

В. Д. Карлов¹, О. Л. Кузнецов¹, О. В. Коломійцев²,
І. В. Красношарпа¹, І. М. Петрушенко³, О. В. Струцінський⁴

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

² Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

³ Військова академія, Одеса, Україна

⁴ Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця, Україна

МОЖЛИВОСТІ ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ТРОПОСФЕРИ ПРИ ВИМІРЮВАННІ КУТОВИХ КООРДИНАТ ТА ВИСОТИ АЕРОДИНАМІЧНОГО ОБ’ЄКТА

Анотація. Пошук шляхів підвищення якості просторової обробки радіолокаційного сигналу в умовах впливу тропосферних неоднорідностей є актуальною задачею, що спрямована на підвищення ефективності використання радіолокаційної техніки за призначенням. У статті визначено два шляхи врахування впливу тропосфери при вимірюванні куткових координат та висоти аеродинамічного об’єкта (АО). Перший шлях передбачає оперативне визначення закону зміни градієнта коефіцієнта заломлення та обчислення відповідних поправок на рефракцію. Розглянуто найбільш зручні для використання моделі закону зміни індексу заломлення з висотою та проаналізовано особливості їх застосування. Другий шлях пов’язаний з врахуванням корельованих фазових флуктуацій радіолокаційного сигналу в алгоритмі його просторової обробки. Наведено особливості даного врахування стосовно радіолокаторів з фазованою антенною решіткою (ФАР). Внаслідок статистичної незалежності неоднорідностей тропосфери, в силу центральної граничної теореми теорії ймовірностей, закон розподілу фазових флуктуацій вважається нормальним. Здійснено порівняльний аналіз даних шляхів врахування впливу тропосфери при вимірюванні куткових координат та висоти аеродинамічного об’єкта. Проведено порівняння флуктуаційних складових середньоквадратичних похибок (СКП) оптимального вимірювання кутової координати та висоти за умовою врахування фазових флуктуацій з відповідними СКП флуктуаційних складових похибок вимірювання кутової координати та висоти без врахування вказаних флуктуацій для випадків опису міжканальної кореляції фазових флуктуацій за експонентною, осцилюючою та Гаусовою залежностями. Отримані результати дозволяють оцінити доцільність застосування оптимального алгоритму вимірювання кута місця та висоти АО в радіолокаторах з ФАР для конкретних умов впливу тропосферних неоднорідностей.

Ключові слова: аеродинамічний об’єкт, висота, градієнт коефіцієнта заломлення, кут місця, метеорологічні параметри, радіолокаційний сигнал, середньоквадратична похибка, статистична оптимізація, точність вимірювання, тропосфера, фазована антенна решітка, фазові флуктуації.

Вступ

Отримання повної радіолокаційної інформації про просторове положення повітряних об’єктів є невід’ємною вимогою до сучасних радіолокаторів.

Зокрема, вимірювання куткових координат та визначення висоти з високою точністю є необхідною умовою подальшого стійкого автоматичного супроводження об’єктів радіолокаційного спостереження, особливо тих, що рухаються на малих та гранично малих висотах. При використанні за призначенням радіолокаторів приморського та морського базування можливим є захоплення електромагнітних хвиль тропосферними радіохвилеводами, що сприяє значному підвищенню дальності виявлення локаційних об’єктів. Однак, це супроводжується суттєвим зростанням впливу флуктуаційних явищ на якість обробки радіолокаційної інформації [1].

Вказаний вплив сприяє погіршенню якості просторово-часової обробки радіолокаційного сигналу, зокрема, зниженню точності вимірювання куткових координат аеродинамічних об’єктів (АО) [2].

З розробкою нових трикоординатних радіолокаційних станцій (РЛС), зокрема РЛС з фазованою антенною решіткою (ФАР), та модернізації існуючого парку радіолокаційних висотомірів актуальним постало питання щодо врахування тропосферного впливу, тобто поточного стану тропосфери, при вимірюванні куткових координат та обчисленні висоти польоту АО.

В РЛС попереднього покоління, визначення поточного стану тропосфери забезпечувалося використанням відповідного набору метеоприладів, однак ефективність їх застосування при вимірюванні висоти АО була досить низькою.

В сучасних РЛС, вдосконалення елементної бази суттєво ускладнює існуючі алгоритми обробки радіолокаційних сигналів, що спрямовані на оптимізацію вимірювання координат та параметрів руху АО з врахуванням впливу зовнішніх факторів на процес радіолокаційного спостереження. Отже, врахування впливу тропосфери на якість просторових вимірювань можливо реалізувати такими шляхами.

Традиційним шляхом є розрахунок відповідних поправок, які залежать від поточних метеорологічних параметрів тропосфери [3, 4] та їх застосування при отриманні оцінок висоти АО.

Іншим шляхом є проведення статистичної оптимізації алгоритмів просторової обробки радіолокаційного сигналу за рахунок врахування флуктуаційних явищ при поширенні радіолокаційного сигналу крізь тропосферні неоднорідності з реалізацією відповідних оптимальних алгоритмів на сучасній елементній базі радіолокаторів нового покоління. Найбільш повно вказані можливості можуть бути реалізовані в цифрових радіолокаторах з ФАР.

