

УДК 621.396.96

¹Ю.А. Авер'янова, к.т.н., доц.
А.А. Аверьянов, к.т.н., доц.
²Ф.Й. Яновський, д.т.н., проф.

КОНЦЕПЦІЯ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-ЧУТЛИВИХ АНТЕННИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЛОКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ НЕСТАБІЛЬНОЇ ФОРМИ

Національний авіаційний університет

¹E-mail: Yuliya_ans@yahoo.co.uk

²E-mail: yanovsky@i.com.ua

Розглянуто концепцію застосування поляризаційно-селективних антен та антенних систем, чутливих до поляризаційних змін електромагнітних хвиль у разі їх відбитті від об'єктів нестабільної форми, наприклад, краплі у повітрі, які вібрують під дією різних факторів.

The concept of polarization selective antennas and antenna systems that are sensitive to the polarization variations of electromagnetic waves when their reflection from unstable shape objects is considered. One of the examples of unstable shape objects are drops suspended in the air. The drops vibrate under the effect of different factors.

Рассмотрена концепция использования поляризационно-селективных антен и антенных систем, чувствительных к поляризационным изменениям электромагнитных волн при их отражении от объектов нестабильной формы, например, капель в воздухе, вибрирующих под действием разных факторов.

Постановка проблеми

Інформація про небезпечні для авіації погодні явища є однією з необхідних умов забезпечення безпеки, регулярності та економічності польотів повітряних суден.

Авіаційні служби прогнозування погоди та одержання оперативної метеорологічної інформації значно покращили свої можливості у зв'язку з розвитком радіолокаційних засобів стеження за атмосферою.

Сучасні метеорологічні радіолокаційні засоби – це мережі некогерентних та доплерівських радіолокаційних систем.

Анени та приймальні тракти некогерентних систем дозволяють вимірювати лише потужність відбитих від метеорологічних об'єктів сигналів, втрачаючи інформацію про зсув частоти, а когерентні антенно-приймальні системи доплерівських радіолокаційних вимірюють ще і частотні зсуви відбитих сигналів. Прийнятий антеною сигнал обробляється здебільшого як функція часу.

Сигнал, що випромінюється радіолокатором у разі відбиття від метеорологічного об'єкту, може змінювати:

- амплітуду;
- фазу;
- частоту;
- напрямок поширення;
- поляризацію.

Такі зміни зумовлені природою, характеристиками та динамікою відбиваючого об'єкта, а також характеристиками середовища поширення.

У випадку, коли подальшому обробленні підлягають тільки характеристики потужності та/або частоти прийнятих сигналів як функцій часу без урахування поляризаційних змін, важлива інформація про стан, структуру та динаміку об'єкту не може бути подана повним обсягом.

Мета роботи – аналіз та розроблення концептуального підходу щодо застосування антенних систем, які здатні додатково оцінювати поляризаційні характеристики відбитих радіолокаційних сигналів.

Увага приділяється оцінюванню поведінки неосереднених, «миттєвих» поляризаційних характеристик. Такі характеристики виявляються важливими під час аналізу динамічних атмосферних явищ.

Аналіз досліджень і публікацій

Результати досліджень щодо удосконалення алгоритмів виявлення небезпечних явищ шляхом оброблення даних доплерівських систем [1] та доплерівських систем з урахуванням поляризаційних особливостей зондувальних і відбитих сигналів [2], проведених останніми десятиріччями у Великій Британії, Нідерландах, Німеччині та США, призвели до розроблення комбінованого доплерівсько-поляриметричного підходу для дослідження атмосфери.

Результати багатьох експериментів показали, що доплерівсько-поляриметричний підхід дозволяє підвищити інформативність вимірювальних параметрів і більш ефективний при локалізації небезпечних для авіації атмосферних явищ, проте ускладнює оброблення інформації та інтерпретацію даних [3].

