ТЕОРІЯ ТА МЕТОДИ ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ

УДК 621.396.96:629.735.018.1.05:53.082.61(045)

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

СТАТИСТИЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ТУРБУЛЕНТНОСТІ НА ЗМІНУ КУТА ПОЛЯРИЗАЦІЇ ВІДБИТИХ ВІД ГІДРОМЕТЕОРІВ РАДІОХВИЛЬ

Національний авіаційний університет, e-mail:Yuliya-ans@yandex.ru

Розглянуто та проаналізовано новий підхід до оцінювання інтенсивності турбулентності за допомогою радіолокаційної поляриметрії. Інтенсивність турбулентності оцінено за допомогою аналізу поведінки НЧ обвідної відбитого від розсіювачів радіолокаційного сигналу. Зміна обвідної є наслідком зміни кута поляризації електромагнітних хвиль, відбитих від ансамблю гідрометеорів. Характер зміни обвідної залежить від частотних характеристик розсіювачів та інтенсивності динамічних явищ, що на них впливають. Проаналізовано зв'язок статистичних характеристик випадкового процесу зміни НЧ обвідної відбитого від ансамблю гідрометеорів сигналу з інтенсивністю турбулентності. Ступінь зміни кута поляризації відбитих від сукупності гідрометеорів радіохвиль оцінено за допомогою одноканальної однопозиційної радіолокаційної системи.

Ключові слова: турбулентність, гідрометеори, метеорологічна радіолокація, поляриметрія.

Вступ та постановка проблеми. Використання організованої мережі сучасних метеорологічних радіолокаційних станцій дозволило значно покращити виявлення та прогнозування складних і небезпечних для авіації погодних явищ. Деякі держави використовують мережу доплерівських радіолокаторів (таких, як WSR-88D). Доплерівські когерентні системи, порівняно із некогерентними метеорологічними радіолокаторами, дозволяють отримувати інформацію і про динамічні процеси в атмосфері. Однак, як зазначається в праці [1], навіть такі потужні системи мають деякі обмеження щодо визначення повної швидкості явищ, що пов'язані з вітром, або виявлення небезпечних динамічних явищ поблизу земної поверхні. Для авіації, де особлива увага приділяється найбільш небезпечним етапам польоту, – зльоту та посадці повітряних кораблів (ПК), такі обмеження є досить суттєвими.

Отже, існує потреба дослідження додаткових можливостей радіолокаційних методів та їх технічної реалізації для підвищення інформативності вимірюваних параметрів для більш ефективної локалізації небезпечних атмосферних явищ.

Аналіз досліджень та публікацій. У працях [2 – 5] розглянуто можливість використання комбінованого доплерівсько-поляриметричного підходу для отримання інформації про атмосферні явища та формування. Поляризаційні компоненти враховуються переважно для поліпшення якості ідентифікації типу гідрометеорів і точності оцінки інтенсивності опадів.

У праці [6] показано, що гідрометеори під дією атмосферних явищ, пов'язаних з вітром, можуть змінювати свою форму та просторову орієнтацію. Отже, характер та величина зміни кута поляризації відбитого від метеорологічного об'єкта сигналу можуть розглядатися як інформативні параметри, що відображають ступінь дії вітрових явищ на гідрометеори.

У працях [7; 8] розглянуто радіолокаційну систему, що приймає електромагнітні хвилі основної поляризації (поляризації зондувального променя) та хвилі з поляризацією, що відрізняється від основної, включаючи і ортогональну поляризацію. За допомогою такої системи можна одержувати поляризаційні спектри електромагнітних хвиль, відбитих від ансамблю гідрометеорів. Відбитий деполяризований сигнал в такій системі має більший енергетичний рівень порівняно із сигналом в антені з ортогональною поляризацією. Цей факт спрощує розрахунок поляризаційних параметрів. Для реалізації такого підходу необхідно використовувати складну багатоканальну радіолокаційну систему або навіть декілька приймальних антен.

