

О. Л. Кузнєцов¹, О. В. Коломійцев², А. О. Ковальчук¹, А. М. Коржов¹, О. В. Очкуренко¹

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОТOTOЖНЕННЯ ПЕЛЕНГІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТРИАНГУЛЯЦІЙНОГО МЕТОДУ ПАСИВНОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Анотація. Об'єднання радіолокаційної інформації є важливим завданням при багатопозиційному прийомі радіолокаційного сигналу. Зокрема, при використанні триангуляційного методу пасивної радіолокації незалежність оцінювання кутових координат в приймальних пунктах призводить до виникнення хибних об'єктів при ототоженні пеленгів. При цьому функціонування багатопозиційних радіолокаційних комплексів (БПРЛК) часто здійснюється у складних метеорологічних умовах. Оскільки область спостереження БПРЛК є значною, то виконання завдань за призначенням може здійснюватися ними в умовах тропосферної рефракції, що призводить до флуктуацій фазового фронту хвилі прийнятого сигналу. **Предметом** вивчення в статті є вплив флуктуацій фазового фронту хвилі прийнятого сигналу на точність ототоження пеленгів при використанні триангуляційного методу пасивної радіолокації. **Метою** є дослідження можливостей використання алгоритму оптимального вимірювання кутових координат з врахуванням флуктуацій фазового фронту хвилі прийнятого сигналу для підвищення точності ототоження пеленгів при реалізації триангуляційного методу пасивної радіолокації. **Завданням** є аналіз можливого підвищення вказаної точності в залежності від ступеня викривлення фазового фронту хвилі прийнятого сигналу в реальних умовах його розповсюдження. В ході досліджень використовувалися **методи** математичної статистики та теорії ймовірностей. **Результатами** статті є надання пропозицій щодо підвищення точності ототоження пеленгів при використанні триангуляційного методу пасивної радіолокації в умовах впливу флуктуацій фазового фронту хвилі прийнятого сигналу. Отримані результати можуть бути в подальшому використані в ході досліджень спрямованих на підвищення ефективності методів визначення координат в активних та активно-пасивних БПРЛК.

Ключові слова: аеродинамічний об'єкт, пасивна радіолокація, радіолокаційний сигнал, триангуляційний метод, тропосфера, фазовий метод, флуктуації фазового фронту.

Вступ

Необхідність забезпечення безперервності отримання локаційної інформації про аеродинамічні об'єкти потребує перекриття зон виявлення локаційних засобів по всьому діапазоні можливих висот. Але це призводить до дублювання інформації про об'єкти спостереження та виникнення відповідної надлишкової інформації. Окрім цього, неузгодженість за часом і незалежність вимірювань може призвести до переплутування даних. Вказане обумовлює необхідність застосування алгоритмів об'єднання даних вже на етапі первинної обробки радіолокаційної інформації. В умовах складної цільової та заводої обстановки, використання БПРЛК дозволяє підвищити безперервність отримання інформації про повітряні об'єкти. Зокрема, пасивна радіолокація забезпечує максимальну скритність та заводо захищеність радіолокаційних засобів з можливістю пеленгації постановників завод. При цьому одним з найпоширеніших методів пасивної радіолокації є триангуляційний метод. Вказаний метод реалізується з використанням рознесених у просторі декількох пасивних джерел радіолокаційної інформації.

Недоліком цього методу є наявність хибного виявлення об'єктів в процесі ототоження пеленгів. Причина даного ефекту полягає в незалежності кутових вимірювань кожним радіолокаційним засобом.

Реальні умови розповсюдження радіохвиль, зокрема наявність тропосферних неоднорідностей, є причиною виникнення флуктуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу, що викликає порушення його просторової когерентності та зниження

точності вимірювання кутових координат та висоти аеродинамічного об'єкта.