Таким чином, вище викладене обумовлює необхідність проведення порівняльного аналізу можливостей реалізації даних шляхів з визначенням відповідних переваг та недоліків кожного з них.

Аналіз публікацій за темою дослідження. Пошук шляхів підвищення якості просторової обробки радіолокаційного сигналу в умовах впливу тропосферних неоднорідностей передбачає оцінювання шумової та флуктуаційної складових похибки вимірювання кутових координат АО.

У [5] доведено, що фазові флуктуації, які виникають внаслідок впливу тропосферних неоднорідностей, розподілені за нормальним законом з нульовим середнім. Отримання дисперсії флуктуаційної складової похибки вимірювання кутової координати АО доцільно здійснювати згідно методики, аналогічної випадку часо-частотної обробки радіолокаційного сигналу, яка викладена у [6].

Послідовність оцінювання флуктуаційної складової середньоквадратичної похибки (СКП) вимірювання кутової координати стосовно РЛС з ФАР сантиметрового діапазону довжин хвиль при експонентній кореляційній функції фазових флуктуацій наведено у [7].

Окрім цього, для РЛС даного типу, можливе зниження точності вимірювання кутових координат об'єктів радіолокаційного спостереження внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей та земної поверхні оцінено у [8].

З врахуванням даних результатів, у [9] надано чисельний аналіз флуктуаційних відхилень просторового положення АО у вертикальній та горизонтальній площинах від шляху хвилі у тропосфері.

Явище тропосферної рефракції сприяє реалізації можливості спостереження АО за межами дальності прямої видимості радіолокатора. Однак, це, у свою чергу, викликає суттєве зростання саме флуктуаційних складових похибок вимірювання координат та параметрів руху АО, що безпосередньо доведено у [2, 10]. У вказаних роботах бракує проведення чисельного аналізу СКП вимірювання кутових координат АО для інших видів кореляційних функцій фазових флуктуацій окрім експонентного. Тому, доцільно поширити отримані результати на випадки зміни кореляції фазових флуктуацій за осцилюючим та гаусовим законами зміни з подальшим застосуванням даних результатів при вимірюванні висоти АО. Вибір відповідного закону зміни кореляції фазових флуктуацій має експериментальне підтвердження, яке надано у [11].

Можливості врахування поточного стану тропосферної рефракції при вимірюванні висоти польоту АО в радіолокаторах контролю повітряного простору проаналізовані у [12]. При цьому, вказується, що вплив тропосферної рефракції обумовлює виникнення додаткових рефракційних похибок вимірювання кута місця, і як слід висоти АО, які залежать від градієнта коефіцієнта заломлення у напрямку поширення радіолокаційного сигналу в атмосфері. Врахування рефракції здійснюється шляхом введення у алгоритм визначення висоти АО поправки на рефракцію, розрахунок якої надано для декількох найбільш поширених моделей зміни індексу заломлення з висотою.

Однак, можливості вказаних пропозицій є обмеженими за рахунок низької точності оцінок зако-

ну зміни градієнта коефіцієнта заломлення та економічної недоцільності розгортання мережі метеостанцій для уточнення даного закону.

З точки зору розвитку сучасної теорії статистичної оптимізації обробки радіолокаційного сигналу, значно більш перспективним є шлях врахування кореляції фазових флуктуацій, обумовлених впливом неоднорідностей тропосфери, безпосередньо у алгоритмах просторової обробки.

Пропозиції щодо статистичної оптимізації алгоритмів просторової обробки при багатоканальному прийомі радіолокаційного сигналу шляхом врахування корельованих фазових флуктуацій надані у [13].

Порядок розрахунку дисперсії флуктуаційної складової похибки вимірювання кутової координати АО за умовою врахування фазових флуктуацій сигналу надано у [14].

Таким чином, у наведених роботах не у повному обсязі надано порівняльного чисельного аналізу похибок вимірювання кутових координат АО з врахуванням та без врахування тропосферного впливу при просторовій обробці радіолокаційного сигналу для конкретних параметрів РЛС приморського та морського базування. Даний чисельний аналіз доцільно провести для різних законів зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій.

Метою статті є визначення можливостей врахування впливу тропосфери при вимірюванні кутових координат та висоти АО стосовно РЛС приморського та морського базування.

Основна частина

Як зазначено у [12], визначення висоти АО здійснюється за вимірними параметрами руху – похилої дальності та куту місця.

У багатьох сучасних трикоординатних РЛС кут місця АО найчастіше визначається амплітудним, частотним та фазовим методами.

Так, амплітудний метод реалізовано у рухомих радіовисотомірах [15, 16]. Частотний метод застосовано у когерентно-імпульсних радіолокаторах з дзеркальними антенами, що мають куточастотну чутливість [17, 18]. Фазовий метод використовується у радіолокаторах з ФАР [18].

