

УДК 621.396.96

Ю.А. Авер'янова, канд. техн. наук
А.А. Аверьянов, канд. техн. наук
Ф.Й. Яновський, д-р техн. наук

ОЦІНКА ІНТЕНСИВНОСТІ АТМОСФЕРНОЇ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО РАДІОЛОКАТОРА

НАУ, кафедра аеронавігаційних систем
 E-mail: Yuliya_ans@yahoo.co.uk

Запропоновано підхід одержання інформації про інтенсивність турбулентності в рідких опадах з використанням параметрів поляризаційного спектра. Турбулентність розглядається як випадковий процес, краплі – як фактор, що зумовлює утворення поляризаційного спектра. Поляризаційний спектр відбитого сигналу залежить від аеродинамічних властивостей гідрометеорів, які описуються їхніми перехідними характеристиками. Результати розрахунку підтверджують можливість використання параметрів поляризаційного спектра для характеристики турбулентності.

The approach to retrieve information on turbulence intensity in liquid precipitation with polarimetric spectrum parameters is proposed. Turbulence is considered as random process. Drops are considered as factors that provide polarization spectrum appearance. Polarimetric spectrum of received signal depends on hydrometeor aerodynamics that is described with transient characteristic. The calculation results confirm the possibility to use the polarimetric spectrum parameters for turbulence characteristic.

Вступ

Атмосферна турбулентність є небезпечним для польотів природним явищем. У зв'язку з цим у документах ІСАО [1] відзначається необхідність забезпечення екіпажу повітряного судна (ПС) своєчасною та достовірною інформацією про наявність атмосферної турбулентності на маршруті польоту ПС. Оцінка інтенсивності турбулентності, яка здійснюється наразі, дозволяє одержувати інформацію про явище не прямими методами вимірювання, а за допомогою явищ, які часто супроводжуються турбулентністю. Такий підхід ускладнює оперативне виявлення турбулентності та оцінку її небезпечних значень інтенсивності.

Аналіз досліджень і публікацій

Відомі методи виявлення турбулентності й оцінка її інтенсивності за допомогою допоміжних параметрів наведено в працях [2–4]. Такі методи засновані на використанні параметрів і характеристик, які порівнюються з універсальним параметром інтенсивності турбулентності – швидкістю дисипації кінетичної енергії турбулентності ε . Цей параметр рекомендований ІСАО й використовується як параметр оцінки інтенсивності турбулентності, що, у свою чергу, також одержують непрямыми методами. Для реалізації таких методів необхідно проводити додаткові розрахунки, що знижує оперативність виявлення явища й точність оцінки. У разі турбулентності та інших явищ, пов'язаних з вітром, оперативність виявлення є одним з основних вимог, оскільки вони характеризуються миттєвим появленням і зникненням, а також коротким часом існування [1].

Постановка завдання

З урахуванням зазначеного доцільно спробувати знайти такі параметри й/або характеристики для оцінки турбулентності, які б безпосередньо давали інформацію про інтенсивність явища та дозволяли підвищити оперативність та ймовірність вимірювань. Аналіз, проведений у працях [5–7], показав, що для вирішення поставленого завдання можна використовувати поляриметричні параметри радіолокаційного сигналу. У працях [5–7] показано, що в умовах турбулентності у разі прискорення повітряних потоків відбувається деформація рідких гідрометеорів і зміна їхньої орієнтації в просторі, що веде до появи кросполяризаційної складової прийнятого радіолокаційного сигналу й/або зміни інтенсивності сополяризаційних сигналів.

Поляриметричні методи

У природі більшість гідрометеорів мають несферичну форму. Зворотне розсіювання від несферичних частинок залежить від поляризації зондувального імпульсу.

Отже, вимірюючи поляризаційні характеристики відбитого сигналу, можна одержати інформацію про форму гідрометеорів. Для таких вимірів використовують радіолокатори з рознесенням по поляризації, які відрізняються змінною поляризацією зондувального й/або прийнятого сигналів і забезпечують приймання двох ортогонально поляризованих радіохвиль.

Використання таких радіолокаторів дозволяє визначити характеристики гідрометеорів [2; 4]:

- розміри;
- форму;
- просторову орієнтацію;
- термодинамічний стан.