Мета цієї роботи – оцінити ступінь зміни кута поляризації відбитих від сукупності гідрометеорів радіохвиль за допомогою одноканальної однопозиційної радіолокаційної системи. Такий підхід надає додаткових можливостей сучасним некогерентним та доплерівським метеорологічним радіолокаторам, до складу яких входить єдина одноканальна приймально-передавальна антена. Для цього в роботі проведено математичне моделювання зміни поляризації електромагнітних хвиль, відбитих від ансамблю гідрометеорів, що перебувають під впливом турбулентності, та проаналізовано зв'язок статистичних характеристик випадкового процесу зміни НЧ обвідної відбитого від ансамблю гідрометеорів сигналу з інтенсивністю турбулентності.

Оцінювання енергії відбитого деполяризованого сигналу за допомогою однієї антени. У праці [9] зміна кута поляризації відбитих від гідрометеорів електромагнітних хвиль визначається за допомогою просторово-часового опису прийнятих сигналів. За допомогою сфери Пуанкаре показано, що ступінь зміни кута поляризації відбитої радіохвилі як інформативний параметр змінюється відповідно до напрямного косинуса та веде до появи флуктуацій струму в приймальній антені. Флуктуації з'являються внаслідок того, що максимальне значення струму в приймальній антені відповідає прийманню відбитої хвилі з поляризацією, яка збігається з поляризацією зондувального сигналу. Якщо відбита хвиля має поляризацію, яка не збігається з поляризацією зондувального сигналу, струм в приймальній антені визначається його проекцією на головну вісь діаграми напрямленості.

Частотні характеристики флуктуацій амплітуди, які викликані динамічними процесами в атмосфері, різняться від флуктуацій, що є наслідком інших процесів, які впливають на амплітуду сигналів. Цей факт обумовлений особливостями фізики атмосферних явищ. Оцінювати флуктуації амплітуди струму можна з використанням добре розвиненої теорії оптимального приймання радіолокаційних сигналів.

Опис алгоритму моделювання. Ступінь зміни кута поляризації відбитих від ансамблю гідрометеорів електромагнітних хвиль оцінювали за схемою, показаною на рис. 1.

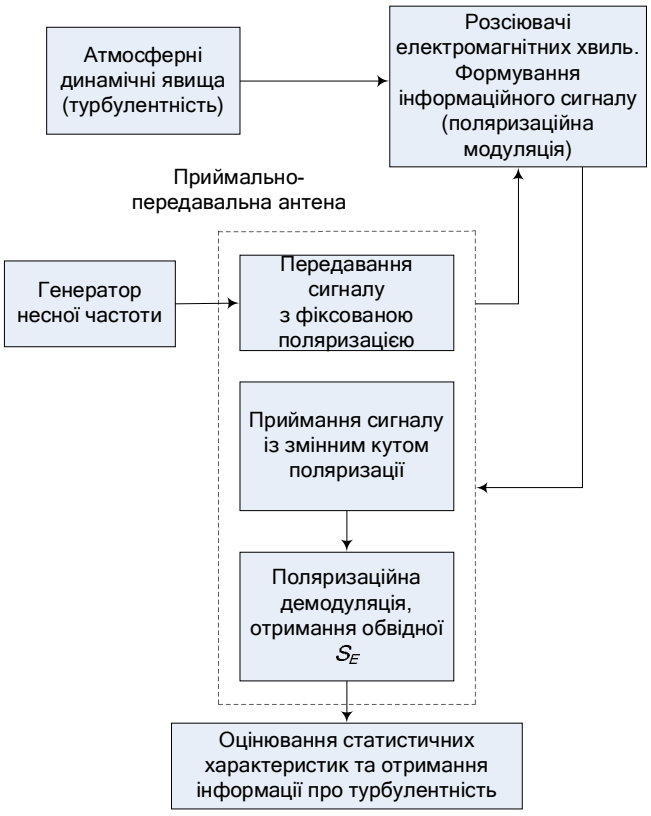


Рис. 1. Схема процесів формування поляризаційної модуляції та оцінювання зміни кута поляризації відбитих сигналів

