

А. В. Кобзев, М. В. Мурзін

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

## ПОКАЗНИКИ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ У ПЕЛЕНГАТОРНІЙ МЕРЕЖІ HF ДІАПАЗОНУ

**Анотація.** Проводиться оцінка граничних можливостей по точності визначення координат джерел радіовипромінювання у пеленгаторній мережі HF діапазону при розміщенні її на території України. Виводяться розрахункові співвідношення для обчислення робочих зон визначення координат джерел радіовипромінювання і обговорюються результати розрахунків при мінімально можливому числі пеленгаторів мережі (3, 4), що забезпечують круговий контроль простору. Результати розрахунків робочих зон відображають граничні можливості по точності визначення координат, оскільки характеристики мережі (просторовий рознос пеленгаторів і реальна точність пеленгації) обрані гранично можливими.

**Ключові слова:** пеленгаторна мережа; граничні можливості по точності; координати джерела радіовипромінювання; розміщення пеленгаторів; контроль радіовипромінювань.

### Вступ

Пеленгаторна мережа (ПМ) являє собою систему з кількох (два і більше) рознесених у просторі станцій (пеленгаторів), кожна з яких здійснює пошук радіовипромінювань у заданому діапазоні частот, аналіз виявлених сигналів і вимірювання кутових координат (пеленгацію) джерел радіовипромінювання (ДРВ). Отримані дані передаються на загальний пункт обробки інформації, де вирішується завдання визначення просторових координат ДРВ. Пеленгаторні мережі знайшли застосування в системах радіомоніторингу, радіорозвідки і пасивної радіолокації [1-8].

Функціонування ПМ у короткохвильовому (HF) діапазоні (3 - 30 МГц) має ряд особливостей, обумовлених специфічними умовами поширення радіохвиль. Тут, перш за все, слід відзначити великі дальності дії пеленгаторів (до декількох тисяч км) за рахунок іоносферного поширення радіохвиль і високої чутливості приймачів вузькосмугових сигналів. Крім того, відстані між пеленгаторами можуть становити сотні і тисячі кілометрів. При розробці розрахункових співвідношень для показників точності координатної інформації ПМ наведені особливості змушують враховувати кривизну Землі. Тому розрахунки необхідно проводити з урахуванням сферичності поверхні розташування пеленгаторів і ДРВ, та використовувати геоцентричну або географічну систему координат. Початкові дані про координати ДРВ прийнято представляти в географічній системі (широта, довгота).

У відомих роботах, де розглядаються питання аналізу показників точності пеленгаційного методу визначення місця розташування завжди розглядають розташування пеленгаторів і ДРВ на плоскій поверхні [1-3, 5, 6]. При цьому часто обмежуються варіантом системи з двох пеленгаторів [1, 5]. У відомих публікаціях відсутні розрахункові співвідношення, що є придатними для аналізу точності визначення місця розташування ДРВ пеленгаційним методом в географічній системі координат і дозволяють оцінювати граничні можливості ПМ за показниками точності при розміщенні їх на території України.

Відома загальна методика розрахунку показників точності визначення координат в радіотехнічних системах різного призначення. Вона викладена в ряді робіт, серед яких слід відзначити [2-4]. Ця методика придатна для аналізу якості координатної інформації в системах з активним і пасивним способами спостереження при будь-якому методі визначення координат (далекомірному, кутомірно-далекомірному, різницево-далекомірному, пеленгаційному і ін.). Розрахунки можна проводити в будь-якій системі координат (декартовій, сферичній, геоцентричній, географічній та ін.). Методика не має обмежень на максимальну кількість вимірюваних первинних параметрів і дозволяє оцінювати точність при наявності надлишкових вимірів. Основою методики є встановлення аналітичного зв'язку первинних параметрів з координатами об'єкта в обраній системі координат і лінеаризації цієї залежності шляхом розкладання в ряд Тейлора в точці дійсного місця розташування об'єкта з обмеженням перших двох членів ряду.

Вперше такий підхід було запропоновано в роботі [1] для різних методів визначення координат при мінімально допустимому числі засобів спостереження. Пізніше такий підхід було поширено на більш загальний випадок [2-4]. Зміст загальної методики в конкретному вигляді буде надалі розкрито на прикладі пеленгаторних мережі HF діапазону.

**Мета статті** – отримання аналітичних співвідношень для розрахунку показників точності координатної інформації на виході ПМ в досить загальному вигляді та оцінка граничних можливостей по точності визначення координат при розміщенні пеленгаторів на території України. Завдання вирішується в географічній системі координат для довільного числа пеленгаторів (два і більше) і при довільному їх розташуванні на поверхні Землі.

### Постановка задачі

Початковими даними для оцінювання точності визначення просторових координат є:

- кількість пеленгаторів  $M$  та їх координати на поверхні Землі - широта  $\varphi_m$  та довгота  $\lambda_m$   $m$ -го пеленгатора ( $m = 1..M \geq 2$ );

- значення пеленгів  $\beta_m$ , виміряні кожним пеленгатором на одне і теж ж ДРВ відносно напрямку на північ за меридіаном з довготою  $\lambda_m$  за часовою стрілкою;

-  $\phi, \lambda$  – місцеположення (широта і довгота) ДРВ, для якого оцінюється точність місце розташування.