Висота АО з врахуванням кривизни Землі та без врахування тропосферної рефракції визначається за формулою [12]:

$$h = r \sin \varepsilon + r^2 / (2R_3) + h_a, \quad (1)$$

де r – похила дальність АО; ε – кут місця АО; R_3 – радіус Землі; h_a – висота розташування антени радіолокатора над поверхнею, відносно якої здійснюється відлік висоти АО.

Вплив тропосферної рефракції обумовлює виникнення додаткових рефракційних похибок вимірювання кута місця, і як слід висоти АО, які залежать від градієнта коефіцієнта заломлення n у напрямку поширення радіохвилі в атмосфері [12]:

$$\text{grad}n = g_n = dn/dr = n'. \quad (2)$$

При цьому, рефракційна похибка вимірювання кутової координати АО визначається як

$$\Delta \varepsilon_{ref} = 0,5 \cdot r \cdot n'. \quad (3)$$

Величини n і n' залежать від висоти відносно земної поверхні та стану атмосфери (особливо у нижніх шарах постійно змінюється), а також у кожній точці на шляху поширення електромагнітних коливань мають власне значення [12]. Тобто, залежності $n(r)$ та $n'(r)$ носять складний характер.

Таким чином, траєкторія променя є кривою складної форми і градієнт коефіцієнта заломлення тропосфери у кожній точці даної траєкторії має власну, у значній мірі випадкову величину.

Можна визначити основні два шляхи подолання проблеми випадковості коефіцієнта заломлення у тропосфері.

Перший шлях – пов'язаний з оперативним визначенням закону зміни градієнта коефіцієнта заломлення n' для чого необхідно здійснювати спеціальне зондування атмосфери на шляху поширення радіохвилі. При цьому, врахування рефракції здійснюється введенням у (1) поправки на рефракцію Δh_{ref} [12]:

$$h = r \cdot \sin \varepsilon + \frac{r^2}{2R_3} + h_a + \Delta h_{ref}. \quad (4)$$

Величина даної поправки визначається похилою дальністю r , кутом місця ε та залежить від величини рефракційної похибки вимірювання кута місця АО $\Delta \varepsilon_p$ за виразом:

$$\Delta h_{ref} = r \cdot \Delta \varepsilon_{ref} \cdot \cos \varepsilon. \quad (5)$$

Рефракційна похибка $\Delta \varepsilon_{ref}$ визначається викривленням променя та залежить від градієнта коефіцієнта заломлення у напрямку поширення радіохвилі в атмосфері за (3).

Другий шлях – передбачає проведення статистичної оптимізації алгоритмів просторової обробки радіолокаційного сигналу для врахування в них корельованих флуктуацій його фази, які, у свою чергу, обумовлені флуктуаціями величин n і n' у тропосфері.

Нижче проведено порівняльний аналіз вказаних шляхів врахування впливу тропосфери при вимірюванні кутових координат та висоти АО.

Перший шлях – базується на припущеннях про те, що градієнт коефіцієнта заломлення змінюється тільки з висотою і для кожної точки над земною поверхнею в межах зони виявлення РЛС закон його зміни є однаковим [19]. Окрім цього, вважається, що реальні закони зміни $n(h)$ і $n'(h)$ можна апроксимувати детермінованими функціями та використовувати зручні моделі закону зміни даних величин.

Значення коефіцієнта заломлення n в атмосфері лише на десятитисячні долі перебільшує одиницю [12]. Тому, на практиці використовують індекс заломлення N і його градієнт N' , які визначаються як

$$N = (n - 1) \cdot 10^6; \quad N' = n' \cdot 10^6. \quad (6)$$

Далі, доцільно розглянути найбільш зручні для користування моделі закону зміни $N(h)$ та $N'(h)$.

Найпростішою моделлю зміни індексу заломлення з висотою є лінійна модель [12]:

$$N(h) = N_o + N'_o \cdot h, \quad (7)$$

де N_o і N'_o – індекс заломлення та його градієнт на поверхні Землі.

Модель (7) використовується переважно для нижніх шарів тропосфери, де, за умови її однорідності, градієнт індексу заломлення можна вважати постійним. Недоліком цієї моделі можна вважати те, що вона не враховує поточні зміни градієнта індексу заломлення в точці стояння радіолокатора та його висотні зміни. Вказане обумовлює появу похибок у вимірюванні кутових координат і висоти АО.

Більш поширеною моделлю закону зміни індексу заломлення є поліноміальна модель, згідно з якою градієнт змінюється за законом [12]:

$$N'(h) = N'_o \frac{50 - h}{50}. \quad (8)$$

За даною моделлю, на поверхні Землі градієнт індексу заломлення має значення N'_o , а на висотах більше 50 км він дорівнює 0.

Недоліком поліноміальної моделі закону зміни індексу заломлення є відсутність, при її використанні, врахування поточних значень градієнта індексу заломлення по траєкторії поширення радіохвилі. Спроби врахування даних поточних значень були вжиті у радіолокаційних висотомірах але тільки у точці їх стояння.

