

В. Д. Карлов¹, О. Л. Кузнецов¹, В. В. Белоусов¹, С. А. Тузіков¹, М. М. Олещук², В. М. Петрушенко³

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

² Військова частина А 2533, Дніпро

³ Військова частина А 2183, Миколаїв

ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ КУТОВИХ КООРДИНАТ АЕРОДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ В УМОВАХ ТРОПОСФЕРНОЇ РЕФРАКЦІЇ

Анотація. Трикоординатні радіолокатори є найбільш універсальними з технічної точки зору засобами визначення просторового положення аеродинамічних об'єктів та забезпечення їх подальшого супроводження. При цьому їх функціонування часто здійснюється у складних метеорологічних умовах, зокрема в умовах тропосферної рефракції. Вимірювання куткових координат існуючими трикоординатними радіолокаторами здійснюється в основному без врахування динаміки зміни поточного стану тропосфери Землі, тому стаття присвячена дослідженню впливу даного фактору на точність вимірювання куткових координат повітряних об'єктів. У статті проведено чисельний аналіз можливого зниження якості просторових вимірювань, які здійснюють трикоординатні радіолокатори, в залежності від ступеня викривлення фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу внаслідок впливу тропосферної рефракції. Для вирішення завдання оцінювання можливих значень статистичних характеристик флуктуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу використані методи математичної статистики та теорії ймовірностей. Результатами статті є методика чисельного аналізу впливу даних статистичних характеристик на точність вимірювання куткових координат з визначенням відповідних середньоквадратичних помилок вимірювання стосовно трикоординатних оглядових радіолокаторів та радіолокаторів супроводження. Отримані результати можуть бути в подальшому використані при оцінюванні можливостей трикоординатних радіолокаторів щодо виявлення та супроводження аеродинамічних об'єктів у складних метеорологічних умовах, зокрема в умовах надрефракції при радіолокаційному спостереженні на приморських напрямках.

Ключові слова: висота, градієнт коефіцієнта заломлення, кутові координати, радіолокаційне спостереження, рефракція, середньоквадратична помилка, точність вимірювання, тропосфера, трикоординатні радіолокатори, флуктуації фазового фронту.

Вступ

Постановка проблеми. Оновлення парку радіолокаційних станцій пов'язано з введенням в експлуатацію мобільних, цифрових та переважно трикоординатних радіолокаторів. Розвиток елементної бази та технологій побудови антенних систем обумовили широке використання в сучасних радіолокаторах цифрових фазованих антенних решіток (ФАР).

Трикоординатні радіолокатори окрім вимірювання похилої дальності та азимуту повинні забезпечувати вимірювання кута місця для подальшого розрахунку висоти аеродинамічного об'єкта. Двокоординатні радіолокатори для виконання цього завдання мають працювати узгоджено з радіовисотомірами.

При цьому, як для трикоординатних радіолокаторів так й для радіолокаційних висотомірів забезпечення високої точності вимірювання кута місця й висоти невід'ємно пов'язано з необхідністю врахування поточного стану атмосфери. Актуальність даного питання зростає ще більше, якщо локація аеродинамічних об'єктів здійснюється в умовах тропосферної рефракції за межами радіогоризонту, оскільки в даних умовах флуктуаційні явища при поширенні радіолокаційного сигналу стають найбільш суттєвими.

Тропосферні неоднорідності шарового та турбулентного типів є причиною виникнення флуктуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу, що здатні призводити до значного зниження його просторової когерентності. Найбільш суттєво

вказаний фактор здатний вплинути на якість просторових вимірювань в радіолокаторах з ФАР, у яких реалізовано фазовий метод вимірювання куткових координат.

Таким чином, оцінювання точності вимірювання куткових координат у трикоординатних радіолокаторах в умовах тропосферної рефракції дозволить зробити висновок про доцільність врахування флуктуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу при його просторовій обробці. Особливої важливості вказаний висновок має для багатофункціональних радіолокаторів слідкувального типу, що повинні здійснювати траєкторні вимірювання з високою точністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Постійно зростаючи вимоги до точності вимірювання поточних координат аеродинамічних об'єктів обумовлюють необхідність дослідження впливу на неї поточного стану атмосфери. Метеорологічним питанням, що стосуються стану атмосфери та особливостям радіолокації в цих умовах присвячені роботи [1-4].

Розвиток сучасної радіолокаційної техніки неможливий без ретельного оцінювання зовнішніх впливів зокрема стану атмосфери, на якість обробки радіолокаційної інформації.

В роботі [5] наведено математичний апарат, що дозволяє здійснювати оцінювання статистичних характеристик флуктуацій фазового фронту радіолокаційного сигналу, які обумовлені наявністю тропосферних та іоносферних неоднорідностей земної атмосфери. При цьому механізм виникнення вказаних флуктуацій детально викладений у [6].

Особливості просторових вимірювань при виконанні радіолокатором завдань за призначенням в умовах локації над поверхнею моря розглядалися у [7]. Встановлено, що морська поверхня є джерелом процесів у тропосфері, які призводять до флуктуацій фазового фронту радіохвиль, що поширюються крізь тропосферні неоднорідності. При цьому статистичні характеристики даних флуктуацій є експериментально підтвердженими у [8].