Генератор несної частоти генерує високочастотний зондувальний сигнал з фіксованою поляризацією, що випромінюється приймально-передавальною антеною в напрямку досліджуваного об'єкта. Об'єкт дослідження – опади або хмари – ансамбль гідрометеорів, що перебуває під дією динамічних явищ. Розглянемо вплив турбулентності на поведінку розсіювачів. Турбулентність моделюється як квазігармонічний сигнал $u_т$ з частотами, що відповідають частотам турбулентності [10]. Зміна інтенсивності турбулентності задається різними значеннями амплітуд квазігармонічного сигналу відповідно до значень прирощення перевантаження ПК. Бовтанка ПК, яка оцінюється відповідно до ІСАО в значеннях прирощення перевантаження, є наслідком дії турбулентності [11]. У таблиці наведено класифікацію турбулентності відповідно до значень прирощення перевантаження Δn, що виражається в одиницях прискорення вільного руху g.

Класифікація турбулентності відповідно до значень прирощення перевантаження Δn

Помірна турбулентність	$\Delta n = \pm 0{,}5g \ldots \pm 1g$	Протягом польоту
	$\Delta n = \pm 0{,}3g \ldots \pm 0{,}4g$	Протягом зльоту або посадки
Сильна турбулентність	Δn більша за $\pm 1g$	Протягом польоту
	Δn більша за $\pm 0{,}4g$	Протягом зльоту або посадки

Турбулентність впливає на ансамбль гідрометеорів, який згідно з [6] подано набором еквівалентних фільтрів з різними характеристиками, що відповідають сталим краплі. Стала краплі τ залежить від діаметра рідких гідрометеорів та характеризує перехідний процес руху [12]. Просторова орієнтація гідрометеорів змінюється під дією динамічних атмосферних явищ. Як наслідок змінюється поляризація сигналу, що відбивається від ансамблю гідрометеорів. Відбитий від гідрометеорів сигнал таким чином подається промодульованим сигналом з виходу зазначених фільтрів, наслідком чого є зміна кута поляризації відбитої хвилі, а отже, відбитий сигнал містить інформацію про інтенсивність турбулентності. Такий процес s_e ми описували математично як реакцію фільтрів $g(t)$ на початковий вплив турбулентності $u_т$:

$$s_e = g(t)u_т \ ;$$

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

$$g(t)_- = -\frac{1}{\tau_k}e^{-\frac{t}{\tau_k}}; \qquad (2)$$

$\tau_k = \frac{m}{k} = \frac{\rho D_0^2}{18\mu}$ – стала краплі; $m = \frac{\rho\pi D_0^3}{6}$ – маса краплі; D_0 – медіанний діаметр краплі; ρ – щільність повітря; μ – в'язкість повітря, $k = 1, 2, \ldots, n$.

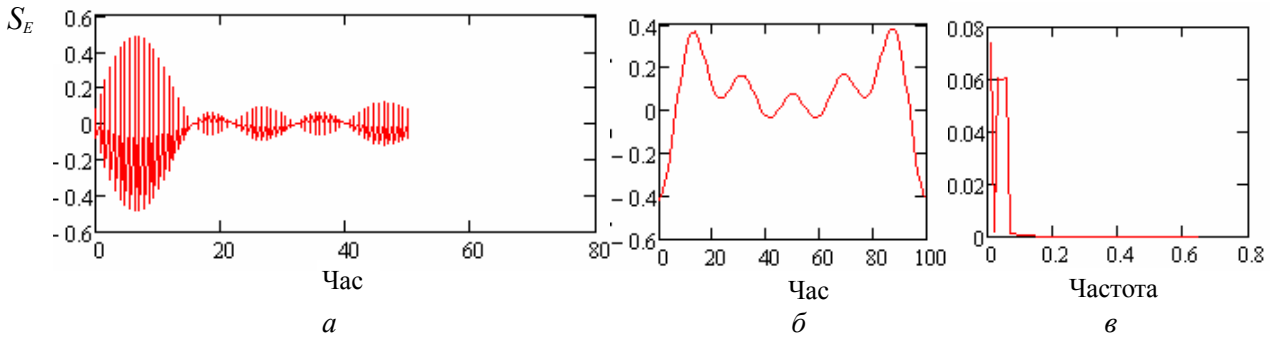
Формула (1) описує реакцію крапель у випадку прискорення їх руху, формула (2) описує реакцію крапель у випадку сповільнення їх руху.