Оскільки БПРЛК, що реалізують триангуляційний метод пасивної радіолокації здійснюють спостереження за повітряними об'єктами на значних відстанях від наземних пунктів прийому, вплив середовища розповсюдження радіохвиль може бути значним. У свою чергу, даний вплив може призвести до суттєвого зниження точності кутових вимірювань та, як слід, до відповідного погіршення точності ототоження пеленгів. Тому, доцільним є визначення умов за якими вплив флуктуацій фазового фронту хвилі прийнятого сигналу потребує врахування в алгоритмі його просторової обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метеорологічним питанням, що стосуються стану атмосфери та особливостей радіолокації у відповідних умовах присвячено роботи [1]. Питання щодо впливу флуктуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу при застосуванні радіотехнічних систем в нестабільних гідрометеорологічних умовах та стихійних метеорологічних явищах розглянуто у [2]. Зокрема, особливості організації просторових вимірювань в умовах впливу фазових флуктуацій радіохвиль розглянуто у [3]. При цьому, статистичні характеристики даних флуктуацій є експериментально підтвердженими та наведені у [4]. Оцінювання можливих помилок вимірювання кутових координат об'єктів радіолокаційного спостереження, обумовлених впливом флуктуацій фазового фронту хвилі сигналу проведено у [5]. Можливе зниження точності вимірювання кутових координат внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей та земної поверхні оцінено у [6].

В роботі [7] доведено, що сучасний розвиток цифрових технологій дозволяє вважати перспективним шлях врахування кореляції фазових флуктуацій безпосередньо у алгоритмах просторової обробки радіолокаційного сигналу. У випадку цифрової обробки радіолокаційного сигналу особливості даного врахування наведені у роботі [8]. Питання обробки радіолокаційної інформації у БПРЛК, зокрема при використанні триангуляційного методу пасивної радіолокації надані у [9]. Представляє практичну користь оцінювання можливостей підвищення точності ототожнення пеленгів за рахунок використання засобами пасивної радіолокації алгоритму оптимального вимірювання кутових координат з врахуванням флуктуацій фазового фронту хвилі прийнятого сигналу при використанні триангуляційного методу пасивної радіолокації в реальних умовах розповсюдження радіохвиль.

Метою статті є дослідження можливостей використання алгоритму оптимального вимірювання кутових координат з врахуванням флуктуацій фазового фронту хвилі прийнятого сигналу для підвищення точності ототожнення пеленгів при реалізації триангуляційного методу пасивної радіолокації.

Основний матеріал

Розглядається випадок пеленгації джерел радіовипромінювання, що здійснюється двома пунктами прийому рознесеними на відстань B . У кожному з пунктів прийому вимірюються кутові координати – азимут і кут місця. Об'єднання даних здійснюється шляхом визначення точки перетину площин, що відповідають азимутальним і кутомісцевим положенням об'єкта спостереження. Умова формування координатних даних по i -му об'єкту спостереження визначається шляхом порівняння різниці висот з величиною припустимого розкиду згідно з виразом [9]:

$$|\hat{H}_{i1} - \hat{H}_{i2}| \leq L \sqrt{(\hat{R}_{i1} \operatorname{tg} \sigma_{ei1})^2 + (\hat{R}_{i2} \operatorname{tg} \sigma_{ei2})^2}. \quad (1)$$

де \hat{H}_{i1} і \hat{H}_{i2} – висоти i -го об'єкта спостереження, які виміряні у першому і другому пунктах прийому відповідно; L – величина, яка обирається з припустимого значення ймовірності правильного ототожнення; \hat{R}_{i1} і \hat{R}_{i2} – дальності до i -го об'єкта спостереження у горизонтальній площині, які виміряні у першому і другому пунктах прийому відповідно; σ_{ei1} і σ_{ei2} – середньоквадратичні відхилення помилок вимірювання кута місця i -го об'єкта спостереження у першому і другому пунктах прийому відповідно.