Найбільш поширені три схеми вимірювання поляризаційних параметрів [2]:

- 1) приймач і передавач налаштовані на вертикальну поляризацію;
- 2) приймач і передавач налаштовані на горизонтальну поляризацію;
- 3) передавач випромінює горизонтально поляризований сигнал, а передавач приймає вертикально поляризований сигнал.

Схеми вимірювань 1, 2 є сополяризаційними вимірюваннями. Схема 3 належить до кросполяризаційних вимірювань.

Зв'язок поляриметричних параметрів з характеристиками рідких гідрометеорів, які знаходяться під дією вітру

У випадку турбулентності в атмосфері утворюються неупорядковані вихори різних розмірів, що призводить до зміни вектора вітру.

Зміна вектора вітру призводить до зміни швидкості гідрометеорів, їхньої просторової орієнтації й форми [6]. Ці зміни є реакцією на вплив градієнта вітру на гідрометеор.

Отже, зв'язок між зміною швидкості вітру й спектром поляризації відбитого сигналу буде визначатися динамікою зміни форми й орієнтації краплі, яку можна врахувати за допомогою її перехідної або імпульсної характеристик.

Краплю у цьому разі можна розглядати як деякий фільтр, що перетворює випадковий процес зміни градієнта вітру в процес зміни спектра поляризації сигналу.

Перехідна характеристика краплі описується виразами [6]:

– у випадку прискорення руху краплі:

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

– у випадку сповільнення руху краплі:

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

де τ_k – стала краплі, що характеризує перехідні процеси руху:

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

m – маса краплі:

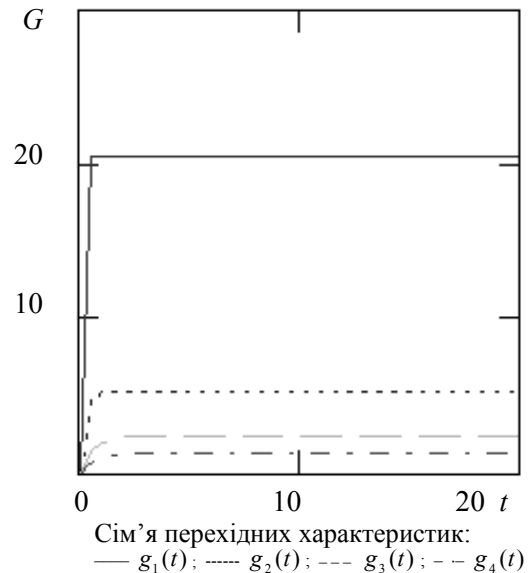
$$m = \frac{\rho \pi D_0^3}{6},$$

ρ – щільність рідини краплі; D_0 – еквівалентний діаметр краплі; μ – в'язкість повітря.

Відповідно до виразів (1), (2) краплі різних розмірів будуть із різною швидкістю реагувати на градієнт вітру (див. рисунок), тому що у зондувальному об'ємі будуть знаходитись краплі з різною орієнтацією.

На рисунку зображена сім'я перехідних характеристик для крапель з діаметрами:

$D_1=1$ мм, $D_2=1,5$ мм, $D_3=2$ мм, $D_4=2,5$ мм.



Відбитий кросполяризаційний і сополяризаційний сигнали за наявності градієнта швидкості вітру будуть являти собою спектр сигналу з різними кутами поляризації, ширина й час існування якого визначаються розподілом гідрометеорів за розмірами й інтенсивністю турбулентності.

Таким чином, оцінка турбулентності може бути зведена до спостереження кросполяризаційного або сополяризаційного сигналу як випадкового процесу та оцінювання його параметрів. При такому підході необхідно домовитися про апріорну статистичну модель турбулентності як випадкового процесу.

Турбулентність та інші небезпечні для авіації метеоявища, які пов'язані з вітром, виникають, зникають і змінюють свій напрямок випадково. Це дозволяє розглядати турбулентність загалом як локальний нестационарний процес.

На деяких інтервалах часу процес можна розглядати і як стаціонарний, особливо в стійких метеоявищах, на значних висотах.

