

М. Ф. Пічугін, В. А. Шуренок, О. В. Самчишин, С. В. Кондрашов

МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ РАДІОМОНІТОРИНГУ НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСУВАННЯ ПАСИВНИХ МЕТОДІВ МІСЦЕВИЗНАЧЕННЯ

У статті для оцінювання функціонування складної багатопозиційної системи радіомоніторингу з різними методами місцевизначення запропоновано показник функціональної стійкості – ймовірність виконання завдань пеленгування із заданою якістю; розроблено методика забезпечення її функціональної стійкості на основі комплексування пасивних методів місцевизначення.

Постановка проблеми. Існує низка показників, за якими оцінюється ефективність складних систем. Одним з них є показник функціональної стійкості [6] – ймовірність виконання системою завдань з хоча б мінімальними необхідними показниками якості.

Доцільність застосування саме цього показника для системи радіомоніторингу визначається наявністю великої кількості зовнішніх впливів (відмови, збої, пошкодження, помилки обслуговуючого персоналу, динамічна зміна завдань і т. п.), що унеможлиблює їх врахування при оцінюванні ефективності за іншими показниками, та існуванням основного показника якості – похибки визначення координат.

З визначення функціональної стійкості та особливостей функціонування системи радіомоніторингу випливають основні вимоги до її функціональної стійкості.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Особливістю розвитку сучасних складних систем є оптимізація їх характеристик за певним критерієм ефективності [1]. Він повинен дозволити оцінити і порівняти всі наслідки створення і використання системи, які проявляються в її тактико-техніко-економічних характеристиках. Вибір критерію оцінки оптимальності набуває особливої актуальності при дослідженні таких складних систем, як багатопозиційні системи радіомоніторингу.

Існує ряд критеріїв [3], які оцінюють ефективність системи відповідно до різних властивостей системи (живучість, надійність і т. д.) і при різних впливах на неї (експлуатаційні, бойові пошкодження, помилки обслуговуючого персоналу і т. п.). Проте жодна з цих властивостей (або їх комплексне поєднання) не відображає того, що розуміється під функціональною стійкістю системи, оскільки не висвітлює одночасно активний характер властивості функціональної стійкості при дії навіть невідомих збурень, “осмислений” відбір тих якостей, які повинні бути збережені і за рахунок чого це збереження може бути одержано [6].

Огляд друкованих видань показав що, застосування даної теорії [2] не розглядалось для забезпечення функціональної стійкості системи радіомоніторингу.

Формулювання завдання дослідження

Вимоги щодо забезпечення функціональної стійкості системи радіомоніторингу

1. Забезпечення в районі моніторингу достатньої кількості постів, необхідних для визначення місцеположення джерел радіовипромінювань (ДРВ) на поверхні Землі або в просторі, описуються як

$$N_X > N_{Xmin}; N_Y > N_{Ymin}, \quad (1)$$

де N_X, N_Y – кількість постів, що використовують кутомірний, різницево-дальномірний методи;

N_{Xmin}, N_{Ymin} – мінімальна необхідна кількість постів, що використовують кутомірний, різницево-дальномірний методи.

2. Працездатність усіх засобів радіомоніторингу, що обчислюється за формулами:

$$\forall x_i \in X \Leftarrow \omega_i(\tau) = 1, \tau \in [0, t]; \quad \forall y_j \in Y \Leftarrow \upsilon_j(\tau) = 1, \tau \in [0, t], \quad (2)$$

де $X = \{x_i\}, Y = \{y_j\}$ – множина постів, що використовують кутомірний, різницево-дальномірний методи;

$\omega(\tau); \upsilon(\tau)$ – булеві функції, що набувають значення 1, якщо пост, що використовує кутомірний, різницево-дальномірний методи, знаходиться в працездатному стані, і 0 – у непрацездатному стані;

τ – поточний час;

t – час експлуатації.