Обчислення поточного значення градієнта індексу заломлення N' у точці стояння РЛС здійснюється через врахування еквівалентної приведенної температури атмосфери T_{en} у точці стояння РЛС [12]:

$$N'_o(T_{en}) = N'_o(0,8 + k \cdot T_{en}), \quad (9)$$

де $N'_o = -4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$ – градієнт індексу заломлення для "стандартної" атмосфери; $k = -0,67 \cdot 10^{-2} \text{ град}^{-1}$ – нормуючий коефіцієнт.

Еквівалентна приведена температура T_{en} визначається тиском, вологістю та температурою атмосфери. У приземних шарах атмосфери:

$$0^\circ \leq T_{en} \leq 60^\circ,$$

а для "стандартної" атмосфери: $T_{en} = -30^\circ$.

Як доведено у [12], введення поняття "еквівалентної приведенної температури" та врахування, таким чином, поточного стану атмосфери при вимірюванні висоти АО не відповідає реальному стану тропосфери та не є доцільним для розрахунку рефракційних поправок. При цьому, різка зміна градієнта індексу заломлення характерна переважно для радіолокаційного спостереження АО, що рухаються на малих та гранично малих висотах (1...1,5 км).

Згідно [12], промінь реально піддається найбільшому викривленню лише на 10 % траєкторії, а

віднесення цього викривлення до всієї траєкторії призводить тільки до зростання похибок вимірювання висоти АО у порівнянні з випадком орієнтування на "стандартну" атмосферу.

У випадку неможливості практичного отримання висотного профілю градієнта індексу заломлення, доцільно користуватися статистичними характеристиками висотного профілю градієнта індексу заломлення, як функціями висоти.

Таким чином, до висоти 50 км користування поточними значеннями градієнта індексу заломлення у точці стояння РЛС з лінійним характером його зміни є недоцільним. Кращі результати дають користування поліноміальною моделлю або усередненим законом зміни градієнта індексу заломлення по висоті для різних пір року та різних часів доби за даними метеоспостережень у районі розгортання РЛС. Тобто, точність поправки на рефракцію при обчисленні висоти АО залежить від якості визначення закону зміни градієнта індексу заломлення на шляху поширення електромагнітних хвиль. Умовою забезпечення вказаного визначення є наявність густої мережі метеостанцій для здійснення зондування стану атмосфери, реалізація якої є проблематичною. Тому, у більшості радіолокаторів при визначенні висоти АО можливе використання або лінійної або поліноміальної моделей зміни індексу заломлення з висотою за умови стандартної атмосфери у точці стояння РЛС.

Другий шлях – базується на припущенні про нормальний закон розподілу фазових флуктуацій прийнятого радіолокатором радіосигналу, який пройшов неоднорідну тропосферу [5]. Тобто, точність вимірювання кутових координат і, як слід, розрахунку висоти АО залежить від якості визначення закону зміни кореляції фазових флуктуацій радіолокаційного сигналу. Вказане обумовлює необхідність визначення можливостей підвищення точності вимірювання кутових координат та висоти АО за рахунок статистичної оптимізації алгоритму просторової обробки шляхом врахування кореляційних властивостей прийнятого радіосигналу.

У [5, 9, 18] показано, що найбільш перспективними, з точки зору ефективності виконання завдань за призначенням, є радіолокатори з антенами типу ФАР. При цьому, як доведено у [9], флуктуаційні горизонтальне та вертикальне просторове відхилення у радіолокаторах з ФАР, завдяки впливу тропосферної рефракції, можуть зростати до сотень метрів.

Тому, нижче наведені результати оцінювання можливостей статистичної оптимізації кутових координат і висоти АО – є логічним продовженням досліджень, які проведені у [9].

В багатьох сучасних радіолокаторах з ФАР визначення кутових координат АО здійснюється фазовим методом [5, 18], згідно з яким кут місця визначається за виразом:

$$\varepsilon = \arcsin \frac{\varphi_k \lambda}{2\pi(k-1)d}, \quad (10)$$

де φ_k – фазовий зсув між k -м і першим елементом ФАР; λ – довжина хвилі радіолокатора; d – крок

антенної решітки. Шлях статистичної оптимізації алгоритмів просторової обробки при багатоканальному прийомі радіолокаційного сигналу з врахуванням корельованих фазових флуктуацій передбачає оцінювання кута приходу хвилі за алгоритмом [13]:

$$\varepsilon = \arcsin \frac{\lambda}{2\pi d} \sum_{k=1}^m g_k \Delta\Phi_k, \quad (11)$$

де $\Delta\Phi_k = \Phi_{m+1-k} - \Phi_{m+k}$ – значення різниці фаз сигналів k -ї симетричної пари каналів антенної решітки (номер пари відраховується від 1 у центрі ФАР до m на її краях); m – число пар симетричних каналів ФАР; g_k – вагові коефіцієнти, які враховують сумісний вплив фазових флуктуацій і адитивних шумових коливань.