Відомими також будемо вважати показники точності пеленгації у вигляді кореляційної матриці похибок пеленгації  $\mathbf{K}$  (розмірністю  $M \times M$ ). Оскільки похибки у різних пеленгаторах не пов'язані між собою, то матриця  $\mathbf{K}$  є діагональною з дисперсіями  $\sigma_{\beta,m}^2$ .

Потрібно визначити показники точності оцінювання широти і довготи ДРВ. Цими показниками є елементи кореляційної матриці похибок оцінювання координат  $\Phi$  розмірністю  $2 \times 2$ . Діагональні елементи матриці  $\Phi$  являють собою дисперсії похибок оцінювання широти  $\Phi_{11} = \sigma_{\phi}^2$  та довготи  $\Phi_{22} = \sigma_{\lambda}^2$ . Недіагональні елементи  $\Phi_{12} = \Phi_{21} = \sigma_{\phi}\sigma_{\lambda}\rho$  характеризують кореляційний зв'язок похибок оцінювання координат.

### Розв'язання задачі

Послідовність вирішення задачі є наступною. Встановлюється функціональна залежність  $(m=1..M)(m=1..M)$  первинних параметрів  $\beta_m$  від координат у лінійному наближенні. Для цього визначаються коефіцієнти розкладання функції  $\beta_m(\phi, \lambda)$  при других членах ряду Тейлора у вигляді похідних

$$g_{\phi m} = \frac{\partial \beta_m(\phi, \lambda)}{\partial \phi}; \quad g_{\lambda m} = \frac{\partial \beta_m(\phi, \lambda)}{\partial \lambda}. \quad (1)$$

Сукупність цих похідних наводиться у вигляді прямокутної матриці  $\mathbf{G}$  розміром  $2 \times M$ :

$$\mathbf{G}^T = \begin{bmatrix} g_{\phi 1} \dots g_{\phi M} \\ g_{\lambda 1} \dots g_{\lambda M} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Індекс  $T$  позначає операцію транспонування векторів і матриць. Кореляційна матриця похибок визначення координат знаходиться за формулою [2-4]:

$$\Phi = (\mathbf{G}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{G})^{-1}. \quad (3)$$

При рівноточних пеленгаційних вимірюваннях з дисперсією похибок  $\sigma_{\beta}^2$  отримаємо

$$\Phi = \sigma_{\beta}^2 (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} = \sigma_{\beta}^2 \begin{bmatrix} \sum_m g_{\phi m}^2 & \sum_m g_{\phi m} g_{\lambda m} \\ \sum_m g_{\phi m} g_{\lambda m} & \sum_m g_{\lambda m}^2 \end{bmatrix}^{-1}. \quad (4)$$

Точність визначення двомірних просторових координат часто характеризують лінійною середньоквадратичною похибкою (ЛСКП) [1, 4], яка для розглядаемого випадку є рівною

$$\sigma_L = \sqrt{\sigma_{\phi}^2 + \sigma_{\lambda}^2}. \quad (5)$$

Всі кутові величини у розрахункових формулах повинні представлятися у радіанній мірі. Тому ЛСКП (5) також буде мати розмірність у радіанах (у градусах), що незручно для розуміння результатів розрахунку.

Більш наглядним способом відображення розрахункових даних є представлення ЛСКП у вигляді відстаней між справжнім положенням ДРВ та вимірним. Для цього необхідно провести перерахунок кутової величини  $\sigma_L$  у відстань по поверхні Землі. Алгоритм перерахунку буде наведено нижче.

Наведемо порядок виведення розрахункових формул у відповідності з рівняннями (1)-(3). Встановимо спочатку залежність  $\beta_m(\phi, \lambda)$ . Для цього використаємо рис. 1, де відображено взаємне положення  $m$ -го пеленгатора ( $\Delta$ ) та ДРВ ( $\bullet$ ) на поверхні Землі у вигляді полярного сферичного трикутника.

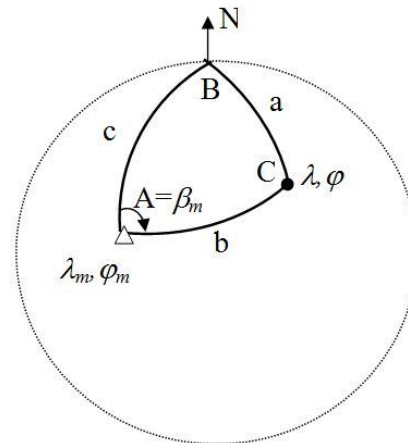


Рис. 1. Взаємне положення  $m$ -го пеленгатора ( $\Delta$ ) і ДРВ ( $\bullet$ ) (Fig. 1. Mutual position of the  $m$ -th direction finder ( $\Delta$ ) and the radio emission source ( $\bullet$ ))