Доцільним є продовження досліджень пов'язаних з впливом поточного стану тропосфери на точність вимірювання кутових координат аеродинамічних об'єктів з визначенням доцільних напрямків подальшої оптимізації просторових вимірювань в сучасних трикоординатних радіолокаторах.

Метою статті є проведення чисельного аналізу можливого зниження якості просторових вимірювань, які здійснюють трикоординатні радіолокатори, в залежності від ступеня викривлення фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу внаслідок впливу тропосферної рефракції.

Виклад основного матеріалу

Головною перевагою трикоординатних радіолокаторів оглядового типу є можливість визначення висоти аеродинамічного об'єкта по виміряним в процесі первинної обробки радіолокаційної інформації похилої дальності та куту місця. Кут місця аеродинамічного об'єкта можна визначити шляхом:

– секторного сканування дзеркальною антеною у кутомісцевій площині (реалізовано у рухомих радіовисотомірах (РРВ), наприклад у таких, як РРВ-13 та РРВ-16 [9, 10]);

– кругового сканування дзеркальною антеною у азимутальній площині віялоподібною діаграмою спрямованості (реалізовано у радіолокаторах, антени яких мають куточастотну чутливість, наприклад 19Ж6, 35Д6 та їх модифікації 36Д6М [11]);

– кругового сканування ФАР у азимутальній площині з визначенням кута місця фазовим методом (реалізовано у оглядових радіолокаторах з ФАР та радіолокаторах підсвіту та наведення зенітних ракетних комплексів, що здійснюють супроводження аеродинамічних об'єктів).

Слід зауважити, що рухомі радіовисотоміри можна вважати трикоординатними радіолокаторами, однак в практичних випадках виконання завдань за призначенням вони потребують інформації про очікуваний азимут об'єкта радіолокаційного спостереження від інших засобів.

Радіолокатори, які оснащені антенами з куточастотною чутливістю є трикоординатними, але внаслідок конструктивних особливостей, кількість створюваних променів діаграми спрямованості в кутомісцевій площині та відповідних каналів часо-частотної обробки радіолокаційного сигналу є обмеженою. Внаслідок цього, обмеженою є точність вимірювання кута місця. Тобто визначення кута місця і висоти аеродинамічного об'єкта в таких радіолокаторах є достатньо грубою.

Перспективним шляхом забезпечення високої точності вимірювання вказаних координат є застосу-

вання в радіолокаторах ФАР з реалізацією багатоканальної просторової обробки радіолокаційного сигналу [12]. Сучасний розвиток цифрових ФАР, застосування адаптивних алгоритмів цифрової обробки сигналів та поступове зниження вартості технічної реалізації даних рішень вказують на те, що розробка та модернізація саме таких радіолокаторів є пріоритетним напрямком покращення точності вимірювання просторових координат аеродинамічних об'єктів.

При застосуванні ФАР в оглядових радіолокаторах визначення кута місця, а в слідкувальних радіолокаторах визначення двох просторових координат, найчастіше за все забезпечується шляхом застосування фазового методу. Згідно даного методу здійснюється вимірювання кутів нахилу фазового фронту відбитого радіолокаційного сигналу відносно апертури приймальної антени. При цьому, кутова координата визначається за різницею фаз коливань сусідніх приймальних каналів (елементів ФАР) [5, 12].

Оскільки в оглядових радіолокаторах з ФАР азимут найчастіше визначається амплітудним методом, а радіолокатори супроводження отримують попередню оцінку азимуту у вигляді цілєвказівки, питання оцінювання якості просторових вимірювань є актуальними насамперед стосовно визначення кута місця та оцінювання висоти аеродинамічного об'єкта. Кут місця аеродинамічного об'єкта відносно нормалі до апертури приймальної антени визначається за таким співвідношенням [12]

$$\varepsilon = \arcsin(\varphi_k \lambda / (2\pi(k-1)d)), \quad (1)$$

де φ_k – фазовий зсув між k -м і першим елементом ФАР; λ – довжина хвилі радіолокатору; d – крок антенної решітки.

За виміряним значенням кута місця може бути визначена висота аеродинамічного об'єкта з урахуванням кривизни Землі та без урахування тропосферної рефракції за формулою, якою найчастіше користуються на практиці

$$H = r \sin \varepsilon + r^2 / (2R_{ze}) + h_a, \quad (2)$$

де r – похила дальність аеродинамічного об'єкта; R_{ze} – еквівалентний радіус Землі; h_a – висота розташування радіолокатора над поверхнею, відносно якої здійснюється відлік висоти аеродинамічного об'єкта.

Можливості радіолокатору щодо спостереження аеродинамічних об'єктів, особливо тих що рухаються на малих і гранично малих висотах, значно покращуються, при використанні явища тропосферної рефракції радіохвиль. При цьому можливим є забезпечення спостереження об'єктів за межами дальності прямої видимості [13, 14].