Вказані у (1) висоти, які відповідають точці перетину відносно пунктів прийому визначаються як:

$$\hat{H}_{i1} = \hat{R}_{i1} \operatorname{tg} \hat{\varepsilon}_{i1}, \quad \hat{H}_{i2} = \hat{R}_{i2} \operatorname{tg} \hat{\varepsilon}_{i2}. \quad (2)$$

де $\hat{\varepsilon}_{i1}$ і $\hat{\varepsilon}_{i2}$ – значення кутів місця i -го об'єкта спостереження, які виміряні у першому і другому пунктах прийому відповідно. Дальності \hat{R}_{i1} і \hat{R}_{i2} визначаються таким чином [9]:

$$\hat{R}_{i1} = \frac{B \cos \hat{\beta}_{i2}}{\sin(\hat{\beta}_{i1} - \hat{\beta}_{i2})}, \quad \hat{R}_{i2} = \frac{B \cos \hat{\beta}_{i1}}{\sin(\hat{\beta}_{i1} - \hat{\beta}_{i2})}. \quad (3)$$

де $\hat{\beta}_{i1}$ і $\hat{\beta}_{i2}$ – значення азимутів i -го об'єкта спостереження, які виміряні у першому і другому пунктах прийому відповідно.

Виконання умови (1) свідчить про належність оцінених у першому та другому пунктах прийому параметрів i -му об'єкту спостереження. В іншому випадку вважається, що знайдена точка перетину є хибною і порівняння одержаних оцінок продовжується. При цьому, необхідною умовою є приведення результатів кутових вимірювань до єдиного моменту часу. За відсутності такої можливості необхідна ймовірність правильного ототожнення забезпечується шляхом збільшення величини L , але при цьому збільшується й ймовірність хибного ототожнення. Отже алгоритм ототожнення включає такі процедури:

– зведення даних до єдиного моменту часу (синхронізація за часом);

– розрахунок згідно (3) дальностей \hat{R}_{i1} і \hat{R}_{i2} відносно двох пунктів прийому в азимутальній площині по двом одноразово виміряним азимутам $\hat{\beta}_{i1}$ і $\hat{\beta}_{i2}$;

– за оцінними значеннями $\hat{\varepsilon}_{i1}$ і $\hat{\varepsilon}_{i2}$ та розрахованими \hat{R}_{i1} і \hat{R}_{i2} визначення висот \hat{H}_{i1} і \hat{H}_{i2} (2);

– різниця знайдених висот порівнюється з величиною припустимого відхилення по висоті $|\hat{H}_{i1} - \hat{H}_{i2}|$ (1).

Для оцінювання показників якості ототожнення пеленгів слід враховувати нелінійний зв'язок з помилками первинних кутових вимірювань:

$$\gamma = |\hat{H}_{i1} - \hat{H}_{i2}|^2 - L^2 \left\{ \left[\hat{R}_{i1} \operatorname{tg}(\sigma_{i1}) \right]^2 + \left[\hat{R}_{i2} \operatorname{tg}(\sigma_{i2}) \right]^2 \right\} \leq 0. \quad (4)$$

При цьому доцільно мати інформацію про закон розподілу випадкової величини $p(\gamma)$.

При нульовому порозі для гіпотези H_1 (точка перетину істинна) та гіпотези H_2 (точка перетину хибна), ймовірності правильного ототожнення P_{no} і хибного ототожнення P_{xo} знаходиться як:

$$P_{no} = \int_{-\infty}^0 p_{H1}(\gamma) d\gamma, \quad (5)$$

$$P_{xo} = \int_0^{\infty} p_{H2}(\gamma) d\gamma. \quad (6)$$

Так, $P_{no} \approx 0,997$ відповідає $L=3$, $P_{no} \approx 0,92$ відповідає $L=2$, а $P_{no} \approx 0,67$ відповідає $L=1$.

Один з методів оцінки значень P_{no} і P_{xo} полягає в лінеаризації залежності γ від випадкових величин $\hat{\beta}_{i1}$, $\hat{\beta}_{i2}$, $\hat{\varepsilon}_{i1}$, $\hat{\varepsilon}_{i2}$. Це дозволить нормалізувати закони розподілу $p_{H1}(\gamma)$ і $p_{H2}(\gamma)$ та оцінити значення P_{no} та P_{xo} .