Отже, на вході приймально-передавальної антени маємо відбитий високочастотний сигнал з низькочастотною модуляцією. Такий відбитий від гідрометеорів сигнал по суті є сигналом з поляризаційною модуляцією, або поляризаційно-модульованим сигналом. Саме зміни амплітуди низькочастотної складової містять інформацію про турбулентність та інші динамічні явища, що обумовлено частотними характеристиками відбивачів радіосигналів під дією вітрових явищ. Надалі за допомогою перетворення Гілберта одержуємо обвідну відбитого радіосигналу. В наступному блоці проводимо аналіз характеру змін обвідної,

одержуємо, у разі потреби, частотний її спектр та проводимо її статистичне оцінювання і порівнюємо з характеристиками інтенсивності турбулентності. Всі етапи моделювання виконувалися за допомогою середовища MathCad.

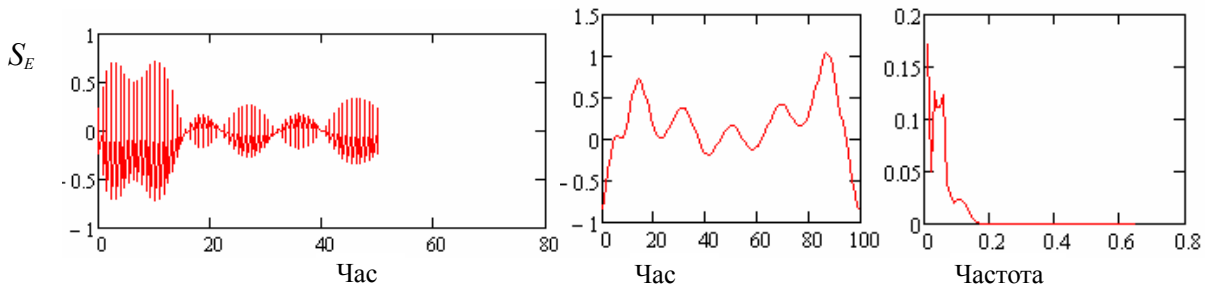
Обговорення результатів моделювання. Результати моделювання процесу згідно із запропонованим підходом показано на рис. 2 – 6.

На рисунках показано змодельований відбитий від гідрометеорів ВЧ сигнал з поляризаційною модуляцією (*а*), обвідну відбитого радіосигналу, одержану за допомогою перетворення Гілберта (*б*), та частотні спектри обвідної відбитого радіосигналу (*в*). На рисунках рівень сигналу або обвідної відповідно S_E відкладено впродовж осі *y*. Час на рис. 2 – 6 (*а*, *б*) або частоту у випадку частотних спектрів 2 – 6 (*в*) відкладено впродовж вісі *x*.



