

УДК 621.396.96

Ю.А. Авер'янова, к.т.н., доц.  
А.А. Аверьянов, к.т.н., доц.  
Ф.Й. Яновський, д.т.н., проф.

## АЛГОРИТМ ОЦІНЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИМИ МЕТЕОРОЛОГІЧНИМИ РАДІОЛОКАТОРАМИ

*Проаналізовано новий підхід щодо оцінки інтенсивності турбулентності за допомогою поляриметричного радіолокатора. Розроблено алгоритм оцінювання турбулентності в поляриметричних метеорологічних радіолокаторах за складовими поляризаційного спектра сигналу, відбитого від метеорологічного об'єкта.*

*A new approach for turbulence intensity estimate with polarimetric weather radar is considered and analyzed. The algorithm of turbulence estimate with polarization spectrum components of reflected from weather object signal is developed and shown.*

**гідрометеори, метеорологічні радіолокатори, поляризація радіосигналу, турбулентність**

### Постановка проблеми

Вважається, що дистанційно оцінювати інтенсивність турбулентності радіолокаційними методами можливо тільки за допомогою доплерівських методів [1]. Доплерівські системи дозволяють визначити лише радіальну складову швидкості руху повітря за швидкістю руху гідрометеорів – складових хмар та опадів, що є відбивачами радіолокаційного сигналу. Це є певним обмеженням таких систем. У випадку рідких гідрометеорів, які під дією атмосферних явищ, пов'язаних з вітром, можуть змінювати свою форму та просторову орієнтацію, можна використовувати поляризаційні методи, що дозволяють одержати більш детальну інформацію про фізику явищ [2].

Результатом просторової зміни та орієнтації гідрометеорів є зміна поляризації відбитих від гідрометеорів сигналів відносно поляризації зондувального сигналу. Таким чином, 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.

### Аналіз досліджень і публікацій

У роботах [1; 3; 4] розглянуто можливість використання поляриметричних параметрів для одержання інформації щодо форми та просторової орієнтації гідрометеорів. У роботах [2; 5; 6] розглянуто можливість використання поляриметричних параметрів для визначення небезпечних явищ, пов'язаних з вітром. Такий підхід можливий, оскільки складові метеоутворень, що відбивають радіолокаційний сигнал, деформуються під дією градієнта вектора вітру і, як наслідок, змінюють поляризацію відбитого сигналу.

Сучасні поляриметричні та доплерівсько-поляриметричні радіолокатори для розрахунку інформативних параметрів використовують потужність відбитого від гідрометеорів сигналу з основною поляризацією (поляризацією зондувального сигналу) та потужність сигналу з поляризацією, що є ортогональною до основної. У такому випадку потужність відбитого сигналу розподіляється між потужністю сигналу з основною поляризацією та потужністю сигналу з поляризацією, що є ортогональною до основної. Відбитий сигнал з ортогональною до основної поляризацією найчастіше є дуже малою величиною, яку складно використовувати для подальших розрахунків поляриметричних параметрів на рівні ймовірності, що необхідний для локалізації небезпечних для авіації явищ, пов'язаних з вітром [1; 4]. Отже, технічна проблема одержання та оцінювання енергії відбитих сигналів з основною та ортогональною до основної поляризаціями, а також питання інтерпретації інформативних параметрів і їх зв'язок з фізикою атмосферних процесів лишаються дуже актуальними.

**Мета роботи** – розглянути підхід, який дає можливість оцінювання енергії поляризаційних складових відбитого від сукупності гідрометеорів сигналу.

### Принцип оцінювання енергії поляризованого сигналу

У роботі [7] описано метод оцінювання енергії поляризаційних складових відбитого від сукупності гідрометеорів сигналу, згідно з яким передавальна антена випромінює зондувальний сигнал фіксованої поляризації, а блок з кількості  $n$  приймальних антен приймає відбитий від метеоутворення сигнал.