Вагові коефіцієнти g_k залежать від відстані між симетричними елементами ФАР, амплітудного розподілу та статистичних характеристик фазових флуктуацій – дисперсії (σ_φ^2) та коефіцієнта кореляції у сусідніх елементах ФАР (a).

При переважному впливі фазових флуктуацій над впливом внутрішніх шумів приймача, порядок обчислення даних вагових коефіцієнтів наведено у [20]. Оскільки неоднорідності тропосфери можна вважати статистично незалежними, то, за центральною граничною теоремою, флуктуації фази мають нормальний закон розподілу [5].

Оптимальне вимірювання кутової координати АО (11), дозволяє підвищити точність оцінювання висоти, згідно (1). Представляє практичну користь порівняння флуктуаційної складової СКП оптимального вимірювання кутової координати за умовою врахування фазових флуктуацій сигналу $\sigma_{\varepsilon_{onm}}^2$ [14] при оцінюванні кутової координати АО за (11), з СКП флуктуаційної складової похибки вимірювання кутової координати АО без врахування вказаних флуктуацій $\sigma_{\varepsilon_{fl}}^2$ [7] при оцінюванні кутової координати АО за (10). Даний чисельний аналіз доцільно провести для різних законів зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій. Дисперсія $\sigma_{\varepsilon_{onm}}^2$ при $m \geq 2$ визначається за виразом [14]:

$$\sigma_{\varepsilon_{onm}}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{\pi d \cos \varepsilon} \right)^2 \frac{\sigma_\varphi^2 (1+a)}{1-a} \times \left\{ \sum_{k=1}^{m-1} (2k-1)^2 + \frac{(2m-1)[2m-1-(2m-3)a]}{(1-a)^2} \right\}^{-1}. \quad (12)$$

Першим варіантом розгляду опису коефіцієнта міжканальної кореляції фазових флуктуацій – є експонентна залежність:

$$a = e^{-d/\rho}, \quad (13)$$

де ρ – просторовий радіус кореляції фазових флуктуацій.

Для випадку (13), дисперсія $\sigma_{\varepsilon_{fl.E}}^2$ визначається за виразом [7]:

$$\sigma_{\theta_{\text{фл.Е}}}^2 = 9\sigma_{\varphi}^2 \lambda^2 / \left(2\pi^2 d^2 m^2 (4m^2 - 1)^2 \right) \times \left(\sum_{j=1}^m \left((2j-1)^2 (1 - \exp(-d(2j-1)/\rho)) \right) \right) 2 \sum_{l=1}^{m-j} \exp(-dl/\rho) + \sum_{j=1}^{m-1} (2j-1)(2j+2l-1) (1 - \exp(-d(2j-1)/\rho)) \quad (14)$$

Як доведено у [5], для радіолокаторів з ФАР, найбільший вплив тропосферних неоднорідностей спостерігається для сантиметрових і більш коротких хвиль.

Користуючись методикою розрахунку статистичних характеристик фазових флуктуацій, викладеної у [5] та застосованої у [7], розрахунок дисперсії та радіусу кореляції фазових флуктуацій доцільно провести для наступних вхідних даних:

$$m=25; \lambda = 0,1 \text{ м}; d = \lambda/2; h_a = 10 \text{ м}.$$

Вказані статистичні характеристики фазових флуктуацій при зовнішньому масштабі турбулентності тропосфери 1 км та різному шляху хвилі у тропосфері (z) приймають наступні значення:

- 1) z=50 км, $\sigma_{\varphi}^2 = 4,3 \text{ рад}^2$, $\rho = 226,9 \text{ м}$;
- 2) z=100 км, $\sigma_{\varphi}^2 = 8,5 \text{ рад}^2$, $\rho = 149,7 \text{ м}$;
- 3) z=150 км, $\sigma_{\varphi}^2 = 12,8 \text{ рад}^2$, $\rho = 117,4 \text{ м}$;
- 4) z=200 км, $\sigma_{\varphi}^2 = 17 \text{ рад}^2$, $\rho = 98,8 \text{ м}$.

Отримані значення статистичних характеристик узгоджуються з результатами оцінювання, які наведені у [21].

У табл. 1 надано значення СКП вимірювання кутової координати АО з врахуванням корельованих фазових флуктуацій $\sigma_{\varepsilon_{\text{онт.Е}}}$, які розраховано згідно (12) для наведених вище даних, експонентного закону зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій (13), за умов орієнтації діаграми спрямованості антени по нормалі до її апертури.