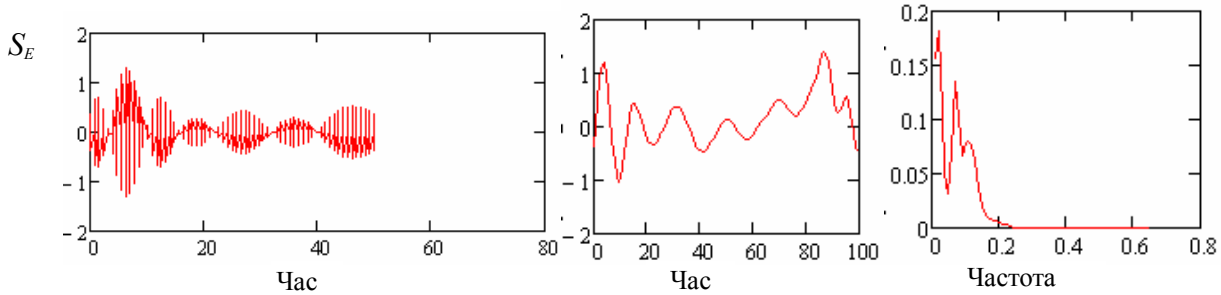
а *б* *в*

Рис. 2. Відбитий від гідрометеорів сигнал з поляризаційною модуляцією (*а*), обвідна відбитого сигналу (*б*) та частотний спектр обвідної відбитого від гідрометеорів сигналу (*в*) у випадку спокійної атмосфери $\Delta n = 0{,}1\ g$



а *б* *в*

Рис. 3. Відбитий від гідрометеорів сигнал з поляризаційною модуляцією (*а*), обвідна відбитого сигналу (*б*) та частотний спектр обвідної відбитого від гідрометеорів сигналу (*в*) у випадку слабкої турбулентності $\Delta n = 0{,}3\ g$



а *б* *в*

Рис. 4. Відбитий від гідрометеорів сигнал з поляризаційною модуляцією (*а*), обвідна відбитого сигналу (*б*) та частотний спектр обвідної відбитого від гідрометеорів сигналу (*в*) у випадку помірної (сильної) турбулентності $\Delta n = 0{,}6\ g$

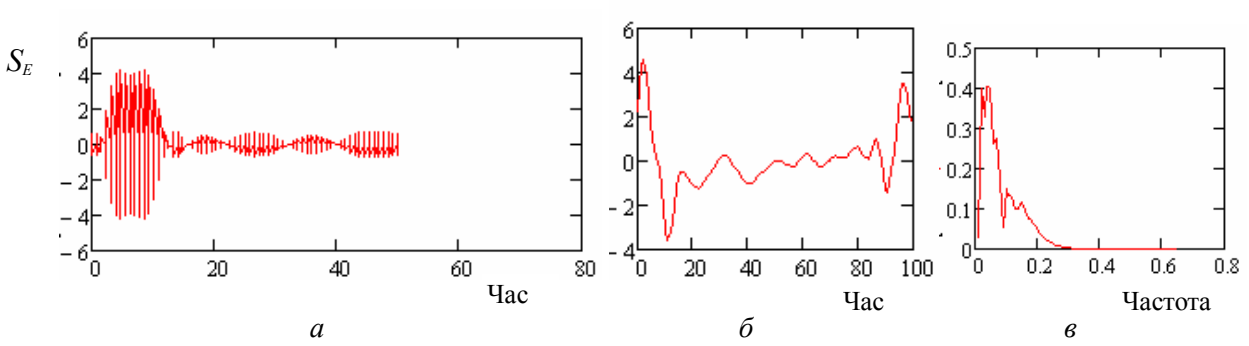


Рис. 5. Відбитий від гідрометеорів сигнал з поляризаційною модуляцією (*а*), обвідна відбитого сигналу (*б*) та частотний спектр обвідної відбитого від гідрометеорів сигналу (*в*) у випадку сильної турбулентності $\Delta n = 0{,}9\ g$