В [9] наведено два способи оцінювання показників якості ототожнення пеленгів. За першим способом, функція γ підлягає розкладанню в ряд Тейлора

в точках, які відповідають вимірними значеннями. Ця процедура дозволяє лінеаризувати зв'язок γ з випадковими величинами $\hat{\beta}_{i1}$, $\hat{\beta}_{i2}$, $\hat{\varepsilon}_{i1}$, $\hat{\varepsilon}_{i2}$. При цьому дисперсія γ визначається сумою наступного виду:

$$\sigma_{\gamma}^2 = A^2 \sigma_{\Delta\beta_1}^2 + B^2 \sigma_{\Delta\beta_2}^2 + C^2 \sigma_{\Delta\varepsilon_1}^2 + D^2 \sigma_{\Delta\varepsilon_2}^2. \quad (7)$$

де $A = \partial\gamma/\partial\beta_{i1}$ при $\beta_{i1} = \hat{\beta}_{i1}$; $B = \partial\gamma/\partial\beta_{i2}$ при $\beta_{i2} = \hat{\beta}_{i2}$; $C = \partial\gamma/\partial\varepsilon_{i1}$ при $\varepsilon_{i1} = \hat{\varepsilon}_{i1}$; $D = \partial\gamma/\partial\varepsilon_{i2}$ при $\varepsilon_{i2} = \hat{\varepsilon}_{i2}$; $\Delta\beta_1 = \beta_{i1} - \hat{\beta}_{i1}$; $\Delta\beta_2 = \beta_{i2} - \hat{\beta}_{i2}$; $\Delta\varepsilon_1 = \varepsilon_{i1} - \hat{\varepsilon}_{i1}$; $\Delta\varepsilon_2 = \varepsilon_{i2} - \hat{\varepsilon}_{i2}$.

За другим способом будується модель випадкових вимірів кутових координат об'єктів спостереження для фіксованих значень дальності R та висоти H , за наступними співвідношеннями:

$$\hat{\varepsilon}_{i1} = \varepsilon_{i1} + \eta_{\varepsilon 1}, \quad \hat{\varepsilon}_{i2} = \varepsilon_{i2} + \eta_{\varepsilon 2}, \quad (8)$$

$$\hat{\beta}_{i1} = \beta_{i1} + \eta_{\beta 1}, \quad \hat{\beta}_{i2} = \beta_{i2} + \eta_{\beta 2}, \quad (9)$$

де $\eta_{\varepsilon 1}$, $\eta_{\varepsilon 2}$, $\eta_{\beta 1}$, $\eta_{\beta 2}$ – складові випадкових величин з заданою дисперсією, які розподілені за нормальним законом та генеруються датчиком випадкових чисел.

В сучасних цифрових радіолокаторах у якості антенних систем широко використовується фазовані антенні решітки (ФАР), які забезпечують одночасне вимірювання дальності, азимуту та кута місця. В пунктах прийому БПРЛК, кут місця може бути визначений згідно фазового методу, тобто за фазовим зсувом сигналів в елементах антенної решітки. Значення \hat{H}_{i1} і \hat{H}_{i2} можуть бути визначені згідно (2). Отримані оцінки використовуються в алгоритмі ототожнення (1). Корегування коефіцієнту L дозволяє забезпечити потрібну якість ототожнення.

В [10] показано, що при прийомі когерентного сигналу з випадковою рівномірно розподіленою початковою фазою і випадковою, розподіленою за законом Релея амплітудою на фоні внутрішнього шуму, дисперсія помилки оцінювання кута місця для ФАР з рівномірним амплітудним розподілом описується як

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \frac{12}{q^2(4n^2-1)} \left(\frac{\lambda}{2\pi d} \right)^2, \quad (10)$$

де q^2 – відношення сигнал/шум по потужності; n – число елементів ФАР.

Точність вимірювання кута місця і як слід висоти аеродинамічного об'єкта залежить від стану атмосфери особливо при локації в умовах тропосферної рефракції, що є причиною виникнення флуктуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу.