3. Розміщення постів, що виключає перешкоди прийому сигналів (вплив перешкод рельєфу та ін.), визначаються у такий спосіб:

$$\forall x_i \in X \Leftarrow \lambda_i(\tau) = 1, \tau \in [0, t]; \quad \forall y_j \in Y \Leftarrow \kappa_j(\tau) = 1, \tau \in [0, t], \quad (3)$$

де $X = \{x_i\}, Y = \{y_j\}$ – множина працездатних радіоліній пеленгаторних постів, що використовують кутомірний, різницево-дальномірний методи;

$\lambda(\tau); \kappa(\tau)$ – булеві функції, що набувають значення 1, якщо радіолінія, що використовує кутомірний, різницево-дальномірний методи, знаходиться в працездатному стані, і 0 – у непрацездатному стані;

4. Можливість вибору розміщення постів з метою підвищення точності визначення місцеположення ДРВ описується як

$$\forall Mx_i \in MX \Leftarrow \chi_i(\tau) = 1, \tau \in [0, t]; \quad \forall My_j \in MY \Leftarrow \delta_j(\tau) = 1, \tau \in [0, t], \quad (4)$$

де $\chi(\tau); \delta(\tau)$ – булеві функції, що набувають значення 1, якщо мережа Mx_i з множини всіх мереж MX , що використовують кутомірний метод, і якщо мережа My_j з множини всіх мереж MY , що використовують різницево-дальномірний метод, мають можливість змінювати положення з метою підвищення точності визначення координат, 0 – в іншому випадку.

5. Необхідна точність місцевизначення ДРВ за похибкою визначення місцеположення ДРВ відповідно до географічної довготи, широти, висоти $\sigma_\lambda, \sigma_\varphi, \sigma_n$:

$$\sigma_\lambda \leq \sigma_\lambda^{max}, \quad \sigma_\varphi \leq \sigma_\varphi^{max}, \quad \sigma_n \leq \sigma_n^{max}. \quad (5)$$

Виконання умови (5) – випадкова подія, ймовірність якої $P_{нел}$ називається ймовірністю вирішення завдання пеленгування із заданою якістю. Значення цього показника визначається як

$$P_{нел} \geq P_{нел}^{min}. \quad (6)$$

Умова (6) є необхідною, але недостатньою для функціональної стійкості системи радіомоніторингу, ознакою якої вона є.

Справді, можливий такий стан системи, при якому дотримання цієї умови задовольнятиме за точністю і якістю, але лише до появи нештатної ситуації, оскільки не буде можливості парирувати її наслідки, тобто система буде працездатною, але не функціонально стійкою.

Нехай A – подія, яка полягає в тому, що система радіомоніторингу має властивість парирувати наслідки обумовлених нештатних ситуацій, тоді ймовірність цієї події $P(A) = P_{нар}$.

Виходячи із попередніх міркувань, можна записати, що

$$A = A_{над} \cap A_{унр}; \quad A \cap (\overline{A_{над}} \cup \overline{A_{унр}}) = \emptyset, \quad (7)$$

де $A_{над}$ – подія, яка полягає в наявності надмірності;

$A_{унр}$ – подія, яка полягає в можливості керувати надмірністю.

Тоді $P(A_{над}) = P_{над}$ – ймовірність наявності надмірності у системі; $P\left(\frac{A_{унр}}{A_{над}}\right) = P_{нар}$ – ймовірність керування надмірністю.

Отже, умова функціональної стійкості системи радіомоніторингу зображується як

$$\begin{cases} P_{нел} \geq P_{нел}^{min}, \\ P_{нар} \geq P_{нар}^{min}. \end{cases} \quad (8)$$

Таким чином, знаходження системи радіомоніторингу у стані, що забезпечує виконання основних функцій (можливо, з погіршенням якості) є складною подією, а ймовірність знаходження системи у стані функціональної стійкості залежить від ймовірностей множини подій, деякими з яких можливо керувати в певних межах.

Шляхи підвищення функціональної стійкості системи радіомоніторингу

Відповідно до методологічних основ забезпечення функціональної стійкості [6], напрямками її підвищення для системи радіомоніторингу обрані такі: створення математичних моделей визначення координат з можливістю комплексування методів місцевизначення з використанням точних моделей земної поверхні; оптимальний вибір постів радіомоніторингу, що задіяні для обчислення; розробка практичних методик розрахунку координат та побудови їх на карті; створення алгоритмів дій системи у нештатних ситуаціях.

З умови (5) випливає, що шляхом підвищення першого параметра ($P_{нел}$) є зменшення похибки визначення координат. У існуючих системах радіомоніторингу точність визначення координат ДРВ не досягає теоретично можливої через неавтоматизацію процесу їх визначення, застосування плоских проекцій карт. Для їх усунення необхідно створити програмно-алгоритмічне забезпечення, що автоматизує побудову координат та враховує неплоскі моделі земної поверхні.