Деякі з поляризаційних систем дистанційного зондування використовують одну поляризаційно-селективну антену, яка по черзі перемикається для приймання сигналів основної поляризації (поляризації зондувального коливання) та сигналів з ортогональною поляризацією.

Доплерівсько-поляризаційні радіолокаційні системи використовують дві антени для одночасного випромінювання та приймання сигналів з основною або ортогональною поляризаціями.

У роботі [4] розглянуто радіолокаційну систему з трьома антенами для одержання інформації про параметри атмосфери.

Реальна атмосфера є динамічним середовищем, в якому постійно відбуваються різноманітні процеси та зміни. Для одержання більш детальної інформації про її стан необхідно одночасно вимірювати параметри, що його відображають.

У випадку використання системи з двома антенами, що налаштовані одночасно приймати ортогонально поляризовані сигнали, рівень сигналу в ортогональній антені часто недостатній для подальшого оброблення та одержання поляризаційних параметрів. У таких системах поляризаційні параметри переважно використовують [5]:

- для розділення сигналів, відбитих від метеорооб'єктів та інших радіолокаційних цілей;
- одержання інформації про мікроструктуру метеорологічних формувань та поліпшення інформації щодо кількості та інтенсивності опадів.

У розглянутих системах для виявлення поляризаційних особливостей відбитих сигналів переважно використовують осереднені дані. За такого підходу інформація про флуктуації сигналів здебільшого губиться.

У випадку зондування атмосфери, де відбиття сигналів відбувається найчастіше від об'єктів нестабільної форми, такі флуктуації містять важливу інформацію про поведінку, характеристики та структуру об'єкту.

Вітрові явища суттєво впливають на характер вібрації об'єктів, форма яких не є жорсткою.

У роботі [6] показана можливість використання таких ефектів поляриметрії для виявлення атмосферних явищ, пов'язаних з вітром, зокрема турбулентності, зсуву вітру тощо.

Вплив об'єктів нестабільної форми на відбиття радіолокаційного сигналу

У випадку відбиття зондувального сигналу від ансамблю гідрометрів необхідно прийняти до уваги відбивальні властивості крапель хмар та опадів.

Краплі у зваженому стані в атмосфері моделюються за допомогою еліпсоїду з розмірами a_1 , a_2 , a_3 (рис. 1) [7].

Під час падіння аеродинамічні сили сприяють сплюсненню краплі, отже, її форма несферична. Чим більша крапля за розміром, тим більш сплюснену форму вона має. Крапля в потоці повітря постійно вібує під дією різних сил та процесів, отже, її форма нестабільна [8], як і параметри її розміру.

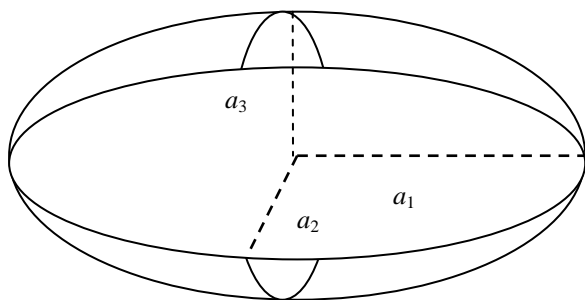


Рис.1 Апроксимація краплі еліпсоїдом

Амплітуда вібрації залежить як від зовнішніх факторів, так і від розміру самої краплі. Чим більша крапля, тим більша амплітуда вібрації, і, як наслідок, тим більша є дисперсія коливань розмірів сплющеного сфероїду.

Краплю в повітрі можна розглядати як об'єкт нестабільної форми або сфероїд з осями, розмір яких є випадковими величинами.

Одною з причин нестабільності можна назвати динамічні явища, такі, як атмосферна турбулентність.

Таким чином, параметри турбулентності впливають на процес зміни осей краплі-сфероїду, що, в свою чергу, може виявитися в частотних, поляризаційних та амплітудних змінах відбитого радіолокаційного сигналу.