В даному випадку вплив тропосферної рефракції призводить до виникнення додаткових рефракційних помилок вимірювання кута місця, які визначаються викривленням променя і залежать від градієнта коефіцієнта заломлення n в напрямку його поширення в атмосфері [15]

$$\text{grad}n = g_n = dn/dr = n'. \quad (3)$$

Якщо середовище поширення радіохвиль характеризується постійним градієнтом коефіцієнта заломлення в напрямку поширення сигналу радіолокатора ($\text{grad}n = \text{const}$), то викривлення променя може бути описано дугою з радіусом кривизни

$$\rho = 1/n', \quad (4)$$

де $n' = g_n$ – градієнт коефіцієнта заломлення.

При відхиленні траєкторії поширення радіохвилі від прямолінійної виникає рефракційна похибка $\Delta \varepsilon_p$, яка являє собою кутове відхилення та визначається виразом виду [15]:

$$\Delta \varepsilon_p = 0,5(r/2\rho) = 0,5 \cdot r \cdot n'.$$

Рефракційна похибка (5) обумовлює радіальне відхилення Δr_p , яке визначає радіальне зміщення точки спостереження, що знаходиться на відстані r від радіолокатора, внаслідок впливу тропосферної рефракції

$$\Delta r_p = r \cdot \Delta \varepsilon_p. \quad (6)$$

Теоретично, при постійному градієнті коефіцієнта заломлення рефракційні поправки $\Delta \varepsilon_p$ та Δr_p можна вважати детермінованими, які можна розрахувати для певної дальності польоту аеродинамічного об'єкта та врахувати в процесі визначення його просторового положення. Реально ж градієнт коефіцієнта заломлення в атмосфері залежить від шляху проходження радіохвилі та в кожній точці цього шляху має власне значення

$$n' = n'(s), \quad (7)$$

де s – поточне значення відстані від точки випромінювання до точки на шляху поширення радіохвилі.

Таким чином, в реальному випадку траєкторія променя являє собою криву зі складною формою (рис. 1) [15].

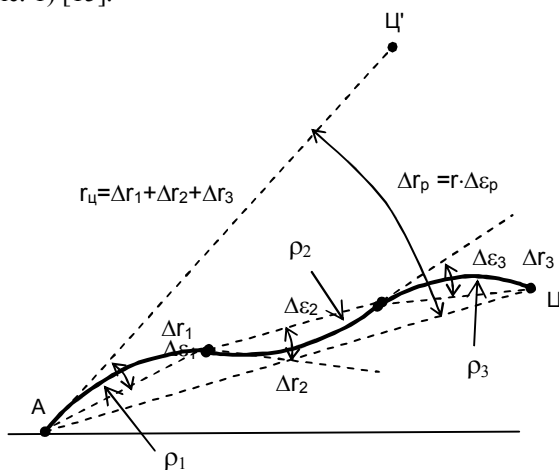


Рис. 1. До визначення рефракційної поправки при змінному градієнті коефіцієнта заломлення

З рис. 1 видно, що при змінному градієнті коефіцієнта заломлення для визначення рефракційної похибки $\Delta \varepsilon_p$ потрібно розбити траєкторію радіохвилі на окремі ділянки $\Delta \Gamma$, в межах яких градієнт

коефіцієнта заломлення можна вважати постійним ($n' = \text{const}$). На рис. 1 показано три таких ділянки. В такому випадку загальну рефракційну похибку $\Delta \varepsilon_p$ на траєкторії поширення радіохвилі буде визначитися як сума часткових рефракційних похибок за кожен ділянку. Очевидно, що точність обчислення відповідної рефракційної поправки буде напряму залежати від знання закону зміни $n'(s)$.

В дійсному, величини n і n' залежать від висоти над землею поверхнею та від достатньо нестабільного стану атмосфери (особливо у нижніх шарах) і в кожній точці на шляху поширення радіохвилі мають власні значення. Вказане свідчить про те, що залежності $n(s)$ та $n'(s)$ носять складний і значною мірою випадковий характер [15]. У тропосфері для частот, що не перевищують 20 ГГц, показник заломлення визначається виразом [6]:

$$n = 1 + \frac{77,6 \cdot 10^{-4}}{T} \left(P + \frac{4810 \rho_n}{T} \right), \quad (8)$$

де T – абсолютна температура в градусах Кельвіна; P – тиск атмосфери в мілібарах; ρ_n – абсолютна вологість повітря в мілібарах. Тобто, випадковий характер змін тиску, температури і вологості тропосфери є причиною виникнення флуктуацій показника її заломлення, що у свою чергу призводить до флуктуацій фази радіолокаційного сигналу.

Можна визначити два шляхи подолання проблеми випадковості коефіцієнта заломлення.

Перший шлях пов'язаний з необхідністю здійснення спеціального зондування атмосфери на шляху поширення радіохвилі з метою оперативного визначення закону зміни градієнта коефіцієнта заломлення $n'(s)$ і розрахунку відповідної рефракційної поправки. Практична реалізація даного рішення є складною та економічно недоцільною, оскільки потребує застосування достатньо густої мережі метеостанцій, що з певною періодичністю здійснюють вертикальне зондування атмосфери.