Кожна з антен із цього блока налаштована на прийом сигналу відповідної поляризації. Після прийому оцінюється потужність сигналів різної поляризації та за необхідності розраховуються поляриметричні параметри. Це дозволяє сепарувати прийняті на кожну з антен сигнали за поляризацією та зробити розподіл поляризаційних складових у часі. Опис та функціональну діаграму пристрою, за допомогою якого можливо реалізувати цей підхід, наведено в роботі [8].

Найкращий прийом поляризованих сигналів можна досягти у випадку, коли вектори поляризації антени та поляризації сигналу співпадають. У нашому випадку поляризація відбитого сигналу визначається ансамблем гідрометеорів, які можуть мати різну форму, орієнтацію та рухатися з різними швидкостями. Наслідком цього є поява спектру коливань однієї частоти та з різною поляризацією на вході антенного блока. У цьому випадку поляризаційний спектр аналогічний частотному спектру [5; 6; 7; 9].

Оцінювання потужності прийнятого поляризованого сигналу буде залежати від розподілу сигналів по поляризаційному спектру та від діаграми спрямованості антени, що враховує розподіл потужності прийнятого сигналу залежно від поляризаційних складових. Таку діаграму спрямованості називаємо діаграмою спрямованості за поляризацією [7; 8; 9]. У цьому випадку мається на увазі сприйняття енергії сигналу відповідно до кута поляризації приймальної антени (рис.1).

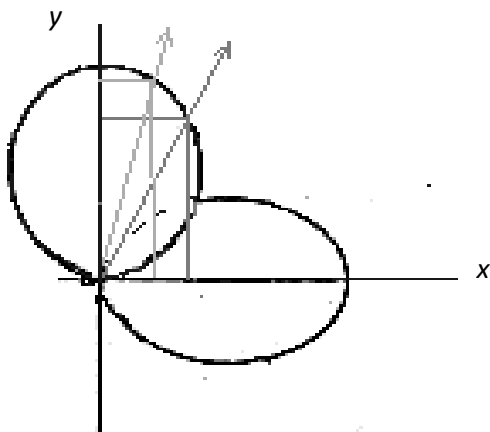


Рис. 1. Розподіл потужності прийнятого сигналу по діаграмах спрямованості антени залежно від поляризаційних складових

На рис. 1 вісь  $y$  відповідає максимальній потужності відбитого сигналу з вертикальною поляризацією, вісь  $x$  – максимальній потужності відбитого сигналу з горизонтальною поляризацією.

Ширина діаграми спрямованості антени за поляризацією буде визначатися кутами поляризації, на яких потужність відбитого від метеоутворення сигналу зменшується в два рази відносно поляризації приймальної антени. Діаграми спрямованості приймальних антен частково перекриваються. Як наслідок, енергії суміжних антен перерозподіляються і, таким чином, енергія сигналу, що не була прийнята однією із суміжних антен буде компенсована обмеженням сигналу в іншій. Вирішення проблеми оцінювання сигналу за кутом поляризації можливо тільки в тій частині приймально-передавального тракту радіолокатора, де така різниця існує, а саме в електромагнітному полі на вході антенної системи. Для ефективного приймання відбитого сигналу характер поляризації антени має збігатися з характером поляризації відбитої електромагнітної хвилі. Це означає, що вібратори приймальної антени мають бути орієнтовані паралельно вектору  $E$  відбитої електромагнітної хвилі. Важливим фактором для оцінювання сигналів з різними кутами поляризації є ширина спрямованості антени, яка характеризується відносною чутливістю антени щодо сприймання сигналів відповідної поляризації в заданому напрямку зондування. Антена має сприймати не тільки відбиті сигнали з поляризацією, яка скоординована з поляризацією приймальної антени, а і деякий миттєвий спектр сигналів однієї частоти, але з різними кутами поляризації. Такий спектр називаємо поляризаційним спектром [5; 6; 7; 9]. Отже, ширину діаграми спрямованості антени потрібно скорегувати, враховуючи можливість приймання сигналів з різними кутами поляризації. У нашому випадку кожна з антен антенного блока має бути скоординованою за поляризацією з коливаннями головного напрямку осі ширини діаграми спрямованості приймальної антени. Таким чином, потужність прийнятого сигналу з напрямку, який відрізняється від головного напрямку осі ширини діаграми спрямованості приймальної антени, не буде визначатися повним вектором сили поля, а тільки його деяким ефективним значенням. Це значення можна визначати як проекцію повного вектора на головну вісь діаграми спрямованості антени скоординованою за поляризацією з відбитою електромагнітною хвилею.