Поляризаційна радіолокаційна система з n антенами

У роботі [9] зображено поляриметричну радіолокаційну систему, що дозволяє оцінити інтенсивність турбулентності за складовими миттєвого поляризаційного спектра сигналу, відбитого від метеорологічного об'єкта.

Робота такої системи базується на передаванні зондувального сигналу фіксованої поляризації передавальною антеною та прийманні відбитої радіохвилі антенним блоком з n ($n > 2$) приймальних антен.

Кожна з антен у цьому блоці налаштована на приймання сигналу відповідної поляризації.

Після приймання оцінюється потужність сигналів із різною поляризацією та за необхідності розраховуються поляриметричні параметри. Це дозволяє сепарувати прийняті на кожну з антен сигнали за поляризацією та зробити розподіл поляризаційних складових у часі.

Приймання (наявність) сигналів антенами, налаштованих сприймати сигнали з поляризацією, яка відрізняється від поляризації зондувального сигналу, свідчить про процеси, що призвели до деформації крапель і, як наслідок, про зміну кута поляризації відбитої електромагнітної хвилі.

Більшість природних динамічних явищ не спричиняють зміну кута поляризації відбитих від метеоутворення радіохвиль більше за 15 град. Це призводить до того, що в антені, яка налаштована приймати сигнали з ортогональною поляризацією відносно поляризації зондувальної хвилі, рівень сигналу часто менший за рівень завад.

Таким чином, для приймання сигналів зі зміненим кутом поляризації з рівнем, необхідним для подальшого оброблення та розрахунків параметрів, використовується проміжна антена.

У роботах [9; 10] наведено результати моделювання варіації струмів у приймальних антенах залежно від зміни кута поляризації відбитих від гідрометеорів хвиль для трьох антен, налаштованих приймати сигнали основної поляризації (поляризації зондувального променя), ортогональної до основної та сигналів, кут поляризації яких відрізняється від основної на 45 град.

Результати моделювання зміни потужності в трьох антенах, що налаштовані приймати сигнали з основною поляризацією (a), ортогональною (b) та під кутом 45 град до основної (c) з урахуванням рівня сигнал/завада показано на рис. 2.

Поляризація зондувального сигналу в цьому випадку – вертикальна. Потужність адитивної завади обрано на рівні 0,3 від загальної прийнятої потужності.

Рівень нормованої потужності відкладено впродовж осі y , кут зміни поляризації впродовж осі x .

У випадку приймання сигналів антеною, що налаштована приймати ортогонально поляризовані хвилі, рівень сигналу є меншим за рівень завад у випадку невеликих кутів зміни поляризації відбитої хвилі (рис. 2, b).

В антені, яка налаштована приймати сигнал з поляризацією 45 град відносно поляризації зондувальної хвилі, сигнал перевищує рівень завад майже по всьому діапазону змін кутів поляризації (рис. 2, в). Цей факт є важливим під час дослідження атмосферних явищ, які в більшості випадків не спричиняють значних відхилень кутів поляризації.