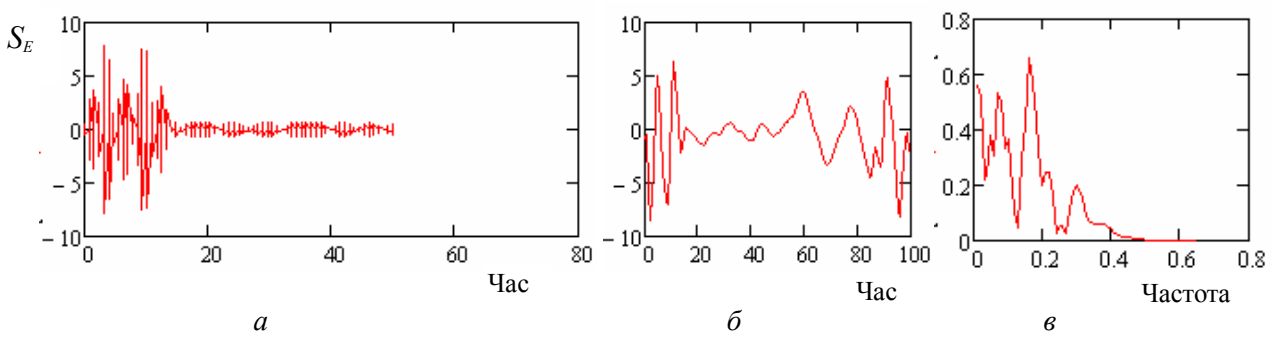


Рис. 6. Відбитий від гідрометеорів сигнал з поляризаційною модуляцією (*а*), обвідна відбитого сигналу (*б*) та частотний спектр обвідної відбитого від гідрометеорів сигналу (*в*) у випадку дуже сильної турбулентності $\Delta n = 2\ g$

На рис. 2 – 6 (*а*, *б*) можна побачити, що рівень відбитого сигналу та його обвідної відповідно збільшується з підвищенням інтенсивності турбулентності. Додаткові викривлення обвідної з'являються з подальшим збільшенням інтенсивності турбулентності (рис. 5 (*а*, *б*), 6 (*а*, *б*)). Порівнюючи частотні спектри обвідної відбитого сигналу, можна побачити, що збільшення інтенсивності турбулентності призводить до їх розширення. В розглянутому випадку ширина спектра, що відповідає незначній турбулентності, або її відсутності (рис. 1 (*в*), 2 (*в*)) менша ніж 0,2. У випадку турбулентності з приростом перевантаження 0,6 *g*, що відповідно до табл. 1 можна класифікувати як помірну, або навіть сильну, ширина частотного спектра обвідної більша ніж 0,2. У випадку дуже сильної турбулентності у хмарах типу *Cb* цей поріг значно перевищено (рис. 6 (*в*)).

Залежність математичного сподівання випадкового процесу від інтенсивності турбулентності показано на рис. 7, залежність дисперсії та середньоквадратичного відхилення від інтенсивності турбулентності – на рис. 8. Інтенсивність турбулентності в одиницях прискорення вільного руху відкладено впродовж осі *x*. Значення математичного сподівання, дисперсії та середньоквадратичного відхилення відкладено впродовж осі *y*.

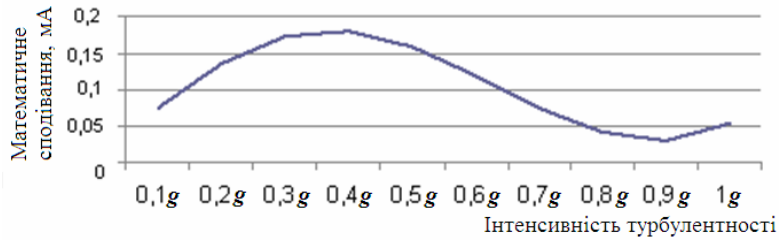


Рис. 7. Залежність математичного сподівання випадкового процесу зміни обвідної відбитого від гідрометеорів сигналу від інтенсивності турбулентності