Буквами  $A, B, C$  позначено кути трикутника, протилежні відповідним сторонам  $a, b, c$ . Вершина кута  $B$  співпадає з положенням північного полюса. Сторони трикутника  $a, b, c$  є дугами великого круга і характеризуються кутовими розмірами дуг. Дуга  $b$  з'єднує  $m$ -й пеленгатор з точкою місця розташування ДРВ. При відомому куті  $b$  відстань між ними по поверхні Землі можна визначити так ( $R_z = 6731$  км – середній радіус Землі,  $b$  вимірюється у радіанах). Виразимо кут  $A = \beta_m$  через відомі величини, що містять координати  $\phi, \lambda$ , що оцінюються. Для цього скористаємось співвідношеннями із сферичної тригонометрії [9]. З формули для котангенсів кутів знайдемо тангенс кута

$$\operatorname{tg}(A) = \frac{\sin(a)\sin(B)}{\sin(c)\cos(a) - \cos(c)\sin(a)\cos(B)}. \quad (6)$$

Всі кутові величини, що входять до праві частини (6), відомі з початкових даних і рівні  $a = \pi/2 - \phi$ ,  $c = \pi/2 - \phi_m$ ,  $B = \lambda - \lambda_m$ . Підставляючи їх до (6), отримаємо вираз для кута:

$$\beta_m(\varphi, \lambda) = \arctg \left[ \frac{u_m(\varphi, \lambda)}{v_m(\varphi, \lambda)} \right] = \arctg \left[ \frac{\cos(\varphi) \sin(\lambda - \lambda_m)}{\cos(\varphi_m) \sin(\varphi) - \sin(\varphi_m) \cos(\varphi) \cos(\lambda - \lambda_m)} \right]. \quad (7)$$

Тут для скорочення запису чисельник та знаменник у квадратних дужках позначені функціями  $v_m(\varphi, \lambda)$ ,  $u_m(\varphi, \lambda)$ .

Після диференціювання (7) за координатами  $\varphi$  та  $\lambda$  знаходимо елементи матриці  $\mathbf{G}$

$$g_{\varphi m} = \frac{-\sin(\varphi) \sin(\lambda - \lambda_m) v_m(\varphi, \lambda)}{u_m^2(\varphi, \lambda) + v_m^2(\varphi, \lambda)} - \frac{\cos(\varphi_m) \cos(\varphi) + \sin(\varphi_m) \sin(\varphi) \cos(\lambda - \lambda_m)}{(u_m^2(\varphi, \lambda) + v_m^2(\varphi, \lambda)) \cdot (u_m(\varphi, \lambda))^{-1}}, \quad (8)$$

$$g_{\lambda m} = \frac{\cos(\varphi) \cos(\lambda - \lambda_m) v_m(\varphi, \lambda)}{u_m^2(\varphi, \lambda) + v_m^2(\varphi, \lambda)} - \frac{\sin(\varphi_m) \cos(\varphi) \sin(\lambda - \lambda_m) \cdot u_m(\varphi, \lambda)}{u_m^2(\varphi, \lambda) + v_m^2(\varphi, \lambda)}. \quad (9)$$

У подальшому використовуються формули (3), (4), (5). Отриманий результат буде характеризувати точність визначення місця розташування ДРВ тільки в одній точці на поверхні Землі. Цікавою є загальна просторова картина для показників точності ПМ. Існує кілька способів графічного представлення показників точності в залежності від місця розташування ДРВ. Наприклад, у деяких роботах [1, 3, 5] для цієї мети використовують еліпси похибок або графіки залежності ЛСКП від дальності до ДРВ для різних напрямків. При побудові еліпсів похибок для двокоординатного випадку виходять з того, що дво-вимірний щільність розподілу ймовірностей похибок визначення координат  $\Delta_\varphi, \Delta_\lambda$  підпорядкована нормальному закону. При цьому еліпс похибок відповідає області простору [4], в яку потрапляють похибки з імовірністю не менше величини

$$P_\Delta(k) = 1 - \exp(-k^2/2). \quad (10)$$

Тут величина  $k$  визначає розміри півосей еліпса, які дорівнюють  $k\sigma_\sigma, k\sigma_\lambda$ . Для перерахунку розмірів еліпса, виражених у кутових величинах, у відстань по поверхні Землі слід використовувати формулу сферичної тригонометрії [9] для відстані між точками з координатами  $\varphi, \lambda$  та  $\varphi + k\sigma_\varphi, \lambda + k\sigma_\lambda$ . В результаті отримаємо вираз для ЛСКП в одиницях відстаней

$$\sigma_r = R_3 \arccos \left[ \frac{\sin(\varphi) \sin(\varphi + k\sigma_\varphi) + \cos(\varphi) \cos(\varphi + k\sigma_\varphi) \cos(k\sigma_\lambda)}{\dots} \right]. \quad (11)$$

Наочним способом представлення показників точності є відображення робочих зон [1, 5]. Робочою зоною називають область простору, в межах якої ЛСКП  $\sigma_r$  не перевищує деякого заданого значення  $\sigma_0$ . Іншими словами на кордоні робочої зони вико-

нується рівність  $\sigma_r = \sigma_0$ . Відображення показників точності за допомогою робочих зон дає можливість проводити порівняльний аналіз і оцінювати якість координатної інформації для різних варіантів розміщення пеленгаторів при будь-якому напрямку спостереження (наприклад, у кругову).