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

Розв'язання цього завдання є складним з точки зору теорії радіолокації та пов'язано із суттєвим ускладненням алгоритмів первинної обробки радіолокаційного сигналу. Вказане свідчить про необхідність оцінювання можливих помилок вимірювання кутових координат аеродинамічного об'єкта в умовах тропосферної рефракції, та розрахунку відповідних радіальних відхилень в горизонтальній та вертикальній площинах для радіолокаторів з ФАР. Даний аналіз дозволить визначити умови, за якими викладені вище шляхи врахування флуктуацій величин n і n' є виправданими.

Згідно експериментальних даних дослідження фазових флуктуацій, закон їх розподілу є близьким до нормального, а кореляційна функція апроксимуються експоненційною або осцилюючою залежнос-

тями [16-23]. Припущення відносно нормального закону розподілу фазових флуктуацій теоретично повністю узгоджується з центральною граничною теоремою теорії ймовірностей, оскільки число статистично незалежних неоднорідностей в області суттєвої для поширення радіохвиль є великим.

Дисперсія σ_φ^2 фазових флуктуацій обумовлених впливом неоднорідностей тропосфери, згідно [5], може бути розрахована за наступним виразом

$$\sigma_\varphi^2 = 0,1C_\varepsilon^2 k^2 z L_0^{5/3}, \quad (9)$$

де $C_\varepsilon^2 = 2 \sigma_\varepsilon^2 / L_0^{2/3}$ – структурна постійна; σ_ε^2 – дисперсія флуктуацій діелектричної проникності тропосфери; L_0 – зовнішній масштаб турбулентності тропосфери; $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; z – шлях хвилі в тропосфері.

Радіус кореляції фазових флуктуацій ρ_φ , згідно [5], визначається за виразом

$$\rho_\varphi = (11C_\varepsilon^2 z / \lambda^2)^{-3/5}. \quad (10)$$

Величина квадрата структурної постійної може бути обрана від $10^{-13} \text{ см}^{-2/3}$ в нижніх шарах до $10^{-18} \text{ см}^{-2/3}$ в верхніх шарах тропосфери [5] і практично не залежить від частоти.

На рис. 2 наведено графіки залежності дисперсії (9) від шляху хвилі у тропосфері для довжин хвиль $\lambda = 3 \text{ см}$ (графіки 1 і 3) та $\lambda = 10 \text{ см}$ (графіки 2 і 4), що є характерними значеннями для радіолокаторів супроводження та оглядового типу відповідно. Зовнішній масштаб неоднорідності L_0 обрано 1 км [5]. На рис. 3 надані графіки залежності радіусу кореляції фазових флуктуацій (10) від шляху хвилі у тропосфері для умов, аналогічних рис. 2.

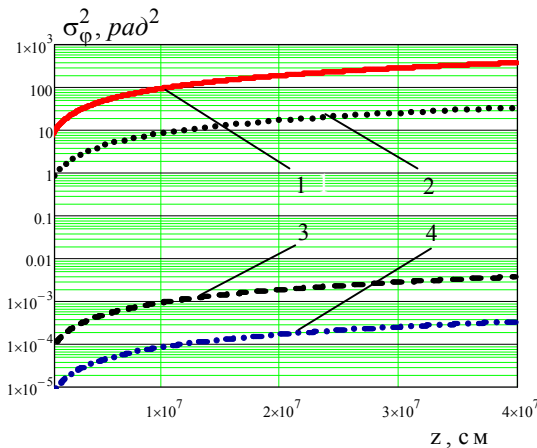


Рис. 2. Залежність дисперсії фазових флуктуацій від шляху хвилі у тропосфері

На рис. 2 і 3 графіки 1 і 2 відповідають величині квадрата структурної постійної $C_\varepsilon^2 = 10^{-13} \text{ см}^{-2/3}$, яка є характерною для нижніх шарів тропосфери, а графіки 3 і 4 відповідають $C_\varepsilon^2 = 10^{-18} \text{ см}^{-2/3}$ та характеризують вплив верхніх шарів тропосфери.

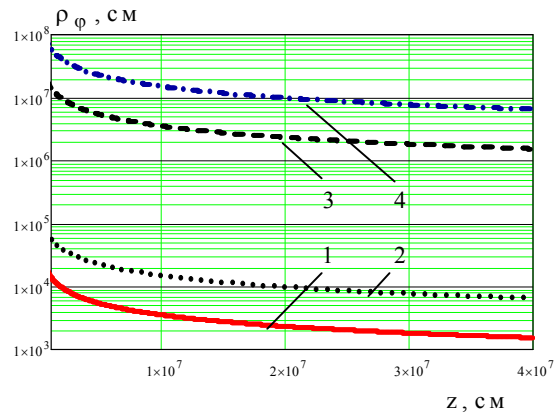


Рис. 3. Залежність радіусу кореляції фазових флуктуацій від шляху хвилі у тропосфері

На даних графіках величина σ_φ^2 визначається у рад^2 , а величини ρ_φ та z в см .

У радіолокаторів з ФАР з довжиною хвилі зондувального сигналу $\lambda = 3 \dots 5 \text{ см}$, що вирішують завдання супроводження, дальність виявлення аеродинамічних об'єктів може складати $100 \dots 200 \text{ км}$. Радіолокатори оглядового типу з ФАР, що працюють на довжині хвилі $\lambda = 10 \dots 12 \text{ см}$, здатні здійснювати радіолокаційне спостереження аеродинамічних об'єктів на дальностях до $350 \dots 400 \text{ км}$ [12, 24].