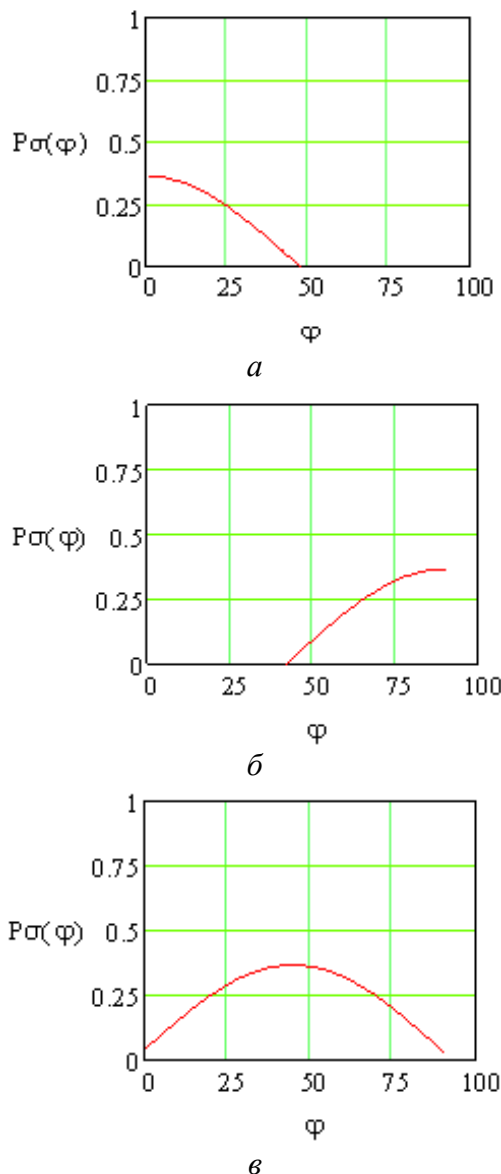


Рис. 2. Зміна потужності прийнятого сигналу антеною, що налаштована приймати електромагнітні хвилі:

а – з вертикальною поляризацією;

б – з горизонтальною поляризацією;

в – з кутом поляризації 45 град від вертикальної

Отже, ефективно приймання відбитих від метеоутворень радіохвиль зі зміненою поляризацією можливо проміжною антеною, що налаштована приймати сигнали зі зміненим кутом поляризації відносно основної поляризації не більшим за 45 град.

Використання такої системи для метеорологічних цілей дозволяє одержати значно вищий рівень сигналу зі зміненою поляризацією та забезпечує кращий рівень сигнал/шум ніж це можливо за допомогою традиційних поляризаційних систем, що приймають сигнали з основною та ортогональною поляризаціями.

За допомогою таких систем можна:

- покращити аналіз мікроструктури хмар та опадів;
- визначати характеристики атмосферних явищ, пов'язаних з вітром.

З урахуванням технічних можливостей сучасних приймальних (антенних) систем блок приймальних антен можна реалізовувати за допомогою однієї багатоканальної антени або антени з багатьма входами. Такий підхід дозволить:

- розширити можливості метеорологічних радіолокаторів;
- значно збільшити інформативність вимірюваних параметрів і якість метеорологічної інформації.

Система потребує дотримання додаткових вимог щодо характеристик антени, таких, як діаграма спрямованості за поляризацією та ширина діаграми спрямованості антени, яка характеризується відносною чутливістю антени щодо сприймання сигналів відповідної поляризації в заданому напрямку зондування.

Поляриметрична система з однією поляризаційно селективною антеною

У роботі [11] показано можливість використання антени з визначеними поляризаційними властивостями для одержання інформації про динамічні процеси в атмосфері.

За допомогою математичного моделювання показано, як змінюється характер радіосигналу, відбитого від ансамблю гідрометорів у

разі зміни інтенсивності атмосферної турбулентності. Зміна кута поляризації відбитих від гідрометеорів електромагнітних хвиль визначається за допомогою просторово-часового опису прийнятих сигналів.

За допомогою сфери Пуанкаре у роботі [11] показано, що ступінь зміни кута поляризації відбитої радіохвилі як інформативний параметр змінюється відповідно до прямого 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, що не збігається з поляризацією зондувального сигналу, струм в приймальній антені визначається проекцією вектора поляризації прийнятого сигналу на поляризацію, що збігається з вектором поляризації, на яку налаштована антена.

Зміна амплітуди прийнятого сигналу спричиняється багатьма факторами:

- інтенсивністю опадів;
- розмірами;
- типом відбивачів у метеоутворенні.

Частотні характеристики флуктуацій амплітуди, які викликані динамічними процесами в атмосфері, відрізняються від флуктуацій, що є наслідком інших процесів, які впливають на амплітуду сигналів. Цей факт зумовлений особливостями фізики атмосферних явищ.

Флуктуації амплітуди, спричинені динамічними явищами, проявляються в характері зміни низькочастотної обвідної відбитого від метеоутворень радіолокаційного сигналу.

