієнти форми частинки. Наведена модель відповідає випадку елементарного розсіювача.

Складову швидкості вітру, яка є нормальною до напрямку проміння радіолокатора, визначимо з використанням відомого співвідношення між швидкістю та прискоренням:

$$V_w(t) = V_{w0} + \int_{t=0}^t (dV_w/dt) dt.$$

Для визначення прискорення скористаємось інтегралом згортки, що зв'язує прискорення вітру як вплив на систему з прискоренням краплі як відгук системи на вплив через імпульсну характеристику:

$$\frac{dV_d}{dt}(t) = \int_{-\infty}^t \frac{dV_w}{dt}(t) h(t - \tau) d\tau = \frac{dV_w}{dt}(t) h(t), \quad (1)$$

де dV_w/dt – прискорення, яке діє на краплю в момент часу $\tau = t - t_0$; $h(t - \tau)$ – вагова (імпульсна) характеристика як відгук середовища (у цьому випадку краплі) на дію одного імпульсу вітру (дельта-функція в момент часу $t - \tau$).

Отже, для визначення прискорення краплі необхідно знати прискорення вітру, який діє на краплю та імпульсну характеристику $h(t)$ краплі як її реакцію на дію одного імпульсу ($\delta(t)$ – дельта-функції).

Для визначення перехідної $g(t)$ та імпульсної $h(t)$ характеристик краплі зробимо припущення, що горизонтальна складова швидкості руху краплі в початковий момент часу t_0 дорівнювала $V_{d0} = 0$. У цей момент крапля відчула миттєву дію вітру, який має швидкість V_w . У цьому випадку на краплю почне діяти сила, яка визначається за законом Стокса [6; 7].

$$F_s = 3\pi\mu D_0 U_r = 3\pi\mu D_0 (V_w - V_d),$$

де μ – в'язкість повітря; D_0 – еквівалентний діаметр краплі; U_r – відносна швидкість руху краплі та повітря; V_w – швидкість вітру; V_d – швидкість краплі.

Прискорення визначається дією різниці зовнішньої змінної сили Стокса F_S та масової сили:

$$F_m = a(t)m,$$

де $a(t)$ – прискорення, що змінюється з часом.

Необхідно встановити закон зміни прискорення швидкості краплі при збільшенні її швидкості від початкової $V_{w0} = 0$ до кінцевої V_w .

Беручи до уваги принцип оберненого руху, можна припустити, що крапля, яка рухається в горизонтальному напрямку у вакуумі зі швидкістю вітру V_w з кінетичною енергією

$$E_k = \frac{mV_w^2}{2},$$

у момент часу t_0 потрапляє в нерухоме повітряне середовище та починає рухатися з сповільненням руху до моменту, коли її швидкість стане дорівнювати нулю.

Диференціальне рівняння руху буде вміщувати в собі силу інерції (масову силу), яка відповідно до другого закону Ньютона дорівнює

$$F_m = m \frac{dV_d}{dt}$$

і силу опору повітря (силу Стокса), яка протилежна силі інерції та дорівнює

$$F_S = kV_d = 3\pi\mu D_0 V_d,$$

де k – коефіцієнт зв'язку між відносною швидкістю руху сферичної краплі в повітрі і силою опору руху краплі в повітрі: $k = 3\pi\mu D_0$.

Рівняння руху за цих припущень буде мати вигляд (для спрощення вигляду формул позначення (t) опускаємо):

$$m \frac{dV_d}{dt} = -kV_d. \quad (2)$$

Якщо розділити змінні в рівнянні (2), одержимо:

$$\frac{dV_d}{V_d} = -\frac{k}{m} dt. \quad (3)$$

Після інтегрування рівняння (3) маємо

$$\ln V_d = \frac{k}{m} t + c, \quad (4)$$

де c – константа, що визначається з початкових умов.