З урахуванням цього, область аналізу для радіолокаторів супроводження обмежується діапазоном значень шляху хвилі у тропосфері $z = 50 \dots 200 \text{ км}$, а для радіолокаторів оглядового типу – $z = 50 \dots 400 \text{ км}$.

На рис. 2 і 3 з графіку 1 видно, що для радіолокатору супроводження з $\lambda = 3 \text{ см}$ при зміні шляху хвилі у нижніх шарах тропосфери ($C_\varepsilon^2 = 10^{-13} \text{ см}^{-2/3}$) від 50 до 200 км , дисперсія фазових флуктуацій знаходиться в діапазоні значень від $47,3$ до 189 рад^2 , а і радіус кореляції фазових флуктуацій – від $53,5$ до $23,3 \text{ м}$. З графіку 2 слідує що, для радіолокатору оглядового типу з $\lambda = 10 \text{ см}$ стосовно поширення хвилі у нижніх шарах тропосфери від 50 до 400 км , відповідний діапазон зміни дисперсії флуктуацій складає від $4,3$ до 34 рад^2 , а і радіусу кореляції фазових флуктуацій – від $226,9$ до $65,2 \text{ м}$.

При поширенні радіохвиль $z = 50 \dots 200 \text{ км}$ у верхніх шарах тропосфери ($C_\varepsilon^2 = 10^{-18} \text{ см}^{-2/3}$), згідно графіку 3, для радіолокатору супроводження ($\lambda = 3 \text{ см}$), дисперсія фазових флуктуацій знаходиться в межах від $4,8 \cdot 10^{-4}$ до $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ рад}^2$, а радіус кореляції фазових флуктуацій – від $53,5$ до $23,3 \text{ км}$. Для радіолокатору оглядового типу ($\lambda = 10 \text{ см}$) при $z = 50 \dots 400 \text{ км}$, згідно графіку 4, зміни дисперсії фазових флуктуацій складають від $4,3 \cdot 10^{-5}$ до $3,4 \cdot 10^{-4} \text{ рад}^2$, а радіус кореляції фазових флуктуацій – від $226,9$ до $65,2 \text{ км}$. Таким чином, отримані чисельні дані дозволяють стверджувати, що можна

очікувати можливості знехтування впливом фазових флуктуацій у верхніх шарах тропосфери внаслідок їх малої інтенсивності та високої кореляції. Вплив фазових флуктуацій, що обумовлені нижніми шарами тропосфери, очікується навпаки суттєвим з можливістю значного погіршення якості просторових вимірювань у радіолокаторах з ФАР як слідкувального так й оглядового типів.

В роботі [25] показано, що для експонентної кореляційної функції фазових флуктуацій, дисперсія флуктуаційної складової помилки вимірювання кутової координати в радіолокаторі з ФАР визначається згідно виразу

$$\sigma_{\theta_{\phi l}}^2 = \frac{9\sigma_{\phi}^2 \lambda^2}{2\pi^2 d^2 (N/2)^2 (4(N/2)^2 - 1)^2} \left[\sum_{j=1}^{N/2} (2j-1)^2 (1 - \exp(-\frac{d}{\rho_{\phi}} (2j-1))) + 2 \sum_{l=1}^{N/2-j} \exp(-\frac{d}{\rho_{\phi}} l) \sum_{j=1}^{N/2-1} (2j-1) - 1) (2j+2l-1) (1 - \exp(-\frac{d}{\rho_{\phi}} \cdot (2j-1))) \right]. \quad (11)$$

де N - кількість каналів (елементів) ФАР.

Вираз (11) дає можливість розрахувати флуктуаційні відхилення просторового положення аеродинамічного об'єкта у вертикальній площині (флуктуації висоти) та у горизонтальній площині, що виникають внаслідок тропосферної рефракції.

Флуктуаційне відхилення у вертикальній площині може бути визначено з (2) з урахуванням (11):

$$\Delta H = r \sin \sigma_{\theta_{\phi l}}, \quad (12)$$

де $\sigma_{\theta_{\phi l}}$ - середньоквадратичне відхилення флуктуаційної складової помилки вимірювання кута місця аеродинамічного об'єкта, яке може бути розраховано згідно (11).

Флуктуаційне відхилення просторового положення аеродинамічного об'єкта у горизонтальній площині є радіальним відхиленням (6), яке з урахуванням (11) визначається таким чином

$$\Delta r_p = r \cdot \sigma_{\theta_{\phi l}}. \quad (13)$$

Вирази (12) і (13) свідчать про те, що флуктуаційні відхилення просторового положення аеродинамічного об'єкта у вертикальній і горизонтальній площині приймають ідентичні значення тому їхній аналіз матиме спільний характер

На рис. 4 надані графіки залежності флуктуаційних відхилень просторового положення аеродинамічного об'єкта у вертикальній та горизонтальній площинах від шляху хвилі у тропосфері.