Використовуючи результати моделювання, одержані за допомогою алгоритму [11], можна розрахувати ймовірність помилкового виявлення небезпечної турбулентності та ймовірність прийняття вірного рішення про наявність небезпечного явища i , таким чином, оцінити потенційну можливість урахування (використання) поляризаційних характеристик для одержання інформації про атмосферні динамічні явища.

Розрахунок сумарної похибки визначення зон небезпечної турбулентності проводився на основі статистичних оцінок низько частотної обвідної відбитого від метеоутворень радіолокаційного сигналу [12].

Змодельовані дані ймовірностей хибної тривоги та вірного рішення як функція рівня порогу показано на рис. 3.

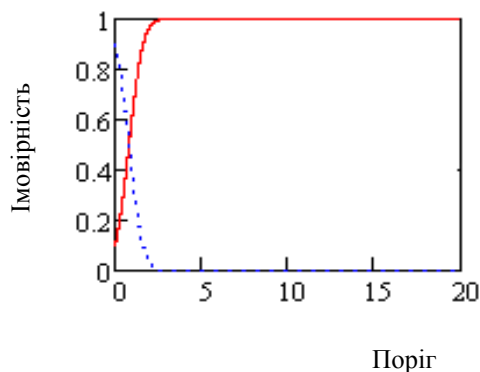


Рис. 3. Ймовірності хибної тривоги (пунктир) та вірного рішення (суцільна лінія)

Дані одержані для випадку виявлення сильної турбулентності. Приорощення перевантаження повітряного судна перевищує $1g$.

Значення сумарної похибки у разі виявлення небезпечної турбулентності за допомогою системи, що фіксує флуктуації прийнятого сигналу, спричинені зміною поляризації відбитих від метеоутворень електромагнітних хвиль, показано на рис. 4.

Із рис. 4 видно, що порядок сумарної похибки у разі використання запропонованого підходу з однією антеною з фіксованою поляризацією має порядок 0,1.

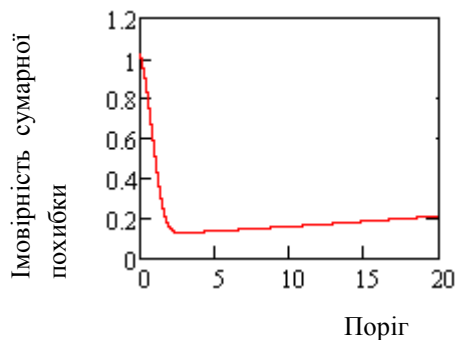


Рис. 4. Ймовірність сумарної похибки як функція рівня порогу

Сумарна похибка у разі використання інших методів виявлення небезпечної турбулентності, наприклад, за шириною доплерівського спектра [13] має такий самий порядок.

За допомогою зазначеного підходу оцінюється зменшення енергії в приймально-передавальній антені з визначеними поляризаційними властивостями. Це є еквівалентом збільшення енергії перехресної складової, тобто сигналу в ортогональній приймальній антені поляриметричного радіолокатора.

На відміну від існуючих поляриметричних радіолокаторів для оцінки зміни кута поляризації відбитої електромагнітної хвилі в цьому разі немає необхідності використання двох ортогональних антен.

Оцінка проходить за більш високого рівня сигнал/шум, тому що оцінюється сигнал в антенні з основною поляризацією. Такий факт особливо важливий для невеликих кутів зміни поляризації не тільки у випадку атмосферних явищ, але й у більшості реальних цілей.

Висновки

Концепція використання запропонованих систем передбачає:

– додаткове використання поляризаційних характеристик відбитих від метеорологічних об'єктів радіохвиль для подальшого просторово-часового оброблення одержаних радіолокаційних сигналів;

– використання миттєвих поляризаційних характеристик, що змінюються під впливом вітрових явищ на об'єкти нестабільної форми, які відбивають радіолокаційний сигнал.