Згідно експериментальних даних щодо дослідження фазових флуктуацій, закон їх розподілу є близьким до нормального, а кореляційна функція апроксимуються експонентною або осцилюючою залежностями [4]. Впливом фазових флуктуацій у верхніх шарах тропосфери можна знехтувати внаслідок їх малої інтенсивності та високої кореляції. Однак, вплив фазових флуктуацій, обумовлений нижніми шарами тропосфери, навпаки є дуже суттєвим.

Тобто, лінійні флуктуаційні відхилення точки спостереження, обумовлені впливом тропосферних неоднорідностей можуть досягати сотень метрів.

Висота аеродинамічного об'єкта з урахуванням кривизни Землі визначається за формулою [12]:

$$h = r \cdot \sin \varepsilon + \frac{r^2}{2R_s} + h_a, \quad (11)$$

де r – похила дальність аеродинамічного об'єкта; R_s – радіус Землі; h_a – висота розташування антени радіолокатора над поверхнею, відносно якої здійснюється відлік висоти аеродинамічного об'єкта.

В табл. 1 [12] наведені розраховані згідно виразів (10) - (11) величини СКП вимірювання висоти за відсутністю σ_h та за наявністю $\sigma_{h_{фл}}$ впливу флуктуацій фазового фронту хвилі прийнятого сигналу з експонентною кореляційною функцією фазових флуктуацій.

Таблиця 2 – Розрахунки вимірювань

r , км	50	100	150	200
σ_h , м	8,9	9,8	10,6	11,5
$\sigma_{h_{фл}}$, м	169,7	568,4	1167,3	2617,1

Результати розрахунку, наведені в таблиці 1, отримано для різних значень $r = 50, 100, 150$ та 200 км за наступних умов: $\lambda = 5$ см, $n = 100$, $q^2 = 100$, $d = \lambda/2$, $h_a = 8$ м та $L_0 = 1$ км.

Як видно, СКП вимірювання висоти $\sigma_{h_{фл}}$ за наявності впливу фазових флуктуацій може в десятки-сотні разів перевершувати СКП вимірювання висоти σ_h обумовлену впливом лише внутрішнього шуму приймача. Тобто, на дальностях $50 \dots 200$ км СКП вимірювання висоти $\sigma_{h_{фл}}$ здатна досягати величин від сотень метрів до одиниць кілометрів.

Отже, необхідним є визначення можливостей врахування впливу флуктуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу при оцінюванні висоти аеродинамічного об'єкта з метою підвищення точності ототожнення пеленгів в пасивному БПРЛК. Це може бути реалізовано шляхом застосування оптимального алгоритму вимірювання кутових координат, у якому враховуються фазові флуктуації сигналу, який надходить на елементи ФАР у пунктах прийому пасивного БПРЛК.

Слід зазначити, що підвищення точності вимірювання кута місця та висоти за рахунок статистичної оптимізації просторової обробки радіолокаційного сигналу за наявності врахування корельованих фазових флуктуацій, обумовлених впливом неоднорідностей тропосфери, може бути ще більшим, якщо фазові флуктуації описуються осцилюючою кореляційною функцією з різною частотою осциляцій.

Окрім впливу неоднорідностей тропосфери, на зниження точності вимірювання висоти повітряного об'єкта суттєвий вплив здійснює земна (морська) підстильна поверхня, оскільки реальна поверхня відбиття не є ідеально рівною. Ступінь “нерівності” шорсткої

поверхні землі або схвильованої поверхні моря визначається співвідношенням між довжиною хвилі і геометричними параметрами нерівностей. При цьому поле в приймальних пунктах пасивного БПРЛК представляє собою результат інтерференції розсіяних хвиль, що також є причиною флуктуацій фазового фронту результуючої хвилі. Дані флуктуації фази є додатковою причиною виникнення складових помилок вимірювання куткових координат і висоти повітряного об'єкта, які є найбільш суттєвими при його спостереженні на малих висотах. Таким чином, вплив реальних умов розповсюдження радіохвиль, тобто неоднорідностей тропосфери та шорсткості підстильної поверхні призводить до виникнення суттєвих флуктуаційних складових СКП вимірювання висоти об'єкта спостереження. Вказане обумовлює розширення областей перетину площин, що відповідають азимутальним і кутомісцевим положенням об'єкта спостереження. При цьому можливою є ситуація, за якою умова формування координатних даних по i -му об'єкту спостереження (1) перестає виконуватися.