У табл. 1 також наведено відповідні значення флуктуаційної складової СКП вимірювання кутової координати АО без врахування корельованих фазових флуктуацій $\sigma_{\varepsilon_{\text{фл.Е}}}$, які розраховано за (14).

$$\sigma_{\varepsilon_{\text{фл.О}}}^2 = \frac{9\sigma_{\varphi}^2 \lambda^2}{2\pi^2 d^2 m^2 (4m^2 - 1)^2} \cdot \left(\sum_{j=1}^m (2j-1)^2 (1 - \exp(-d \cdot (2j-1)/\rho_{\varphi})) \cdot \cos((2j-1)\gamma d) + \right. \\ \left. + 2 \cdot \sum_{l=1}^{m-j} \exp(-d \cdot l/\rho_{\varphi}) \cdot \sum_{j=1}^{m-1} (2j-1) \cdot (2j+2l-1) \cdot (\cos(j\gamma d) - \exp(-d \cdot (2j-1)/\rho_{\varphi})) \cdot \cos((2j+l-1) \cdot \gamma d) \right) \quad (16)$$

Відповідні значення СКП вимірювання кутової координати та висоти АО з врахуванням фазових флуктуацій та без такого врахування для випадку коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій (15) наведено у табл. 2.

Третім варіантом опису коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій розглядаємо наступну Гаусову залежність:

$$a = e^{-(d/\rho)^2} \quad (17)$$

Для випадку (17), дисперсія $\sigma_{\varepsilon_{\text{фл.Г}}}^2$ відповідно до [6] визначається за таким виразом:

Таблиця 1 – Значення СКП вимірювання кутової координати АО з врахуванням корельованих фазових флуктуацій

z, км	50	100	150	200
$\sigma_{\varepsilon_{\text{онт.Е}}}$, рад.	0,113°	0,196°	0,271°	0,34°
$\sigma_{\varepsilon_{\text{фл.Е}}}$, рад.	0,123°	0,212°	0,294°	0,369°
$\sigma_{\text{нонт.Е}}$, м	255	939	2042	3549
$\sigma_{\text{нфл.Е}}$, м.	264	968	2103	3650

Представляє практичну користь поширити результати наведеної статистичної оптимізації на вимірювання висоти АО за (1).

Тому, відповідні значення флуктуаційних СКП вимірювання висоти АО, як з врахуванням $\sigma_{\text{нонт.Е}}$, так і без врахуванням фазових флуктуацій $\sigma_{\text{нфл.Е}}$ також надано у табл. 1.

Другим варіантом опису зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій – є осцилююча залежність, що експериментально підтверджено стосовно РЛС 35Д6 приморського базування [11], яка має наступний вигляд:

$$K_{\varphi}(d) = e^{-d/\rho} \cos(\gamma d), \quad (15)$$

де $\gamma = 2\pi/T_{\text{фл}}$ – частота осциляцій коефіцієнта кореляції фази; $T_{\text{фл}}$ – період осциляцій коефіцієнта кореляції фази.

Для випадку (15), відповідна дисперсія $\sigma_{\varepsilon_{\text{фл.О}}}^2$ може бути отримана з [6], де вказане завдання вирішувалося стосовно оптимізації частотної обробки радіолокаційного сигналу, та, у свою чергу, має такий вигляд:

Таблиця 2 – Значення СКП вимірювання кутової координати та висоти АО з врахуванням фазових флуктуацій

z, км.	50	100	150	200
$\sigma_{\varepsilon_{\text{онт.О}}}$, рад.	0,113°	0,196°	0,271°	0,34°
$\sigma_{\varepsilon_{\text{фл.О}}}$, рад.	0,125°	0,219°	0,305°	0,385°
$\sigma_{\text{нонт.О}}$, м	255	939	2043	3550
$\sigma_{\text{нфл.О}}$, м.	266	979	2132	3707

$$\sigma_{\theta_{\text{фл.Е}}}^2 = \frac{9\sigma_{\varphi}^2 \lambda^2}{2\pi^2 d^2 m^2 (4m^2 - 1)^2} \cdot \left(\sum_{j=1}^m (2j-1)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{d}{\rho} (2j-1)^2\right) \right) + \right. \\ \left. + 2 \sum_{l=1}^{m-j} \exp(-d \cdot l / \rho)^2 \cdot \sum_{j=1}^{m-1} (2j-1) \cdot (2j+2l-1) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{d}{\rho} (2j-1) \cdot (2j+2l-1)\right) \right) \right) \quad (18)$$

Відповідні до випадку (18) значення СКП вимірювання кутової координати та висоти АО наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Значення СКП вимірювання кутової координати та висоти АО з врахуванням Гаусової залежності

z, км.	50	100	150	200
$\sigma_{\text{еонт.О}}$, рад.	0,0017°	0,0036°	0,0056°	0,0077°
$\sigma_{\text{эфл.О}}$, рад.	0,012°	0,025°	0,039°	0,054°
$\sigma_{\text{хонт.О}}$, м	158	604	1348	2390
$\sigma_{\text{хфл.О}}$, м.	167	642	1436	2551

З отриманих результатів можливо заключити, що для вказаних умов, підвищення точності вимірювання кута місця та висоти АО за рахунок статистичної оптимізації просторової обробки радіолокаційного сигналу за наявності корельованих фазових флуктуацій, обумовлених впливом неоднорідностей тропосфери, складає 3 % для експонентного, 4 % для осцилюючого та 6 % для Гаусового законів зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій. При зменшенні довжини хвилі радіолокатору дане підвищення може бути більш суттєвим. Так, при оцінюванні, згідно наведеної методики, для $\lambda = 0,05$ м воно може складати відповідно – від 3 до 27 % для наведених вище законів зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій.