### Енергетична оцінка складових поляризаційного спектра

У роботі [9] зміна інтенсивності електромагнітного поля впродовж перетину сканувального променя виражається у зміні струму антени і залежить від поляризації прийнятого сигналу. Наявність хаотичних рухів повітря (турбулентності) призводить до зміни поляризації радіолокаційних сигналів відбитих від різних розсіювачів електромагнітних хвиль. Поляризація таких відбитих сигналів не збігається з початковою поляризацією зондувального сигналу. Зміна інтенсивності електромагнітного поля на вході антенного блока приведе до зменшення струму антени.

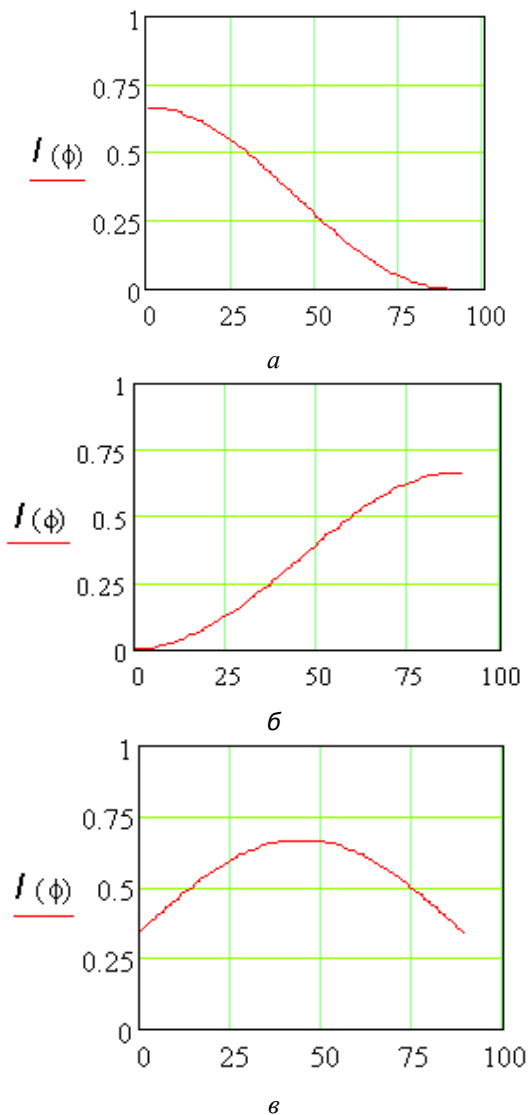


Рис. 2. Зміна струму в приймальній антені:  
 а – горизонтальна поляризація;  
 б – вертикальна поляризація;  
 в – поляризація  $45^\circ$

У роботі [9] зміна струму антени моделюється за допомогою вагових коефіцієнтів, які визначають діаграму спрямованості антени та залежать від зміни поляризації відбитих від гідрометеорів сигналів.

На рис. 2, 3 показано змодельовані зміни струму в приймальних антенах антенного блока, що налаштовані приймати сигнали з різними поляризаціями щодо поляризації зондувального сигналу та спектральні складові поляризаційних спектрів, що відповідають діаграмам на рис. 2. Однакова інтенсивність кольору відповідає складовим з однаковими кутами поляризації на діаграмах рис. 3.