Для розрахунку робочих зон можна рекомендувати наступний підхід. Вибирається точка на поверхні Землі з координатами  $\varphi_0, \lambda_0$ , яка буде служити початком відліку параметрів робочої зони. Для цього можна вибрати точку, що відповідає центру розміщення ПМ або координатам одного з пеленгаторів. Далі використовується координатна система азимут-дальність  $\beta, D$ , в якій простір розбивається з кроком  $\delta\beta$  на  $N$  азимутів  $\beta_n (n = 1..N)$ , відлік яких ведеться з точки  $\varphi_0, \lambda_0$  щодо направлення на північ за меридіаном з довготою  $\lambda_0$ . Потім в кожному напрямку  $\beta_n$  знаходиться відстань  $D_n$  по поверхні Землі, при якому виконується така рівність:

$$f(D_n / \beta_n) = \sigma_r(D_n / \beta_n) - \sigma_0 = 0. \quad (12)$$

Шаг  $\delta\beta$  можна вибирати, виходячи з бажаної точності представлення робочої зони. Достатньою можна вважати величину  $\delta\beta = 4^\circ..6^\circ$ . Координати  $\beta_n, D_n$  і є межею робочої зони.

При комп'ютерних розрахунках знайти  $D_n$  при заданому азимуті  $\beta_n$ , що задовольняє рівності (12), можливо різними шляхами. Наприклад, можливо знайти рішення нелінійного рівняння (12), задавши початкове наближення  $D_0$ , чи шляхом зміни  $D$  знаходити точку переходу функції  $f(D/\beta_n)$  через 0. Зазвичай робочі зони розраховуються для декількох значень  $\sigma_0$ . Для проведення обчислень доцільно використовувати наступні додаткові до операційної системи Windows математичні програмні продукти, а саме Mathcad чи Matlab. В додатку Matlab у більш пізніх версіях реалізовано можливість накладення результатів розрахунку робочих зон на географічну карту за допомогою команди `geoplot([φ],[λ])`, що підвищує наочність відображення. При цьому необхідно перейти від координат  $D_n, \beta_n$  до координат  $\varphi_n, \lambda_n$ , використовуючи співвідношення зі сферичної тригонометрії [9].

### Оцінка граничної точності визначення координат при розміщенні пеленгаторів на території України

При створенні ПМ прагнуть виконати наступні суперечливі вимоги [11, 12]:

1. Точність визначення координат ДРВ повинна бути максимально можливою в широкому секторі спостереження (наприклад, у круговій зоні).

2. З точки зору матеріальних витрат число пеленгаторів мережі повинно бути найменшим. Найменшим можна вважати таке число, при якому подальше нарощування кількості пеленгаторів стає

недоцільним внаслідок незначного підвищення точності.

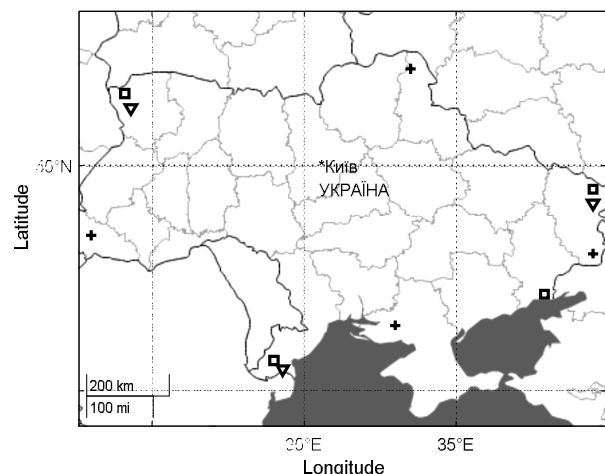
Відзначимо ті обставини, які обмежують можливість щодо виконання зазначених вимог. Відомо, що точність визначення координат залежить від точності пеленгації і відстані між пеленгаторами (бази) [1,2,5,6]. Мінімальні СКП пеленгації обмежені можливостями техніки, яка використовується у ПМ. Чим більше рознесені пеленгатори на місцевості, тим вище точність. Обмеження на просторовий рознос пеленгаторів наземної ПМ обумовлені кінцевими розмірами території, де допускається розміщення пеленгаторів. Іншими словами рознос пеленгаторів не може бути більше розмірів території країни, якщо у ПМ не використовуються корабельні пеленгатори. Виконання другої вимоги пов'язано також з вимогами до зони контролю простору. Як відомо, ПМ з мінімально необхідною кількістю пеленгаторів (два) дозволяє визначати координати з допустимою точністю тільки в двох протилежних секторах шириною приблизно  $\pm 60^\circ$  відносно перпендикуляра до середини лінії бази [1, 2, 7]. Щоб похибки визначення координат були найменшими і робоча зона охоплювала всі напрямки, в складі ПМ необхідно мати декілька пеленгаторів (не менше 3-х) з максимальними відстанями між ними як за широтою, так і за довготою.