Особливої актуальності вказана ситуація набуває для БПРЛК приморського та морського базування, для яких флуктуації параметрів прийнятих сигналів є найбільш суттєвими внаслідок сезонної та добової мінливості умов розповсюдження радіохвиль. Наведені результати сприяють вдосконаленню існуючих методів оброблення сигналів в сучасних системах радіолокації спрямованого на адаптацію до зовнішніх умов виконання ними завдань за призначенням.

Висновки

1. Функціонування БПРЛК може здійснюватися у складних метеорологічних умовах, вплив яких призводить до виникнення флуктуацій фазового фронту хвилі прийнятого сигналу, що обумовлює зниження

точності куткових вимірювань та відповідне поширення точності ототожнення пеленгів при використанні триангуляційного методу пасивної радіолокації.

2. За результатами оцінювання, СКП вимірювання висоти за наявності впливу фазових флуктуацій може в десятки-сотні разів перевершувати СКП вимірювання висоти обумовлену впливом лише внутрішнього шуму приймача і досягати величин від сотень метрів до одиниць кілометрів.

3. Використання алгоритму оптимального вимірювання куткових координат з врахуванням флуктуацій фазового фронту хвилі прийнятого сигналу з експонентною кореляційною функцією дозволяє зменшити СКП вимірювання висоти на величину до 100 метрів і більше, що відповідно забезпечує підвищення точності ототожнення пеленгів при реалізації триангуляційного методу пасивної радіолокації.

4. Підвищення точності вимірювання кута місця та висоти повітряного об'єкта за рахунок врахування корельованих фазових флуктуацій може бути більшим, якщо фазові флуктуації описуються осцилюючою кореляційною функцією з різною частотою осциляцій.

5. Отримані результати можуть бути в подальшому використані в ході досліджень спрямованих на підвищення ефективності методів визначення координат в активних та активно-пасивних БПРЛК.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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. http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2011_1_7.
2. Петрушенко М. М. Особливості застосування радіотехнічних систем Повітряних Сил в нестабільних гідрометеорологічних умовах та стихійних метеорологічних явищах. *Системи управління навігації та зв'язку*. – 2009. – № 2 (10). – С. 54-57. <https://journal-hnups.com.ua/index.php/nitps/article/view/317>.
3. Кузнецов О. Л. Оцінювання впливу фазових флуктуацій сигналу на зниження точності вимірювання куткових координат цілі в РЛС з фазованими антенними решітками. Системи обробки інформації. – 2008. – № 1 (68). – С. 38-40. <https://scholar.google.com/citations?user=4I8-ivYAAAAJ&hl=en>.
4. Карлов В. Д., Родюков А. О., Пічугін І. М. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2015. – Вип. 4 (21). – С. 71-74. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2015_4_19.
5. Kuznietsov O., Kovalchuk V., Kovalchuk A., Karlov D., Yarovy S., Vasylyshyn V. Providing the Required Accuracy of Measurements of Spatial Coordinates of Aerial Objects. // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week. On 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS). Kharkiv, Ukraine, September 21-25, 2020. V. 2. P. 226-229. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252605>.
6. 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*. – К.: ЦНДІ навігації і управління. – 2012. – № 1 (21). Том 2. – С. 49-52. <https://scholar.google.com/citations?user=4I8-ivYAAAAJ&hl=en>.
7. Карлов В. Д., Кузнецов О. Л., Коломійцев О. В., Красношапка І. В., Петрушенко І. М., Струцінський О. В. Можливості врахування впливу тропосфери при вимірюванні куткових координат та висоти аеродинамічного об'єкта. *Системи управління навігації та зв'язку*. – 2022. – Вип. 3(69). – С. 121-127. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.121>
8. Кузнецов О. Л., Чепурний В. А. Підвищення якості просторових вимірювань в цифрових РЛС з фазованою антенною решіткою. *Системи озброєння і військова техніка*. – 2015. – № 2(42). – С. 113-115. <https://scholar.google.com/citations?user=4I8-ivYAAAAJ&hl=en>