Наведені задачі та концепція урахування поляризаційних характеристик потребують значної уваги для розроблення та конструкції антенних систем із заданими поляризаційними властивостями та їх реалізації для сучасних доплерівських когерентних систем, а також звичайних некогерентних метеорологічних радіолокаторів.

Розширення можливостей доплерівських радіолокаторів, наприклад, у визначенні характеристик вітрових атмосферних явищ дозволять значно збільшити інформативність вимірюваних параметрів та якість метеорологічної інформації.

Література

1. *Gorelik A.G.* Methods of Doppler tomography in radar meteorology / A.G. Gorelik, V.V. Sterlyadkin. – Proc. of radar methods and systems symposium. – Kyiv, Ukraine. – 21 September, 2010. – P. 22.1–22.2.
2. *Zrnica D.* Weather Radar – Recent Developments and Trends / D. Zrnica // Proc. of microwaves, radar and remote sensing symposium. – Kyiv, Ukraine. – 22-14 September, 2008. – P. 174–178
3. *Yanovsky F.J.* Retrieval of information about turbulence in rain by using Doppler-Polarimetric radar / F.J. Yanovsky, W.J. Russchenberg, C.M.H. Unal // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Feb., 2005. – Vol. 53, No 2. – P. 444 – 450.
4. *Kashcheev B.L.* Remote methods and means for study of processes in the Earth Atmosphere / B.L. Kashcheev, E.G. Proshkin, M. F. Laguti, – Kharkov: National University of Radioelectronics of Kharkov; Business Inform, 2002. – 426 p.
5. *The joint Polarization Experiment: Polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification* / A.V. Ryzhkov, T.J. Schuur, D.W. Burgess et al. – Bull. American Met. 2005. – Soc. 86. – P. 809–824.
6. *Averyanova Yu. A.* Use of Doppler-Polarimetric parameters for wind phenomena localization / Yu. A. Averyanova // EuRAD 2004: Proc. of the 34th European microwave Conference, 11-15 October 2004. – Amsterdam. The Netherlands. – P. 20–32.
7. *Yanovsky F.J.* Doppler-Polarimetric models of microwave remote sensing of rain (invited paper) / F.J. Yanovsky, H.W.J. Russchenberg, L.P. Ligthart // Conference Proc. The 11th Conference on Microwave Technique COMITE 2001, 18–19 September, 2001. – University of Pardubice, the Czech Republic. – P. 47–62.

8. Стерлядкин В.В. Натурные измерения колебаний капель осадков / В.В. Стерлядкин // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1988. – Т.24, № 6. – С. 613–621.

9. Авер'янова Ю.А. Алгоритм оцінювання турбулентності поляриметричними метеорологічними радіолокаторами / Ю.А. Авер'янова, А.А. Аверьянов, Ф.Й. Яновський. – Вісник НАУ. – 2009. – № 2. – С. 69–73.

10. Averyanova Yu. Polarization signal components estimate in weather radar / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F.J. Yanovsky // Proc. of 12th International Conference on Mathematical methods in electromagnetic theory. – Odesa. – 2008. – P. 360–362.

11. Averyanova Yu. A. Influence of turbulence onto depolarization of signal reflected from hydrometeor / Yu. A. Averyanova, A. A. Averyanov, F.J. Yanovsky // Proc. of international radar symposium (IRS 2010). – Vilnius, 2010. – P. 501–504.

12. Averyanova Yu. Statistical estimation of polarimetric method potential for dangerous turbulence detection in rain / Yu. A. Averyanova, A. A. Averyanov, F.J. Yanovsky // Proc. of International Conference on Mathematical methods in electromagnetic theory. – Kyiv, 2010.

13. Яновський Ф.Й. Метеонавігаційні радіолокаційні системи повітряних суден: навч. посіб. / Ф.Й. Яновський. – К.: НАУ, 2003. – 324 с.

Стаття надійшла до редакції 29.11.10.