Розглянемо можливості виконання зазначених вище вимог відносно території України і оцінимо граничні можливості з визначення координат ДРВ в наземній ПМ. Якщо елементи ПМ розмістити поблизу державного кордону на заході, півночі, сході і на узбережжі, то можна реалізувати найкращі показники точності координатної інформації при будь-якому напрямку на ДРВ. Відзначимо, що протяжність території України від західного кордону до східного становить величину близько 1200 км, а від північного кордону до узбережжя Чорного моря майже в 2 рази менше (близько 670 км). Саме ці величини визначають максимально можливий взаємний рознос пеленгаторів. Якщо усі пеленгатори розташувати поблизу державних кордонів України, то більш високу точність визначення координат слід очікувати для ДРВ, що знаходяться в північному і південному напрямках.

Розглянемо 3 варіанти розміщення пеленгаторів з максимальним рознесенням на території України і оцінимо граничні можливості ПМ по точності визначення координат. Будемо вважати при цьому, що реальна точність пеленгації всіх пеленгаторів однакова і характеризується величиною СКП  $\sigma_\beta = 1,5^\circ$ . Така точність відповідає найкращим зразкам сучасної техніки пеленгації у HF діапазоні. Зокрема, до такої техніки відносяться пеленгатори DDF1GTX фірми Rohde&Shwarz (Германія) [13] і пеленгатор «Восток-ОПК», розроблений Науково-технічним центром радіотехнічних систем Академії наук прикладної радіоелектроніки (м. Харків) [14]. На точність пеленгації істотно впливає середовище поширення радіохвиль (іоносфера), параметри якої можуть змінюватися протягом короткого відрізка часу (наприклад, швидкі завмирання сигналів) [7,

10]. Одним з ефективних способів підвищення точності пеленгації є використання систем з кільцевими антенними решітками великих розмірів (діаметром до 150 м) і кореляційно-інтерферометричного способу вимірювання пеленгів [8, 13, 14], а також багаторазове вимірювання з наступним усередненням результатів [5]. В якості початкових даних при розрахунках робочих зон виберемо  $k^2 = 2$ , що відповідає ймовірності попадання похибок  $P_\Delta = 0,63$  у еліпс з напіввісьями  $k\sigma_\sigma, k\sigma_\lambda$ .

На рис. 2 відображені гіпотетичні варіанти розташування пеленгаторів у прикордонних районах України у вигляді спеціальних символів.

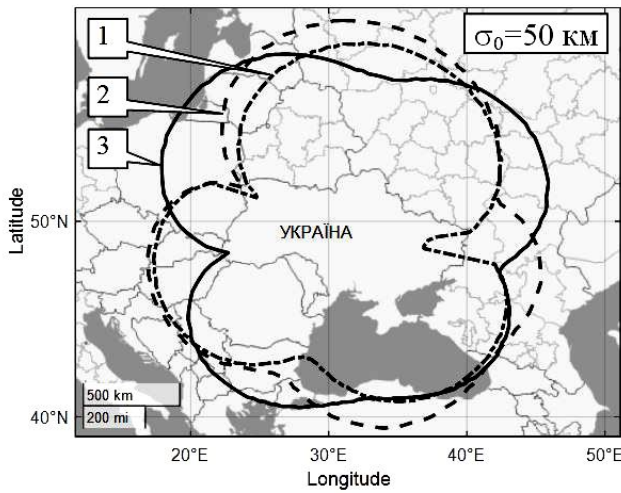


**Рис. 2.** Варіанти розміщення пеленгаторів на території України  
(**Fig. 2.** Location variants of direction finders on the territory of Ukraine)

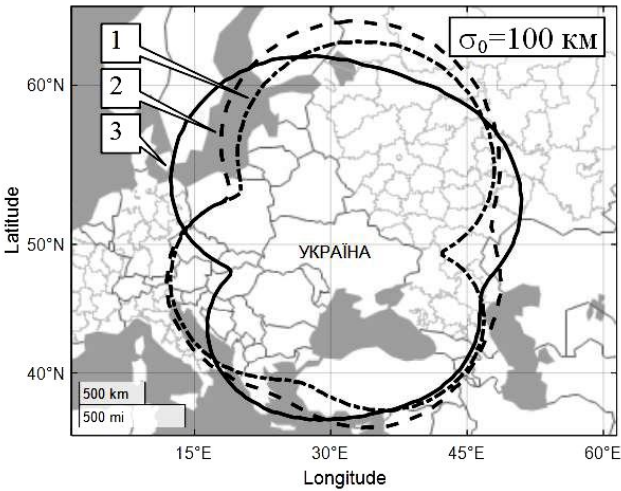
Варіант №1 відповідає ПМ з 3-х пеленгаторів, розташованих у вершинах трикутника і позначених символом  $\nabla$ . Один з пеленгаторів встановлений біля північно-західного кордону, інший - на північному-сході, а третій - на південному сході. Варіант №2 позначений квадратами  $\square$  і відрізняється від варіанту №1 тим, що доданий 4-ий пеленгатор з місцем розташування на південному сході. Варіант №3 (символ  $+$ ) відноситься до ПМ з 4-х пеленгаторів, позиції яких знаходяться поблизу кордонів на заході, сході, півночі і півдні країни.