9. Войтович С. А., Турсунходжаєв Х. А., Траскторна обробка локаційної інформації. – Х. : ХУПС, 2008. – 112 с. <https://knizhkovna-skarbnitsya.prom.ua/ua/pl1565715779-vojtovich-tursunhodajev-trayektorna.html>
10. Седишев Ю. М., Карпенко В. І., Атаманський Д. В. та ін. Радіоелектронні системи. – Х. : ХУПС, 2010. – 418 с. <https://journal-hnups.com.ua/index.php/nitps/article/view/500>
11. Карлов В. Д., Кузнєцов 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*. – 2021 – Вип. 1 (63) – С. 146-152. <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/issue/view/74/41>
12. Kuznietsov O., Kolomiitsev O., Kiyko A., Kovalchuk A., Sadovyi K. Analysis of possibilities of providing of necessary exactness of measuring of spatial coordinates of air objects in the radio-location station of accompaniment with phase aerial by a gate. *Сучасні інформаційні системи*. – 2020. – Том 4, № 1. С. 91-96. <http://ais.khpi.edu.ua/article/view/2522-9052.2020.1.13>

Received (Надійшла) 25.01.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.04.2026

Publication date (Дата публікації) 22.05.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Кузнєцов Олександр Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна;

Oleksandr Kuznietsov – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: SAG2121@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-5915-8107>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202953428>.

Коломіїцев Олексій Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Oleksii Kolomiitsev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of computer engineering and programming, National Technical University is the «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: alexus_k@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-8228-8404>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211278112>.

Ковальчук Андрій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна;

Andrii Kovalchuk – PhD, Associate Professor, Professor of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Inna700nf@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-1269-9368>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57220834484>.

Коржов Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна;

Andrii Korzhov – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: kan1972.kan@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-4595-2366>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216643189>.

Очкурєнко Олександр Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна;

Oleksandr Ochkurenko – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: kolidor@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3809-5175>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57209506925>.

Possibilities of increasing the accuracy of bearing identification using the triangulation method of passive radar location in real conditions of radio wave propagation

Oleksandr Kuznietsov, Oleksii Kolomiitsev, Andrii Kovalchuk, Andrii Korzhov, Oleksandr Ochkurenko

Abstract. Combining radar information is an important task in multi-position radar signal reception. In particular, when using the triangulation method of passive radar, the independence of estimating angular coordinates at receiving points leads to the appearance of false objects when identifying bearings. At the same time, the operation of multi-position radar complexes is often carried out in difficult meteorological conditions. Since the observation area of the multi-position radar complexes is significant, the performance of tasks for their intended purpose can be carried out by them in conditions of tropospheric refraction, which leads to fluctuations in the phase front of the received signal wave. The subject of study in the article is the influence of fluctuations in the phase front of the received signal wave on the accuracy of bearing identification when using the triangulation method of passive radar. The aim is to investigate the possibilities of using an algorithm for optimal measurement of angular coordinates taking into account fluctuations in the phase front of the received signal wave to increase the accuracy of bearing identification when implementing the triangulation method of passive radar. The task is to analyze the possible increase in the specified accuracy depending on the degree of distortion of the phase front of the received signal wave in real conditions of its propagation. The methods of mathematical statistics and probability theory were used in the research. The results of the article are to provide suggestions for increasing the accuracy of bearing identification when using the triangulation method of passive radar under the influence of fluctuations in the phase front of the received signal wave. The results obtained can be further used in research aimed at improving the efficiency of methods for determining coordinates in active and active-passive multi-position radar complexes.

Keywords: aerodynamic object, passive radar, triangulation method, troposphere, phase method, phase front fluctuations.