Висновки

1. Можна визначити два основних шляхи врахування впливу тропосфери на якість просторових вимірювань. Перший – полягає у розрахунку поправок

на рефракцію на основі даних про метеорологічні параметри тропосфери. Другий – базується на проведенні статистичної оптимізації алгоритмів просторової обробки за рахунок врахування флуктуаційних явищ при поширенні радіолокаційного сигналу крізь тропосферні неоднорідності.

2. Величина поправки на рефракцію визначається похилою дальністю, кутом місця та залежить від градієнта коефіцієнта заломлення у напрямку поширення радіохвилі в тропосфері. Точність поправки на рефракцію при обчисленні висоти АО залежить від якості визначення закону зміни градієнта індексу заломлення на шляху поширення електромагнітних хвиль. Тому умовою визначення вказаної поправки є застосування густої мережі метеостанцій для оперативного зондування стану атмосфери.

3. Статистична оптимізація алгоритмів просторової обробки радіолокаційного сигналу вимагає визначення закону зміни кореляції фазових флуктуацій радіолокаційного сигналу. У радіолокаторах з ФАР оптимальне визначення кутових координат АО може бути реалізоване шляхом вагового сумування різниць фаз сигналів, прийнятих симетричними парами каналів антенної решітки. При цьому, відповідні вагові коефіцієнти визначаються дисперсією та коефіцієнтом кореляції фазових флуктуацій у сусідніх елементах ФАР.

4. Підвищення точності вимірювання кута місця та висоти АО за рахунок проведення статистичної оптимізації просторової обробки радіолокаційного сигналу може складати від одиниць до десятків відсотків у залежності від виду закону зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій у сантиметровому діапазоні довжин хвиль і є тим більшим, чим меншою є довжина хвилі радіолокатору.

Список літератури

1. Флюктуационные процессы при распространении радиоволн / М.П. Долуханов – М: Связь, 1971. – 183 с.
2. Карлов В. Д., Петрушенко Н. Н., Челпанов В. В., Квиткин К. П. Влияние среды распространения радиоволн на приморском направлении при измерении угловых координат радиолокационных целей. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2010. № 3(25). С. 51-53.
3. Использование радиочастотного спектра в метеорологии: прогнозирование и мониторинг погоды, климата и качества воды. Справочник. WMO, 2008. 120 с.
4. Климченко В. Й., Камалтинов Г. Г., Місайлов В. Л. Аналіз потенційних можливостей оглядових РЛС сантиметрового діапазону хвиль щодо забезпечення дій авіації Повітряних Сил України метеорологічною інформацією. *Системи озброєння і військова техніка*. 2011. № 1(25). С. 21–27.
5. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория / Под. ред. Я. Д. Ширмана. М.: ЗМАКВИС, 1998. 828 с.
6. Минервин Н. Н., Кузнецов А. Л., Минервин Н. Н. Ошибки измерения радиальной скорости и радиального ускорения цели, обусловленные неучетом флуктуаций фаз импульсов пачки. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2001. № 22. С. 288-294.
7. Kuznietsov O., Kovalchuk V., Kovalchuk A., Karlov D., Yarovyuy S., Vasylyshyn V. (2020). Providing the Required Accuracy of Measurements of Spatial Coordinates of Aerial Objects. *2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS), Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Kharkiv, Ukraine, September 21-25 – Proceedings*, 2020, p. 226-229.
8. Кузнецов О. Л., Танцюра О. Б., Мельник О. Л. Обмеження якості просторових вимірювань в РЛС з фазованою антенною решіткою внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей та земної поверхні. *Системи управління навігації та зв'язку*. 2012. № 1(21). Том 2. С. 49-52.