Результати розрахунків робочих зон нанесено на географічну карту і наведено на рис. 3 – 5. На цих рисунках відображені робочі зони для трьох варіантів побудови ПМ для значень  $\sigma_0 = 50, 100$  та 200 км. Номера кривих вказують на номери варіантів. З рисунків видно, що відмінності робочих зон за розмірами несуттєві. Тут найбільший внесок в точність дають два пеленгатора, розташовані біля західного та східного кордонів.

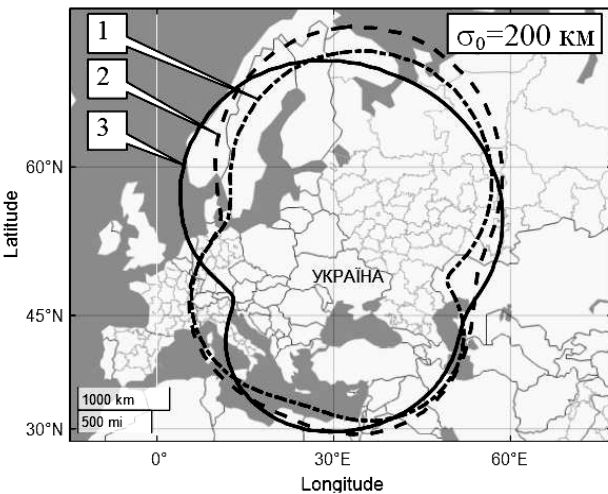
Наведені дані ілюструють можливості ПМ за точністю визначення координат при знаходженні ДРВ в різних регіонах Європи. Так, зокрема, координати кораблів у Чорному морі з випромінюючими радіостанціями HF діапазону можуть визначатися з ЛСКП менше 50 км.



**Рис. 3.** Робочі зони для трьох варіантів ПМ при  $\sigma_0=50$  км (Fig. 3. Working areas for three variants of direction finding networks at  $\sigma_0=50$  km)



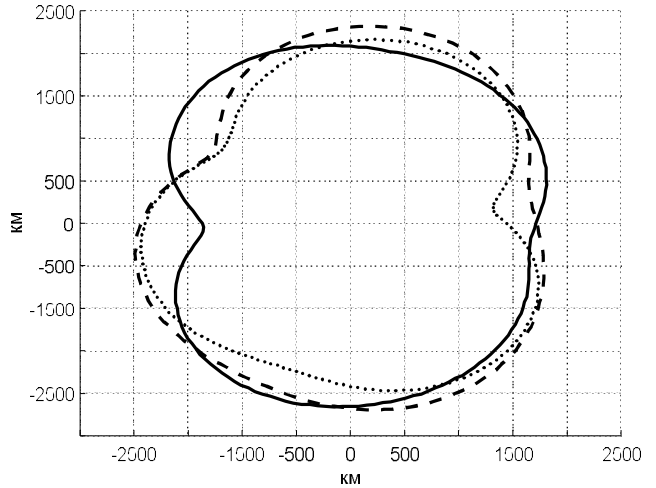
**Рис. 4.** Робочі зони для трьох варіантів ПМ при  $\sigma_0=100$  км (Fig. 4. Working areas for three variants of direction finding networks at  $\sigma_0=100$  km)



**Рис. 5.** Робочі зони для трьох варіантів ПМ при  $\sigma_0=200$  км (Fig. 5. Working areas for three variants of direction finding networks at  $\sigma_0=200$  km)

Для кораблів в Середземному морі ця величина може мати значення до 200 км.

Щоб оцінити розміри територій, які покривають робочі зони, на рис. 6 наведені ті ж дані, що і на попередньому рисунку, але в координатах відстаней по поверхні Землі. Точкою відліку відстаней обраний центр України (Черкаська обл.;  $\phi_0 = 49^\circ$ ,  $\lambda_0 = 31^\circ$ ).



**Рис. 6.** Робочі зони ПМ при  $\sigma_0=200$  км у координатах відстаней до ДРВ (Fig. 6. Working areas of direction finding networks at  $\sigma_0=200$  km in coordinates distance to radio sources)

Як і слід було очікувати, найбільша точність координатної інформації для всіх варіантів досягається у північному і південному напрямках. Результати розрахунків для ПМ з 5 пеленгаторами, показали, що додаткове використання 5-го пеленгатора незначно покращує точність визначення місця розташування.

Для кількісного порівняння варіантів в таблиці 1 наведені площі робочих зон, представлених на рис. 3-5.

З наведених даних видно, що найбільшу площу має робоча зона пеленгаторної мережі, що побудована за варіантом №2.

Однак її перевищення над іншими не настільки істотне, щоб відкинути можливість використання варіантів №1, 3.

**Таблиця 1 – Площі робочих зон для трьох варіантів пеленгаторної мережі при трьох значеннях  $\sigma_0$**

$\sigma_0$ , км	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3
$\sigma_0=50$	$2,52 \cdot 10^6$ км <sup>2</sup>	$3,1 \cdot 10^6$ км <sup>2</sup>	$2,95 \cdot 10^6$ км <sup>2</sup>
$\sigma_0=100$	$5,44 \cdot 10^6$ км <sup>2</sup>	$6,37 \cdot 10^6$ км <sup>2</sup>	$6 \cdot 10^6$ км <sup>2</sup>
$\sigma_0=200$	$11,3 \cdot 10^6$ км <sup>2</sup>	$13 \cdot 10^6$ км <sup>2</sup>	$12,1 \cdot 10^6$ км <sup>2</sup>

Наведені результати дозволяють зробити висновок про те, що варіант №1 (три пеленгатора в складі пеленгаторної мережі) може виявитися кра-

щим, оскільки він забезпечує найменші матеріальні витрати при незначних втратах в точності в порівнянні з використанням 4 пеленгаторів.