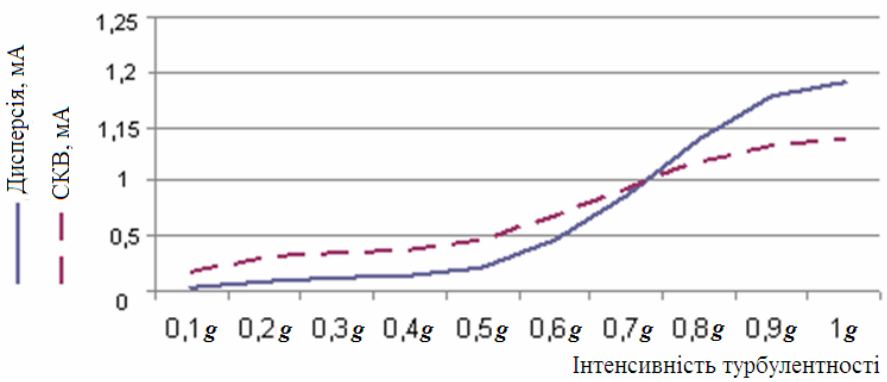


Рис. 8. Залежність дисперсії та середньоквадратичного відхилення обвідної відбитого від гідрометеорів сигналу від інтенсивності турбулентності

З рис. 7 видно, що математичне сподівання флуктує біля деякого середнього значення, а амплітуда флуктуацій зменшується з підвищенням турбулентності. Такий характер зміни математичного сподівання відповідає нестаціонарному випадковому процесу. Явище турбулентності на інтервалі спостереження можна розглядати як нестаціонарний випадковий процес. Згладженість кривої (рис. 7) залежить від інтервалу спостереження. В розглядуваному випадку характер реакції крапель на вплив турбулентності є тим фактором, що визначає характер залежності математичного сподівання випадкового процесу зміни НЧ обвідної відбитого від гідрометеорів сигналу від інтенсивності турбулентності. З рис. 8. видно, що дисперсія та середньоквадратичне відхилення плавно збільшуються з підвищенням інтенсивності турбулентності, що також відповідає нестаціонарному випадковому процесу.

Висновки. В цій роботі інтенсивність турбулентності оцінено за допомогою аналізу поведінки НЧ обвідної відбитого від розсіювачів радіолокаційного сигналу. Зміна обвідної є наслідком зміни кута поляризації електромагнітних хвиль, відбитих від ансамблю гідрометеорів. Характер зміни обвідної залежить від частотних властивостей розсіювачів та інтенсивності впливу на них динамічних явищ.

За допомогою цього підходу оцінюється зміна енергії в приймально-передавальній антені з визначеними поляризаційними властивостями. Зменшення енергії в розглянутому випадку є еквівалентом збільшення енергії перехресної складової в ортогональній приймальній антені поляриметричного радіолокатора. Для оцінювання зміни кута поляризації відбитої електромагнітної хвилі за допомогою запропонованого підходу не потребує використання двох ортогональних антен, оскільки в цьому разі більш високий рівень сигнал/шум і оцінюється сигнал в антенні з основною поляризацією. Такий факт є важливим у випадку невеликих змін кутів поляризації, що характерно саме для випадку атмосферних явищ.

Такий підхід можна реалізувати на базі сучасних доплерівських когерентних систем, а також звичайних некогерентних метеорологічних радіолокаторів, що дозволить значно розширити можливості визначення характеристик вітрових атмосферних явищ.