Згідно проведеного аналізу графіків на рис. 2 і 3, наведені на рис. 4 залежності відповідають випадку флуктуацій хвильового фронту радіолокаційного сигналу, обумовлених впливом нижніх шарів тропосфери (структурна постійна складає $C_{\epsilon}^2 = 10^{-13} \text{ см}^{2/3}$). Окрім того має практичну користь оцінювання впливу на флуктуаційні відхилення ΔH і Δr_p зовнішнього масштабу турбулентності тропосфери L_0 .

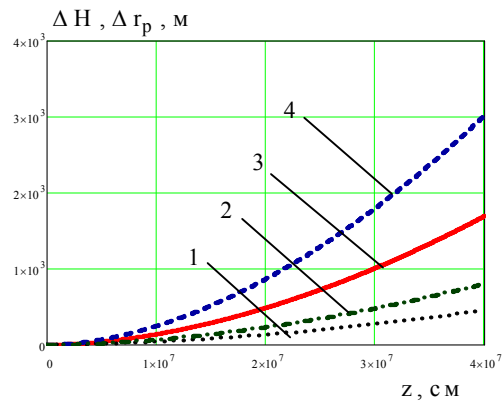


Рис. 4. Залежності флуктуаційних відхилень просторового положення аеродинамічного об'єкта у вертикальній та горизонтальній площинах від шляху хвилі у тропосфері

Графіки на рис. 4 відповідають радіолокатору з ФАР, що містить $N = 50$ елементів, та побудовані для наступних випадків: 1 - $\lambda = 10$ см, $L_0 = 1$ км; 2 - $\lambda = 10$ см, $L_0 = 2$ км; 3 - $\lambda = 3$ см, $L_0 = 1$ км; 4 - $\lambda = 3$ см, $L_0 = 2$ км.

З отриманих графіків видно, що на досліджувані відхилення ΔH і Δr_p , суттєвий вплив здійснюють розмір тропосферних неоднорідностей та діапазон довжин хвиль радіолокатору. Так, при збільшенні зовнішнього масштабу турбулентності тропосфери з 1 до 2 км, флуктуаційні горизонтальне та вертикальне просторове відхилення зростає у 1,78 разів. При збільшенні довжини хвилі радіолокатору з 3 см до 10 см, дані відхилення зростають у 3,8 разів.

Практичну користь має оцінювання величин флуктуаційних складових вертикального та горизонтального відхилення в залежності від дальності радіолокаційного спостереження для радіолокаторів оглядового типу та супроводження.

Для радіолокаторів оглядового типу ($\lambda = 10$ см) з ФАР на відстанях від 50 до 400 км, вказані флуктуаційні відхилення зростають з 10,7 до 450,9 м при $L_0 = 1$ км та з 19 до 803,4 м при $L_0 = 2$ км.

Для радіолокаторів супроводження ($\lambda = 3$ см) з ФАР, на відстанях виконання завдань за призначенням від 50 до 200 км, досліджувані флуктуаційні відхилення можуть складати від 40,2 до 486,8 м при $L_0 = 1$ км та від 71,5 до 867,4 м при $L_0 = 2$ км.

Проведений аналіз відповідає статистичним характеристикам фазових флуктуацій наведеними у [26], а отримані оцінки узгоджуються з результатами наведеними у [27]. Очевидно, що загальне флуктуаційне відхилення просторового положення аеродинамічного об'єкта визначається як сума розглянутих вище відхилень

$$\Delta R = \Delta H + \Delta r_p. \quad (14)$$

На рис. 5 наведені графіки залежності флуктуаційної складової середньоквадратичної помилки вимірювання кутової координати $\sigma_{\theta_{\phi l}}$ в радіолокаторі з ФАР, що розрахована за допомогою (11), від шляху хвилі у тропосфері.

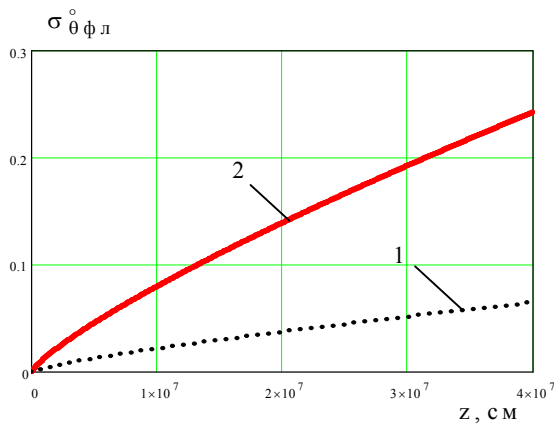


Рис. 4. Залежності флукуаційної складової середньоквадратичної помилки вимірювання кутової координати аеродинамічного об'єкта від шляху хвилі у тропосфері

Графіки 1 ($\lambda = 10$ см) та 2 ($\lambda = 3$ см) отримано для радіолокатору з ФАР, що містить $N = 50$ елементів за умовами впливу тропосферної рефракції з $C_{\epsilon}^2 = 10^{-13}$ см $^{-2/3}$ та $L_0 = 1$ км.