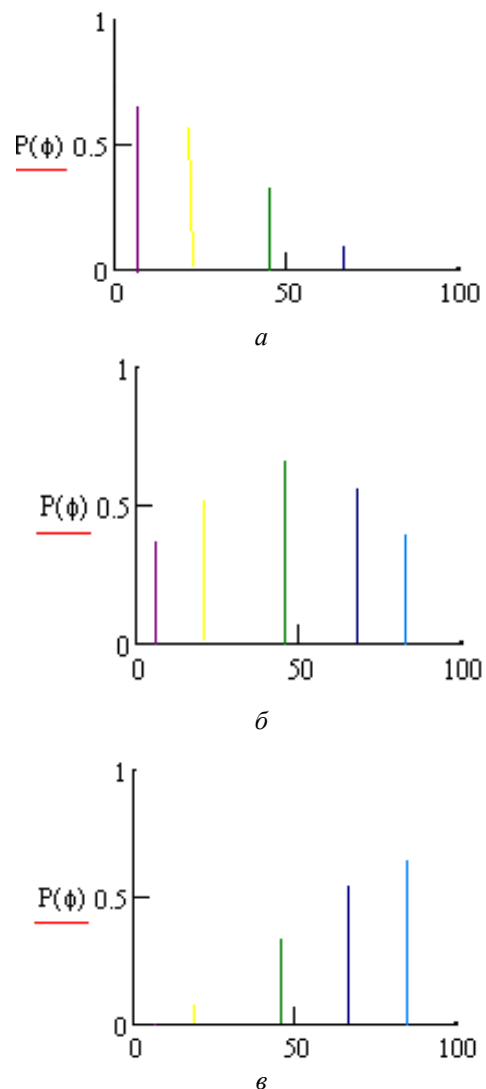


Рис. 3. Спектральні складові поляризаційного спектра для приймальної антени:  
 а – горизонтальна поляризація;  
 б – вертикальна поляризація;  
 в – поляризація  $45^\circ$

Послідовність операцій, необхідних для оцінювання потужності турбулентних складових поляризаційного спектра згідно з патентом [8], можна подати алгоритмом, який відповідає  $n$ -канальній системі, що показана на рис. 4.

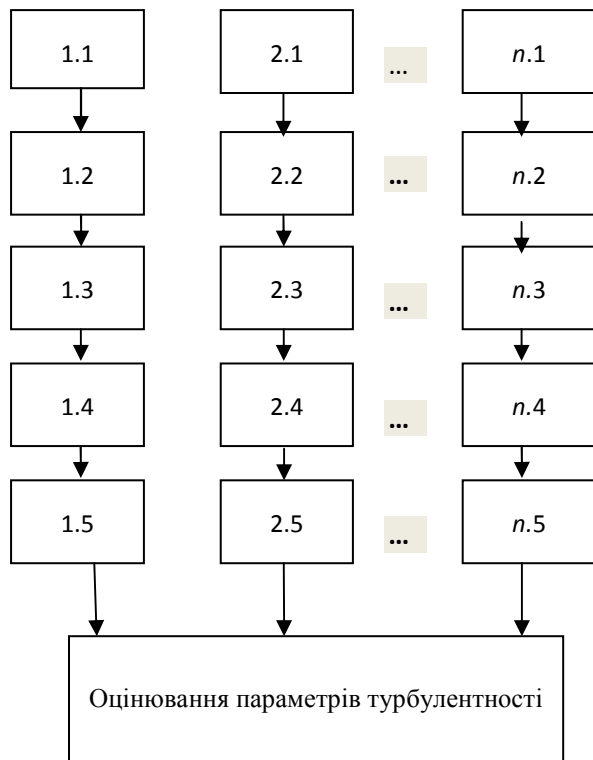


Рис. 4. Алгоритм оцінювання потужності турбулентних складових поляризаційного спектра в метеорологічних поляриметричних радіолокаторах

У нумерації блоків перша цифра позначає номер каналу, а друга номер блока в даному каналі. Кожний канал відповідає певній поляризаційній складовій сигналу, що приймається.

У цьому алгоритмі:

- блок 1.1 – приймання сигналу основної поляризації (наприклад,  $H$ );
- блок 1.2 – вимірювання струму в антені з основною поляризацією  $H$ ;
- блок 1.3 – оцінка миттєвої потужності прийнятого сигналу за пульсаціями струму в антені з основною поляризацією  $H$ ;
- блок 1.4 – визначення вагових коефіцієнтів перерозподілу потужності в антені з основною поляризацією  $H$ ;
- блок 1.5 – сепарація миттєвих потужностей по спектральних складових поляризаційного спектра з урахуванням часу їх існування в антені з основною поляризацією  $H$ .