### Висновки

Розрахунки робочих зон пеленгаторної мережі HF діапазону при розміщенні її на території України проведено для випадку найменших реальних похибок пеленгації, а взаємний просторовий рознос пеленгаторів обраний гранично допустимим.

Тому можна вважати, що результати розрахунків відображають граничні можливості по точності визначення координат ДРВ для такої пеленгаторної мережі при мінімальному числі пеленгаторів (3 або 4). Наведена вище методика обчислення робочих

зон дозволяє для забезпечення найкращих показників точності вибирати конкретний варіант розміщення пеленгаторів на території країни з урахуванням впливу всіх факторів (придатності позицій, наявності під'їзних шляхів, умов розміщення обслуговуючого персоналу і ін.). Вона може бути також використана для інших систем пасивної радіолокації з пеленгаційним методом визначення координат, коли необхідно враховувати сферичний характер Землі.

Зокрема, до такої системи можна віднести два і більше літака повітряної розвідки з пеленгаторами на борту, а також один літак або безпілотний апарат, що здійснюють визначення координат методом багаторазової пеленгації на маршруті польоту [6, 7].

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. Москва: Гос. изд. оборонпром, 1953. 53 с.
2. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. Москва: Радио и связь, 1981. 416 с.
3. Don J. Torrieri. Statistical Theory of Passive Location Systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1984. Vol. AES-20, no. 2. P. 183–198.
4. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. Москва : Радио и связь, 1993. 416 с.
5. Кукес И.С., Старик М.Е. Основы радиопеленгации. Москва: Сов. радио, 1964. 640 с.
6. Ankit Jain. Detection on HF radio transmitters using passive geolocation techniques. Brest, France, January, 2019. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02133926>.
7. Introduction into Theory of Direction Finding. URL: [https://cdn.rohde-schwarz.com/us/campaigns\\_2/a\\_d/Introduction-Into-Theory-of-Direction-Finding.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/us/campaigns_2/a_d/Introduction-Into-Theory-of-Direction-Finding.pdf).
8. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства. Москва : Горячая линия-Телеком, 2010. 624 с.
9. Степанов Н.Н. Сферическая тригонометрия. Москва : ОГИЗ, 1948. 155 с.
10. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Москва : Связь, 1972. 336 с.
11. Мельников Ю.П. Воздушная радиотехническая разведка (методы оценки эффективности). Москва : Радиотехника, 2005. 304 с.
12. Мельников Ю.П., Попов С.В. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения. Москва : Радиотехника, 2008. 432 с.
13. R&S@DDF1GTX High-Speed Scanning HF Direction Finder. URL: [https://www.rohde-schwarz.com/ua/product/ddf1gtx-productstartpage\\_63493-148040.html](https://www.rohde-schwarz.com/ua/product/ddf1gtx-productstartpage_63493-148040.html).
14. Автоматический обнаружитель-пеленгатор сигналов HF диапазона частот «Восток-ОПК». URL: <http://www.nterts.com/assets/восток-опк3.pdf>.

### REFERENCES

1. Saibel, A.H. (1953), *Osnovy teorii tochnosti radiotekhnicheskikh metodov mestoopredeleniya [Fundamentals of the theory of precision radio positioning methods]*, State publishing house obronprom, Moscow, 53 p.
2. Shirman, Ya.D. and Manzhos, V.N. (1981), *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomekh [Theory and technique of processing radar information on interference background]*, Radio and communication, Moscow, 416 p.
3. Don, J. Torrieri. (1984), “Statistical Theory of Passive Location Systems”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-20, no. 2, pp. 183–198.
4. Chernyak, V.S. (1993), *Mnogopozitsionnaya radiolokaciya [Multi-position radar]*, Radio and communication, Moscow, 416 p.
5. Kukes, I.S. (1964), *Osnovy radiopelengacii [Fundamentals of radio direction finding]*, Soviet radio, Moscow, 640 p.
6. Ankit, Jain (2019), *Detection on HF radio transmitters using passive geolocation techniques*, available to: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02133926>.
7. (2019), *Introduction into Theory of Direction Finding*, available to: [https://cdn.rohde-schwarz.com/us/campaigns\\_2/a\\_d/Introduction-Into-Theory-of-Direction-Finding.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/us/campaigns_2/a_d/Introduction-Into-Theory-of-Direction-Finding.pdf).
8. Rembovskiy, A.M., Ashykhmy, A.V. and Kozjmy, V.A. (2010), *Radyomonytoryng – zadachy, metody, sredstva [Radio monitoring - tasks, methods, tools]*, Hotline Telecom, Moscow, 624 p.
9. Stepanov, N.N. (1948), *Sfericheskaya trigonometriya [Spherical trigonometry]*, OGIZ, Moscow, 155 p.
10. Doluhanov, M.P. (1972), *Rasprostranenie radiovoln [Radio waves propagation]*, Svyaz, Moscow, 336 p.
11. Meljnykov, Ju.P. (2005), *Vozdushnaya radyotekhnicheskaya razvedka (metody ocenky effektivnosti) [Aerial radio technical intelligence (methods of assessing effectiveness)]*, Radio engineering, Moscow, 304 p.