Отримані графіки свідчать про те, що фазові флукуації, які обумовлені впливом нижніх шарів тропосфери, здатні викликати суттєві значення флукуаційних помилок вимірювання кутових координат в радіолокаторах з ФАР. При цьому, для радіолокатору з $\lambda = 3$ см дана помилка у 3,3 рази більше ніж у радіолокаторі з $\lambda = 10$ см, що вказує на більшу небезпеку впливу досліджуваних факторів на процес супроводження аеродинамічних об'єктів.

Таким чином, можна стверджувати, що при виконанні радіолокаторами з ФАР завдань за призначенням в умовах впливу тропосферної рефракції, флукуації хвильового фронту радіолокаційного сигналу призводять до флукуаційних відхилень радіолокаційного спостереження аеродинамічних об'єктів у вертикальній та горизонтальній площинах, які здатні складати від десятків до сотень метрів. Вказані флукуаційні явища за своїм впливом є небезпечними для радіолокаторів оглядового типу і су-

проводження в зоні їхньої відповідальності. При цьому, питання врахування флукуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу мають більшу актуальність для радіолокаторів супроводження, внаслідок їх більш суттєвого впливу у відповідному діапазоні довжин хвиль.

Висновки

1. Перспективним шляхом забезпечення високої якості просторових вимірювань є застосування в радіолокаторах фазованих антенних решток, перевагами яких у порівнянні з дзеркальними антенами є можливості реалізації адаптивної просторової цифрової обробки сигналів та визначення просторових координат багатьох аеродинамічних об'єктів одночасно.

2. Вплив тропосферної рефракції призводить до виникнення додаткових рефракційних помилок вимірювання кутових координат аеродинамічних об'єктів. Даний вплив визначається викривленням променя і залежить від градієнта коефіцієнта заломлення в напрямку його поширення в атмосфері. Це у свою чергу призводить до викривлень фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу, що свідчить про необхідність врахування поточного стану атмосфери при визначенні трикоординатними радіолокаторами просторового положення аеродинамічних об'єктів.

3. Величини градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери залежать від висоти над землею поверхнею та від достатньо нестабільного стану атмосфери (особливо у нижніх шарах) і в кожній точці на шляху поширення радіохвилі мають власні значення, які обумовлені флукуаціями тиску, температури і вологості тропосфери.

4. Мала інтенсивність та висока кореляція фазових флукуацій, що обумовлені впливом верхніх шарів тропосфери, свідчить про можливість їх знехтування, але вплив фазових флукуацій, що обумовлені нижніми шарами тропосфери, є досить суттєвим. Чисельне оцінювання вказує на те, що флукуаційні горизонтальне та вертикальне просторове відхилення в радіолокаторах з ФАР можуть зростати до декількох разів та складати сотні метрів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Использование радиочастотного спектра в метеорологии: прогнозирование и мониторинг погоды, климата и качества воды. Справочник. – WMO, 2008. – 120 с.
2. Горелик А. Г. Радиолокационная метеорология и перспективы ее развития. // Всероссийская конференция "Радиолокация и радиосвязь". – ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009. – С. 400-404.
3. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Базлова Т.А., Бочарников Н.В., Брылев Г.Б. и др.; отв. ред. Г.Б. Брылев. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 209 с.
4. Климченко В.Й. Аналіз потенційних можливостей оглядових РЛС сантиметрового діапазону хвиль щодо забезпечення дій авіації Повітряних Сил України метеорологічною інформацією / В.Й. Климченко, Г.Г. Камалтинов, В.Л. Місайлов // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС. – 2011. №1 (25). С. 21–27.
5. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / под. ред. Я.Д. Ширмана. – М.: З.А.О. «МАКВИС», 1998. – 828 с.
6. Флюктуационные процессы при распространении радиоволн / М.П. Долуханов – М.: Связь, 1971. – 183 с.
7. Карлов В.Д. Влияние среды распространения радиоволн на приморском направлении при измерении угловых координат радиолокационных целей / В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, В.В. Челпанов, К.П. Квиткин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2010. – № 3 (25). – С. 51-53.
8. Карлов В.Д. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції. / В.Д. Карлов, А.О.Родюков, І.М.Пічугін // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – Вип. 4 (21). – С. 71-74.