Блоки 2.1–2.5 відображають процеси для антени, що налаштована приймати сигнал з поляризацією  $45^\circ$  (або будь-якою іншою, яка відрізняється від основної). Блоки  $n.1$ – $n.5$  демонструють процеси для антени, що налаштована приймати сигнал з ортогональною поляризацією  $V$ .

### Результати моделювання

На рис. 2, 3 можна побачити, що зменшення потужності прийнятого сигналу в будь-якій окремій антені супроводжується збільшенням потужності в іншій антені.

Рівень сигналу в антені з деякою проміжною поляризацією значно вище, ніж в антені з ортогональною поляризацією відповідно до поляризації зондувального сигналу.

Отже, відношення сигнал/шум для відбитого деполаризованого сигналу краще в антені з деякою проміжною поляризацією, ніж в антені, що налаштована приймати сигнали з ортогональною поляризацією відповідно до поляризації зондувального сигналу.

Кращий рівень сигнал/шум дозволяє оцінювати та розраховувати поляризаційні параметри для визначення небезпечних явищ з високим рівнем імовірності.

Для більшої відповідності моделей реальним процесам у подальшому при моделюванні треба враховувати розподіл крапель за розміром, а також час існування спектральних складових відповідно до  $\tau$  – сталої часу краплі, як у роботах [1; 5; 6].

### Висновки

Результати моделювання та алгоритм оцінювання потужності турбулентних складових поляризаційного спектра в метеорологічних поляриметричних радіолокаторах показують можливість використання поляризаційних методів не тільки для аналізу мікроструктури хмар та опадів, а також для визначення характеристик атмосферних явищ, пов'язаних з вітром. Такий підхід дозволить розширити можливості метеорологічних радіолокаторів, а також значно збільшити інформативність вимірюваних параметрів та якість метеорологічної інформації.

**Література**

1. *Russchenberg H.W.J.* Ground-based remote sensing of precipitation using a multi-polarized FM-CW Doppler radar / H.W.J. Russchenberg. – Delft University Press, 1992. – 206 p.
2. *Averyanova Yu. A.* Use of Doppler-Polarimetric parameters for wind phenomena localization / Yu. A. Averyanova. // EuRAD 2004: Proc. of the 34th European microwave Conf. 11–15 October 2004, Amsterdam. – The Netherlands. – P. 20–32.
3. *Яновський Ф.* Бортові метеорологічні радіолокатори: навч. посіб. / Ф. Яновський. – К.: НАУ, 2003. – 324 с.
4. *Doviak R.J.* Doppler radar and weather observations / R.J. Doviak, D.S. Zrnic // Academic Press, inc., 1993. – 522 p.
5. *Авер'янова Ю.А.* Оцінка інтенсивності атмосферної турбулентності за допомогою поляриметричного радіолокатора / Ю.А. Авер'янова, А.А. Аверьянов, Ф.Й. Яновський // Вісник НАУ. – 2006. – № 2. – С. 38–40.
6. *Averyanova Yu.* The possibility to use polarimetric radar for atmospheric turbulence intensity estimate / Yu Averyanova // Proc. of the National Aviation University. – 2006. – № 3 (29). – P. 46–48.
7. *Averyanova Yu.* Polarization signal components estimate in weather radar / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F.J. Yanovsky // Proc. of 12th Intern. Conf. on Mathematical methods in electromagnetic theory. – Odesa, 2008. – P. 360–362.
8. *Патент* на корисну модель Поляриметричний радіолокатор / Авер'янова Ю.А., Аверьянов А.О., Яновський Ф.Й. – № u200804248; заявл. 04.04.2008; опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.
9. *Averyanova Yu.* The Estimate of Instantaneous Power of Polarization Spectrum Components in Polarimetric Weather Radar / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F.J. Yanovsky // Proc. of 2nd Intern. Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS2008), 22–24 September, Kyiv. – P. 179–181.

Стаття надійшла до редакції 03.03.09