12. Meljnykov, Ju.P. and Popov, S.V. (2008), *Radiotekhnicheskaya razvedka. Metody ocenki effektivnosti mestoopredeleniya istochnikov izlucheniya [Electronic intelligence. Evaluation methods efficiency positioning the radiation sources]*, Radio engineering, Moscow, 432 p.
13. R&S®DDF1GTX High-Speed Scanning HF Direction Finder, available to: [https://www.rohde-schwarz.com/ua/product/ddf1gtx-productstartpage\\_63493-148040.html](https://www.rohde-schwarz.com/ua/product/ddf1gtx-productstartpage_63493-148040.html).
14. *Avtomaticheskij obnaruzhitel'-pelengator signalov HF diapazona chastot «Vostok-OPK» [Automatic Direction Finder detector-signal HF band "Vostok-OPK"]*, available to: [http://www.rtv-pvo-gsvg.narod.ru/doc/Prv\\_13.pdf](http://www.rtv-pvo-gsvg.narod.ru/doc/Prv_13.pdf).

Received (Надійшла) 18.11.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.02.2021

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Кобзев Анатолій Васильович** – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

**Anatolij Kobzev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, PSenior Research Associate Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [tobzev@ukr.net](mailto:tobzev@ukr.net); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3604-7770>.

**Мурзін Михайло Вячеславович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

**Mykhailo Murzin** – Candidate of Technical Sciences, Professor, Research Associate Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [mikhailmwork@gmail.com](mailto:mikhailmwork@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5093-0551>.

#### Показатели точности определения координат источников радиоизлучения в пеленгаторной сети HF диапазона

А. В. Кобзев, М. В. Мурзин

**Аннотация.** Проводится оценка предельных возможностей по точности определения координат источников радиоизлучения (ИРИ) в пеленгаторной сети HF диапазона при размещении ее на территории Украины. Выводятся расчетные соотношения для вычисления рабочих зон определения координат ИРИ и обсуждаются результаты расчетов при минимально возможном числе пеленгаторов сети (3,4), обеспечивающих круговой контроль пространства. Результаты расчетов рабочих зон отражают предельные возможности по точности определения координат, поскольку характеристики сети (пространственный разнос пеленгаторов и реальная точность пеленгации) выбраны предельно возможными.

**Ключевые слова:** пеленгаторная сеть; граничные возможности по точности; координаты источников радиоизлучения; размещение пеленгаторов; контроль радиоизлучений.

#### Indicators of accuracy for determining the coordinates of radio emission sources in the short wave direction finding network

Anatolij Kobziev, Mykhailo Murzin

**Abstract.** Direction finding networks have found application in radio monitoring, radio intelligence and passive radar systems. The operation of the direction-finding network in the short-wave range has a number of distinctive features, namely, long range of direction finders (up to several thousand km) due to ionospheric propagation of radio waves and high sensitivity of narrow-band signal receivers. In addition, the distance between direction finders can be hundreds or thousands of kilometers. Therefore the calculations should be carried out due to the location of the direction finders and radio sources on a spherical surface. In this work, analytical relationships are obtained for calculating the accuracy indicators of the estimation of coordinate information (latitude and longitude) at the output of the direction finding network in a rather general form in relation to the features of the short-wave range. The problem is solved in a geographic coordinate system for an arbitrary number of direction finders (two at least) and with their arbitrary location on the surface of Earth. To carry out a comparative analysis and assess the quality of coordinate information for various options for placing direction finders, it is proposed to display accuracy indicators using working zones (for example, round). The use of working areas allows a visual assessment on the map overall spatial pattern for accuracy indicators direction-finding network. The results of the calculation of working areas direction-finding network short-wave when placing it on the territory of Ukraine in the case of the smallest real errors direction-finding, and a mutual separation distance finders maximum permissible selected. The calculation results reflect the limiting possibilities for the accuracy of determining the coordinates of radio emission sources for such a direction finding network with a minimum number of direction finders (3 or 4). The given method of calculating working zones allows for the implementation of the best accuracy indicators to choose a specific option for placing direction finders on the territory of the country, taking into account the influence of all factors (approach of positions, availability of access roads, conditions for accommodating service personnel, etc.). As an example, the work considers 3 options for the location of direction finders with the maximum separation on the territory of Ukraine. The developed technique can also be used for other passive radar systems with direction finding coordinates, when it is necessary to take into account the spherical form of the Earth. Such a system can include two or more aerial reconnaissance aircraft with direction finders on board, as well as one aircraft or unmanned vehicle that determines coordinates by the method of multiple direction finding on the flight route.

**Keywords:** direction finding network; boundary possible accuracy; coordinates of radio emission sources; placement of direction finders; radio emission control.