Якщо зробити потенціювання виразу (4), то дістанемо загальне рішення рівняння (2):

$$V_d = ce^{-\frac{k}{m}t}.$$

Якщо в початковий момент часу $t = 0$, $V_d = V_{w0}$, то ми маємо загальний закон руху краплі у вигляді:

$$V_d = V_{w0} e^{-\frac{k}{m}t} = V_w e^{-\frac{t}{\tau_k}},$$

де m – маса краплі $m = \frac{\rho\pi D_0^3}{6}$; ρ – щільність

рідини краплі; D_0 – еквівалентний діаметр краплі;

τ_k – стала краплі: $\tau_k = \frac{m}{k} = \frac{\rho D_0^2}{18\mu}$.

У випадку, коли нерухома крапля в момент часу t_0 відчуває дію стрибка швидкості вітру з V_{w0} :

$$V_d = V_{w0} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right).$$

Таким чином, швидкість руху краплі при дії на неї стрибка швидкості вітру буде змінюватися за експоненціальним законом, і відповідні перехідні характеристики краплі будуть мати вигляд:

– у випадку прискорення руху краплі

$$g(t)_+ = \frac{1}{\tau_k} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right);$$

– у випадку сповільнення руху краплі:

$$g(t)_- = -\frac{1}{\tau_k} e^{-\frac{t}{\tau_k}},$$

де мінус вказує на те, що прискорення та рух мають різні напрямки.

Прискорення або сповільнення руху краплі буде змінюватися також за експоненціальним законом тому, що похідна від експоненціальної функції дорівнює цій самій функції. Максимальне значення прискорення буде досягатися в момент прикладення стрибка швидкості вітру. За абсолютним значенням воно буде дорівнювати різниці поточних значень швидкості краплі та вітру в цей момент поділений на τ .

Імпульсна характеристика, яка необхідна для розрахунку інтеграла згортки, може бути визначена з урахуванням того, що між перехідною $g(t)$ та імпульсною $h(t)$ характеристиками існує інтегральне співвідношення

$$h(t) = \int_{-\infty}^t h(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Якщо зробити диференціювання виразу (5), отримаємо:

$$\frac{d(g(t))}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^t h(\tau) d\tau,$$

урахувавши, що

$$\frac{d}{dt} \int f(x) dx = f(x); \quad g(t) = \pm \frac{1}{\tau_k} e^{-\frac{t}{\tau_k}},$$

імпульсна характеристика краплі буде мати вигляд

$$h(t) = \pm \frac{1}{\tau_k^2} e^{-\frac{t}{\tau_k}}.$$

Зміна знака імпульсної характеристики відносно знака перехідної і відповідність її знака (імпульсної характеристики) знаку зміни швидкості свідчить про те, що імпульс сили інерції прагне зберегти існуючий стан руху як у випадку прискорення, так і у випадку сповільнення руху.

Залежність $\frac{dV_w}{dt}(t)$ від $\frac{dV_d}{dt}$ визначимо за допомогою імпульсної характеристики краплі. Продиференціювавши рівняння (1) і розв'язав його відносно похідної швидкості вітру $\frac{dV_w}{dt}(t)$ та врахувавши, що

$$\frac{dV_d}{dt}(t) = g \operatorname{tg} \delta(t),$$

маємо:

$$\frac{dV_w}{dt}(t) = \frac{g}{h(t-\tau)} \operatorname{tg} \delta(t). \quad (6)$$

Після підстановки значення прискорення вітру з рівняння (6) у вираз (1) отримаємо співвідношення:

$$V_w(T) = V_0 + \frac{1}{T} \int_0^T \operatorname{tg} \delta(t) \frac{g}{h(t-\tau)} d\tau.$$

У випадку, коли початкові швидкості вітру V_{w_0} невідомі, розрахунок поточної швидкості вітру $V_w(t)$ має проводитися за формулою

$$V_w(t) = \int_{-\infty}^t \frac{dV_w}{dt}(t) dt$$

з урахуванням знака похідної, якщо $V_{w_{t=-\infty}} = 0$.

Оскільки кут нахилу краплі δ , що вимірюється, знаходиться в площині, яка є нормальною до напрямку зондувального променя радіолокатора і дотичної до кола з центром у точці перетину, то швидкість вітру, що визначається так, має розглядатися як тангенціальна складова вектора швидкості аналогічно до радіальної складової, що визначається за методом Доплера (рис. 1).