9. 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.
10. Подвижный радиовисотомер ПРВ-16. Учебное пособие / Г.В.Индус, А.А. Ваганов, В.П.Козлов и др. — М.: Воениздат, 1979. — 224 с.
11. 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.
12. Радіоелектронні системи / Ю.М. Седишев, В.І. Карпенко, Д.В. Атаманський та ін. – Х: ХУПС, 2010. – 418 с.
13. Карлов В.Д. До питання про вимірювання дальності маловисотної цілі при її радіолокації в межах тропосферного хвилеводу над морем / В.Д. Карлов, Д.Б. Кучер, О.В. Струцинський, О.В. Лукашук // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 3 (24). – С. 98-101.
14. Карлов В.Д. Про вплив механізму розповсюдження радіохвиль на локацію цілей в тропосферному радіохвилеводі над морем / В.Д. Карлов, О.В. Бесова, М.М. Олещук, М.М. Петрушенко // Новітні технології-для захисту повітряного простору: зб. тез доповідей 10 НК ХУПС. 9-10 квітня 2014 р. – 2014. – С. 254.
15. Климченко В.Й. Вимірювання висоти польоту цілей в радіолокаторах контролю повітряного простору з урахуванням поточного стану тропосферної рефракції / В.Й. Климченко, Г.Г. Камалтинов, В.Л. Місайлов, Г.В. Рибалка // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2019. – № 3 (61). – С. 86-95.
16. Карлов В.Д. Результати експериментальних досліджень особливостей локації маловисотних цілей, що здійснюють політ над морською поверхнею / В.Д. Карлов, М.М. Олещук, Г.В. Певцов, В.Л. Місайлов // Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем IPST.– 2014. – С. 35.
17. Amin Salih M., Potrus M.Y. A Method for Compensation of Tcp Throughput Degrading During Movement Of Mobile Node. ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences. 2015. Vol. 27, No 6. P. 59–68.
18. Кучук, Г.А. Метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2011. – Вип. 3 (19). – С. 209–213.
19. Amin Salih Mohammed, Saravana Balaji B., Saleem Basha M S, Asha P N and Venkatachalam K (2020), FCO — Fuzzy constraints applied Cluster Optimization technique for Wireless AdHoc Networks, Computer Communications, Volume 154, Pages 501-508, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.02.079>.
20. Sivaram, M., Yuvaraj, D., Mohammed, A. S., Manikandan, V., Porkodi, V., & Yuvaraj, N. (2019). Improved Enhanced Dbtma with Contention-Aware Admission Control to Improve the Network Performance in Manets. CMC-COMPUTERS MATERIALS & CONTINUA, 60(2), pp. 435-454, DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2019.06295>
21. Кучук Г. А. Метод параметрического управления передачей данных для модификации транспортных протоколов беспроводных сетей / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи обробки інформації. – 2011. – № 8(98). – С. 211-218.
22. Sivaram, M., Yuvaraj, D., Amin Salih, Mohammed, Porkodi, V. and Manikandan V. (2018), “The Real Problem Through a Selection Making an Algorithm that Minimizes the Computational Complexity”, International Journal of Engineering and Advanced Technology, Vol. 8, iss. 2, 2018, pp. 95-100.
23. Manikandan, V, Porkodi, V, Mohammed, A.S. and Sivaram M. (2018), “Privacy Preserving Data Mining Using Threshold Based Fuzzy cmeans Clustering”, ICTACT Journal on Soft Computing, Vol. 9, Issue 1, 2018, pp.1813-1816. DOI: 10.21917/ijsc.2018.0252
24. Справочник. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Издание второе, переработанное и дополненное / Я. Ширман, С. Багдасарян, А. Маляренко и др. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
25. Кузнецов О.Л. Обмеження якості просторових вимірювань в РЛС з фазованою антенною решіткою внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей та земної поверхні / О.Л. Кузнецов, О.Б. Танцюра, О.Л. Мельник // Системи управління, навігації та зв'язку. – Вип.1 (21) Том 2. – П., 2012.– С. 49-52.
26. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин – М: Сов. радио, 1970. – 383 с.
27. Providing the Required Accuracy of Measurements of Spatial Coordinates of Aerial Objects / O. Kuznietsov, V Kovalchuk, A Kovalchuk, D Karlov, S Yarovyuy, V. Vasylyshyn // 2020 IEEE 6th Int. Symp. on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS), UkrMW, Kharkiv, Ukraine, 2020, p. 226-229.

Received (Надійшла) 01.10.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.01.2021

Accuracy of measurement of aerodynamic objects angular coordinates under tropospheric refraction conditions

Vladimir Karlov, Oleksandr Kuznietsov, Vladimir Belousov, Sergey Tuzikov, Mykola Oleschuk, Valentin Petruschenko

Abstract. Three-coordinate radars are the most versatile, from a technical point of view, means of determining the spatial position of aerodynamic objects and ensuring their further tracking. Moreover, their functioning is often carried out in difficult meteorological conditions, in particular in conditions of tropospheric refraction. Measurement of angular coordinates by existing three-coordinate radars is implemented mainly without taking into account the dynamics of changes in the current state of the Earth's troposphere, therefore the article is devoted to the study of the influence of this factor on the accuracy of measuring the angular coordinates of air objects. The article provides a numerical analysis of a possible decrease in the quality of spatial measurements, which are carried out by three-coordinate radars, depending on the degree of distortion of the phase front of the radar signal wave due to the influence of tropospheric refraction. To solve the problem of estimating the possible values of the statistical characteristics of fluctuations of the phase front of a wave of a radar signal, the methods of mathematical statistics and the theory of probability were used. The result of the article is a methodology for the numerical analysis of the influence of these statistical characteristics on the accuracy of measuring angular coordinates with the determination of the corresponding root-mean-square measurement errors with respect to three-coordinate surveillance radars and tracking radars. The obtained results can be further used in assessing the capabilities of three-coordinate radars to detect and track aerodynamic objects in difficult meteorological conditions, in particular, under super-refraction conditions during radar observation in coastal directions.

Keywords: altitude, refractive index gradient, angular coordinates, radar observation, refraction, root-mean-square error, measurement accuracy, troposphere, three-coordinate radar, phase front fluctuations.