9. Карлов В. Д., Кузнецов О. Л., Белоусов В. В., Тузіков С. А., Олещук М. М., Петрушенко В. М. Точність вимірювання кутових координат аеродинамічних об'єктів в умовах тропосферної рефракції. *Системи управління, навігації та зв'язку: зб. нах. пр. Полтавського національного технічного університету*. 2021. № 1(63). С. 146-152.
10. Карлов В. Д., Кучер Д. Б., Струцинський О. В., Лукашук О. В. До питання про вимірювання дальності маловисотної цілі при її радіолокації в межах тропосферного хвилеводу над морем. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 3(24). С. 98-101.
11. Карлов В. Д., Родюков А. О., Пічугін І. М. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції. *Наука і техніка ПС Збройних Сил України*. 2015. № 4(21). С. 71-74.
12. Климченко В. Й., Камалтинов Г. Г., Місайлов В. Л., Рибалка Г. В. Вимірювання висоти польоту цілей в радіолокаторах контролю повітряного простору з урахуванням поточного стану тропосферної рефракції. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2019. № 3(61). С. 86-95.
13. Минервин Н. Н. Васюта К. С. Оптимальное оценивание угла прихода волны при наличии случайных искажений ее фронта и аддитивных помех. *Радиотехника*. 1998. № 105. С. 61-68.
14. Минервин Н. Н. Васюта К. С. Мера угловой разрешающей способности и точность измерения угла прихода волны при наличии случайных искажений ее фронта и аддитивного шума. *Прикладная радиоэлектроника*. 2013. № 12(4). С. 484-486.
15. Озброєння радіотехнічних підрозділів і частин ППО. Пересувний радіовисотомір ПРВ-13МЗР. Навчальний посібник / С. П. Володько, В. Д. Говоров, В. І. Зверев та ін. Х.:ХВУ, 2002. 142 с.
16. Подвижный радиовысотомер ПРВ-16. Учебное пособие / Г. В.Индус, А. А. Ваганов, В. П.Козлов и др. М.: Воениздат, 1979. 224 с.
17. Радиолокационная станция 36Д6М. Эксплуатация и техническое обслуживание РЛС 36Д6М. Учебное пособие / И. Я. Май, А. Г. Каспирович, В. А. Винник и др. Запорожье, КЭМЗ "Искра", 2006. 140 с.
18. Сєдшишев Ю. М., Карпенко В. І., Атаманський Д. В. та ін. Радіоелектронні системи. Х.: ХУПС, 2010. 418 с.
19. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. Изд. 2-е, дополненное и переработанное. М.: Соврадио, 1972. 464 с.
20. Минервин Н. Н. Васюта К. С. Особенности компенсации помеховой волны при флуктуациях ее фазового фронта. *Прикладная радиоэлектроника*. 2013. № 12(4). С. 493-495.
21. Вопросы статистической теории антенн / Я. С. Шифрин. М.: Сов. радио, 1970. 383 с.
22. Минервин Н. Н., Кузнецов А. Л. Оптимальные алгоритмы измерения радиальной скорости цели и угла прихода принимаемого радиосигнала с учетом фазовых флуктуаций, описываемых произвольной корреляционной функцией. *Прикладная радиоэлектроника*. 2013. № 12(4). С. 514-517.
23. Yevseiev S., Kuznietsov O., Herasimov S. et al. Development of an optimization method for measuring the doppler frequency of a packet taking into account the fluctuations of the initial phases of its radio pulses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 2/9 (110). P. 6-15.
24. Кузнецов О. Л., Коломійцев О. В., Кітов В. С., Карлов А. Д. Оцінювання точності поточного вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкту в когерентно-імпульсній РЛС супроводження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2020. № 3(40). С. 91-99. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.40.10>.
25. Кузнецов, О., Коломійцев, О., Яровий, С., Олійник, Р., & Живець, Ю. (2021). Підвищення точності вимірювання кутових координат повітряних об'єктів при багатоканальному прийомі радіолокаційного сигналу. *Наукові праці Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, (9), 65-72. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.9.2021.09>.

Received (Надійшла) 13.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.08.2022

Possibilities of accounting for the influence of the troposphere when measuring the angular coordinates and height of aerodynamic object

Volodymyr Karlov, Oleksandr Kuznietsov, Oleksii Kolomiitsev, Igor Krasnoshapka, Ivan Petrusenko, Oleh Strutsynskiy

Abstract. Finding ways to improve the quality of spatial processing of a radar signal under the influence of tropospheric inhomogeneities is an urgent task, which is aimed at improving the efficiency of using radar technology for its intended purpose. The article defines two ways to take into account the influence of the troposphere when measuring the angular coordinates and height of an aerodynamic object. The first way provides for the operational determination of the law of change in the gradient of the refractive index and the calculation of the corresponding corrections for refraction. The most convenient models for the law of refractive index change with height are considered and the features of their application are analyzed. The second way is connected with taking into account the correlated phase fluctuations of the radar signal in the algorithm of its spatial processing. The features of this accounting in relation to radars with a phased antenna array (PAR) are given. Due to the statistical independence of the inhomogeneities of the troposphere, by virtue of the central limit theorem of probability theory, the law of distribution of phase fluctuations is considered normal. A comparative analysis of these ways of taking into account the influence of the troposphere when measuring the angular coordinates and height of an aerodynamic object is carried out. The fluctuation components of the root-mean-square errors (RMS) of the optimal measurement of the angular coordinate and height are compared, provided that phase fluctuations are taken into account with the corresponding RMS of the fluctuation components of the errors in the measurement of the angular coordinate and height, without taking into account these fluctuations, for the cases of describing the interchannel correlation of phase fluctuations of exponential, oscillating, and Gaussian dependencies. From a practical point of view, the results obtained make it possible to evaluate the feasibility of using the optimal algorithm for measuring the elevation angle and height of an aerodynamic object in radars with phased array for specific conditions of the influence of tropospheric inhomogeneities.

Keywords: aerodynamic object, height, refractive index gradient, meteorological parameters, radar signal, root-mean-square error, statistical optimization, measurement accuracy, troposphere, elevation angle, phased antenna array, phase fluctuations.