Кут нахилу краплі δ , видимий з боку зондувального променя, є проекцією максимального значення на площину ортогональну зондувальному променю.

У випадку горизонтального вітру та горизонтального азимутального сканування максимальне значення кута δ буде досягатися, коли вертикальна площина, в якій знаходиться вітер, буде ортогональна напрямку зондувального променя. Тоді тангенціальна складова швидкості, що визначається, буде дорівнювати швидкості вітру.

У загальному випадку значення кута δ буде залежати і від кута місця зондувального променя.

Унаслідок того, що стала краплі

$$\tau_k = \frac{m}{k} = \frac{\rho D_0^2}{18\mu},$$

яка характеризує перехідні процеси руху, залежить від еквівалентного діаметра краплі D_0 , то краплі різних діаметрів будуть прискорюватися протягом перехідного процесу по-різному.

У випадку, коли одночасно будуть спостерігатися краплі з різними кутами нахилу та різної форми, перехідний процес буде характеризуватися не однією, а сім'єю характеристик.

Для прикладу, на рис. 3 змодельовані поведінки гідрометеорів діаметром 4 та 3 мм під час пориву вітру, швидкість якого змінюється за синусоїдальним законом від 0 до 20 м/с та від 0 до 30 м/с:

$$V_w(t) = V_{w_0} + V_{w_m} \cos(\omega t + \pi).$$

Використовуємо інтеграл згортки в дискретному вигляді:

$$V_d(gT) = \sum_{i=g-1}^g V_w(iT) h((g-i)T) T.$$

Період дискретизації необхідно вибирати з урахуванням теореми Котельникова–Найквіста

$$\left(T = \frac{1}{2} F_m \right).$$

Відносна похибка методу

$$e(t) = \frac{V_w(t) - V_k(t)}{V_w(t)}$$

характеризує наближення швидкості гідрометеору до швидкості вітру в часі.

Діаграми показують, що зміна швидкості краплі наслідок зміну швидкості вітру з деяким затриманням, яке залежить від маси краплі. Швидкості дорівнюють одна одній у точці, де крапля не відчуває більше швидкості вітру, а її рух продовжується завдяки інерції.

Висновок

Одержані залежності підтверджують можливість використання поляриметричних параметрів для визначення швидкості вітру. Для більш повного обґрунтування необхідні подальші дослідження даного підходу, який дозволяє оперативно виявляти небезпечні для польоту ПС вітрові явища і має такі переваги:

- дає можливість визначення параметрів вітру за допомогою однопозиційної бортової системи;
- немає необхідності кругового сканування простору, а тільки тієї його частини, яка знаходиться на шляху польоту літака;
- можлива доробка існуючих бортових радіолокаторів поляриметричними системами, що не призведе до порівняно значних фінансових витрат.