Список літератури

1. *Mc Laughin D. J., Knapp E. A., Wang Y., Chandrasekar* Distributed Weather Radar Using X-Band Active Arrays//IEEE Aerospace and Electronic SYSTEMS Magazie. – July 2009, ISSN 0885-8985 – Vol. 24, #7 – P. 21 – 26.
2. *Russchenberg H. W. J.* Ground-based remote sensing of precipitation using a multi-polarized FM-CW Doppler radar. – Delft University Press, 1992, – 206 p.
3. *Yanovsky, F. J., L. P. Ligthart, and H. W. J. Russchenberg*. Analysis of Transportable Atmospheric Radar (TARA) possibilities for the remote sensing of dangerous

meteorological phenomena // *PIERS Proceedings*, Cambridge, Massachusetts, USA, 1997, 116 p.
4. *Yanovsky F.,* Studies on microstructure of clouds and precipitation // Report IRCTR-S-009-97, Delft University of Technology, September, 1997 – 91 p.
5. *Yanovsky F.J, Unal C.M.H., Russchenberg W.J.* Doppler-Polarimetric Radar Observations of Turbulence in Rain // Report: IRCTR-S-006-03 (September 2002 – March 2003), TU-Delft, The Netherlands, 2003, 102.)
6. *Averyanova Yu. A.* Use of Doppler-Polarimetric parameters for wind phenomena localization // EuRAD 2004: Proc. of the 34th European microwave Conference, 11-15 October 2004, Amsterdam. The Netherlands. – P. 20 – 32.
7. *Averyanova Yu., Averyanov A. A., Yanovsky F.J.* 'Polarimetric Radar', Invention patent of Ukraine № u200804248, April 2008.
8. *Averyanova Yu. A., Averyanov A. A., Yanovsky F.J.*, "Polarization selective antennas for reflected wave depolarization determination" Proceedings of International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT 2009), P. 256 – 258, October 2009.
9. *Averyanova Yu., Averyanov A., Yanovsky F.J.* Reflected signal depolarization estimate with single transceiving antenna // Proc. SPIE Vol. 7502, 75021X (Aug. 5, 2009).
10. *Frost, W. and Moudlen, T. H.,* [Handbook of Turbulence. Fundamentals and Applications], Plenum Press, 535 (1977).
11. *Баранов А. М.* Авиационная метеорология / А. М. Баранов, Г. П. Лещенко, Л. Ю. Белоусова М.: Транспорт, 1993. – 287 с.
12. *Аверьянова Ю. А.* Можливості використання поляриметричних радіолокаційних параметрів для визначення характеристик вітру / Ю. А. Аверьянова, А. А. Аверьянов, Ф. И. Яновский // Вісник – К.: НАУ, 2005. – Т. 4 – С. 34 – 39.

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

Статистическая оценка влияния турбулентности на изменение угла поляризации отраженных от гидрометеоров радиоволн

Рассмотрен и проанализирован новый подход к оценке интенсивности турбулентности с помощью радиолокационной поляриметрии. Анализ поведения НЧ огибающей отраженного от гидрометеоров радиолокационного сигнала позволяет оценить интенсивность турбулентности. Изменение характера огибающей является следствием изменения угла поляризации электромагнитных волн, отраженных от ансамбля гидрометеоров. Характер изменения зависит от частотных характеристик рассеивателей и интенсивности влияющих на них атмосферных динамических процессов. Проанализирована связь статистических характеристик случайного процесса изменения НЧ огибающей отраженного от ансамбля гидрометеоров сигнала с интенсивностью турбулентности. Степень изменения угла поляризации отраженных от совокупности гидрометеоров радиоволн оценена с помощью одноканальной однопозиционной радиолокационной системы.

Yu. A. Averyanova, A. A. Averianov, F. J. Yanovsky

Statistical estimate of turbulence influence onto polarization angle change of radiowaves reflected from hydrometeors

The possibility to estimate turbulence intensity with radar polarimetry is considered and analyzed. Hydrometeor behavior under the turbulence influence is considered as source for changing polarization of reflected EM waves. The frequency characteristics of turbulence are taken into account and behavior of low frequency envelope of signal reflected from hydrometeors is proposed to use for turbulence intensity estimate. Random process of changing low frequency envelope statistically analyzed. The dependency of statistical characteristics with turbulence intensity is made and shown. The estimate of changing polarization EM waves reflected from hydrometeors is made with single-channel radar system.