Час, який відводиться на оперативну статистичну оцінку турбулентності за допомогою бортових засобів, відносно невеликий і може становити десятки секунд або хвилин, тому оцінку параметрів треба проводити за мінімальною кількістю реалізації випадкового процесу.

На таких інтервалах часу будемо вважати процес стаціонарним і застосовувати для оцінки його параметрів більш прості алгоритми й апаратуру [8].

Не менш важлива умова – вибір «вікна» спостереження, тобто інтервалу часу спостереження випадкового процесу й частоти опитування.

З погляду на те, що процес появи «спалахів» спектра поляризації й час їх існування буде випадковим процесом, то, у свою чергу, випадковий процес розподілу градієнта швидкості вітру з урахуванням інерційних властивостей гідрометорів (їхніх перехідних характеристик) та час існування тієї або іншої складової поляризаційного спектра буде залежати від розміру краплі, що викликає її появу. З праць [8–10] відомо, що умовою одержання некорельованих відліків випадкового процесу, які дозволяють одержати його параметри (математичне сподівання й дисперсію) у разі достатнього інтервалу спостереження, є виконання співвідношення:

$$\Delta t = 2\tau, \quad (3)$$

де Δt – часовий інтервал зняття відліків; τ – стала часу експонентного перехідного процесу.

Мінімально необхідний інтервал дискретизації, достатній для виявлення «високочастотних» складових поляризаційного спектра, буде визначатися сталою часу найменшої за діаметром краплі в елементарному зондованому об'ємі, яка деформується при впливі на неї аеродинамічних сил.

У цьому разі, для умов стандартної атмосфери ($\mu = 1,14$ і $D = 1,5$ мм) одержуємо значення $\tau_k = 0,11$ с, яке розраховано за формулою (3).

Відповідно до співвідношення (3) $\Delta t_{\min} = 0,22$ с.

Максимальний діаметр краплі визначається з урахуванням числа Вебера для докритичного режиму деформації рідких гідрометорів, за якого великі краплі ще не розпадаються на дрібні [2] і дорівнює $D = 4$ мм.

Мінімально необхідну кількість відліків, достатню для коректної статистичної оцінки випадкового процесу, візьмемо рівною 50 [11]. Тоді маємо мінімально необхідний час спостереження сигналів спектра поляризації від даного елементарного об'єму простору, що спостерігається зі співвідношення:

$$T = \Delta t_{\min} n; \quad T \approx 11 \text{ с.}$$

Висновки

1. У підході, який викладено в цій статті, інтенсивність турбулентності запропоновано оцінювати за спектральними складовими поляризаційного сигналу як випадкового процесу, що дозволить зменшити витрати часу на обробку сигналу.
2. Розрахунки параметрів сканування простору з метою визначення статистичних характеристик спектра поляризації відбитого сигналу, проведені з урахуванням динамічних властивостей крапель-відбивачів, показують можливість використання запропонованого методу в умовах реально спостережуваних процесів турбулентності, її інтенсивності й частоти.

Література

1. Annex 3 – Meteorological Service for International Air Navigation // ICAO. – 2005.
2. Яновський Ф. Бортові метеорологічні радіолокатори: Навч. посіб. – К.: НАУ, 2003. – 302 с.
3. Яновский Ф.И. Моделирование процессов взаимодействия радиолокационного сигнала с турбулизированным метеорологическим объектом // Вісн. КМУЦА. – 1998. – №1. – С. 122–134.
4. Doviak R.J., Zrnic D.S. Doppler radar and weather observations // Academic Press, inc. – 1993. – 522 p.
5. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. – 3-е изд. – М.: Высш. шк., 1980. – 384 с.
6. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. – М.: Мир, 1975. – 392 с.
7. 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. – P. 64–67.
8. Мирский Г.Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1972. – 456 с.
9. Жовинский А.Н., Жовинский В.Н. Инженерный экспрес-анализ случайных процессов. – М.: Энергия, 1979. – 112 с.
10. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
11. Статистические методы обработки эмпирических данных: Рекомендации, разработанные ВНИИНАШ. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 232 с.

Стаття надійшла до редакції 15.05.06.