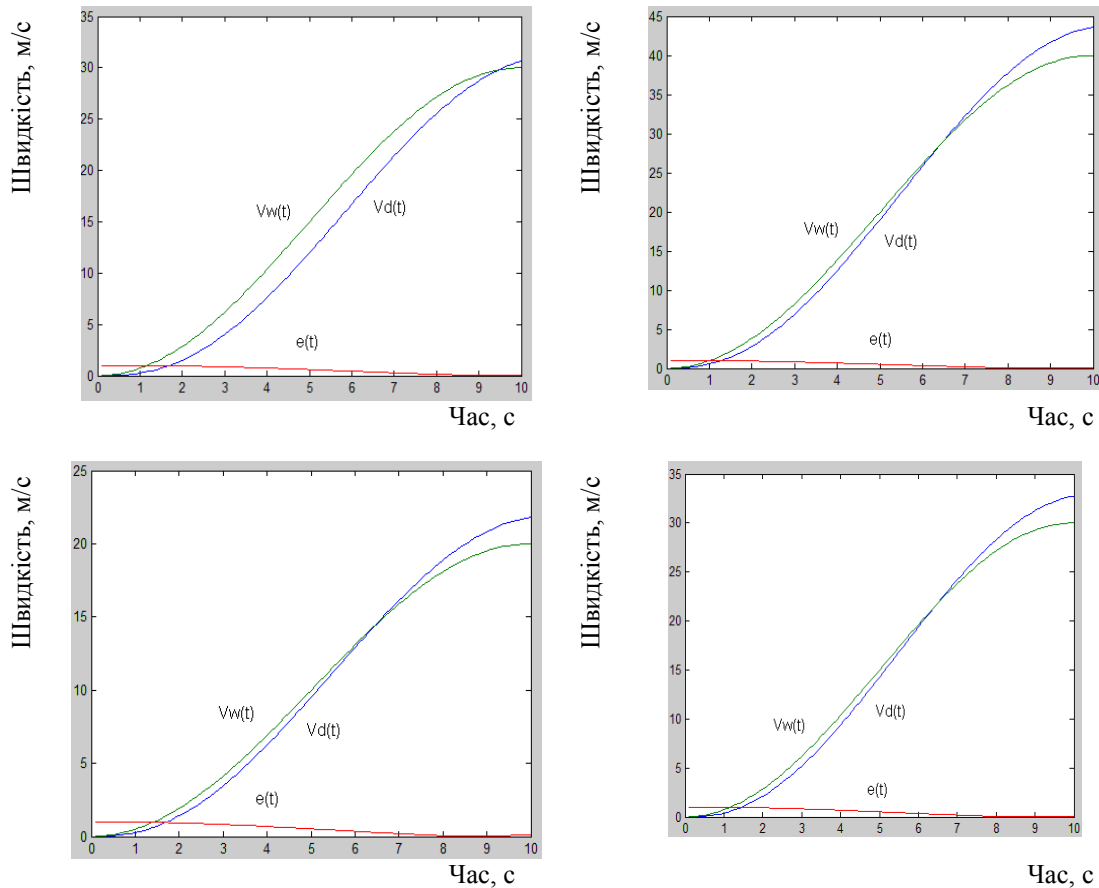


Рис. 3. Залежність швидкостей V_w і V_k та похибка e в часі:

$a - D = 4$ мм, $V_w =$ від 0 до 20 м/с; $b - D = 4$ мм, $V_w =$ від 0 до 20 м/с;
 $c - D = 4$ мм, $V_w =$ від 0 до 20 м/с; $d - D = 3$ мм, $V_w =$ від 0 до 30 м/с

Література

1. Annex 3 – Meteorological Service for International Air Navigation // ICAO. – 2005.
2. Doviak R.J., Zrnice D.S. Doppler radar and weather observations. – Academic Press, inc., 1993.
3. Яновський Ф. Бортові метеорологічні радіолокатори: Навч. посіб. – К.: НАУ, 2003. – 324 с.
4. Russchenberg, H.W.J. Ground-based remote sensing of precipitation using a multi-polarized FM-CW Doppler radar. – Delft University Press, 1992. – 206 p.
5. Averyanova Yu. A. Use of Doppler-Polarimetric parameters for wind phenomena localization // EuRAD 2004: Proc. of the 34th European microwave Conf., 11–15 Oct. 2004. – Amsterdam, The Netherlands.
6. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. – 3-е изд. – М.: Высш. шк., 1980. – 384 с.
7. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. – М.: Мир, 1975. – 392 с.
8. Яновский Ф.И. Моделирование процессов взаимодействия радиолокационного сигнала с турбулизированным метеорологическим объектом // Вісн. КМУЦА. – 1998. – №1. – С. 122–133.

Стаття надійшла до редакції 12.10.05.

Ю.А. Аверьянова, А.А. Аверьянов, Ф.И. Яновский

Возможности использования поляриметрических радиолокационных параметров для определения характеристик ветра

Исследовано влияние ветра на параметры движения и форму гидрометеоров. Показана возможность определения характеристик ветра бортовым поляриметрическим радиолокатором. Определены характеристики ветра по реакции среды под действием ветра.

Y.A. Averyanova, A.A. Averyanov, F.I. Yanovsky

On possibility to use polarimetric radar parameters for wind characteristic determination

Wind influence on hydrometeor shape and motion parameters is studied. Possibility to determine wind characteristics with onboard polarimetric radar is shown. Wind characteristics are determined as medium reaction on wind impact.