Шлях підвищення ймовірностей парирування та вирішення завдання визначення координат із заданою якістю – створення алгоритмів дій у нештатних ситуаціях (управління різними видами надмірності залученням додаткових постів, методів визначення координат та їх комплексування); оптимального розміщення постів радіомоніторингу та алгоритму їх застосування.

Реалізація функціонально стійкої системи радіомоніторингу здійснюється за рахунок створення відповідної методики, що ґрунтується на математичних моделях: комплексування застосування засобів кутомірного та різницево-далекомірного методів місцевизначення; визначення координат (з використанням сферичних моделей земної поверхні); обчислення координат з використанням точних моделей земної поверхні.

Виклад основного матеріалу

Модель визначення координат з використанням точних моделей земної поверхні

Для визначення місцеположення (МП) ДРВ вибирається модель земної поверхні та система координат, які б забезпечували похибку визначення МПДРВ, що обумовлена похибкою виміру параметра (пеленгу або часу надходження сигналу). Водночас математичний опис моделі земної поверхні повинен бути порівняно простим для реалізації швидкого обчислення координат з її використанням.

У варіанті [1], коли необхідно враховувати кривизну земної поверхні, обчислюють значення аплікати z :

$$z = (x^2 + y^2)/(2R_s), \tag{9}$$

де R_s – радіус Землі;

x, y – координати, розраховані в площині XOY прямокутної системи координат;

z – апліката, тобто висота точки з координатами (x, y) над поверхнею Землі.

Формула 9 передбачає сферичну модель земної поверхні, оскільки задано постійне значення R_s (середнє або таке, що відповідає дійсному значенню радіуса Землі в точці стояння поста радіомоніторингу). Проте значення радіуса Землі відхиляється від середнього в межах $\pm 10,5$ км [4] і співмірне зі значенням радіальних похибок для існуючих систем радіомоніторингу.

Похибка, що вноситься моделлю Землі, повинна бути значно меншою інструментальної похибки визначення параметра. За модель земної поверхні обрано еліпсоїд Красовського [4].

На рис. 1 зображено переріз еліпсоїда і сфери зі спільним центром. Як видно із зображення, кутові координати B_x точок x_1 і x_1' є однаковими як для сферичної моделі Землі, так й еліпсоїда за умови, що приріст dx_1 , який є відрізком на прямій, утвореній площиною перерізу і площиною, дотичною до сфери в точці x , відповідає однаковому кутовому приросту dB_x для точок x_1 і x_1' на поверхні сфери та на поверхні еліпсоїда відповідно. Тобто географічні координати збігаються з геодезичними при рівності радіуса сфери поточному радіусу еліпсоїда.

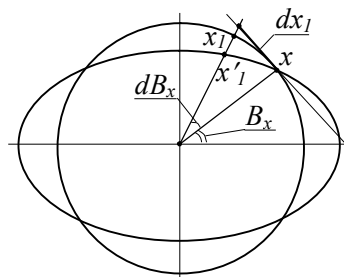


Рис. 1. Переріз сфери та еліпсоїда

Радіус Землі при використанні еліпсоїда як її моделі є змінним і обчислюється за формулою:

$$R_z = a - k \cdot B, \quad (10)$$

де a – довжина великої півосі еліпсоїда;

B – широта, якій відповідає радіус;

k – коефіцієнт.

$$k = \frac{a - b}{90^\circ}, \quad (11)$$

де b – довжина малої півосі еліпсоїда.

Модель визначення місцеположення ДРВ кутомірним методом

1. Постановка задачі. Нехай дано кутомірну систему визначення МПДРВ з двома пеленгаційними постами A, C з географічними координатами $A(B_1, L_1), C(B_2, L_2)$. У точці $O(B_0, L_0)$ знаходиться ДРВ з невідомими координатами на поверхні Землі, Q_A, Q_C – пеленги на ДРВ з пеленгаційних постів A, C . Необхідно знайти географічні координати точки $O(B_0, L_0)$.

2. Розв’язання задачі. Припустимо, що поверхня Землі є правильною сферою. Пости A, C лежать на її поверхні в достатньо малих площинах S_A і S_C , які перпендикулярні до прямої, що з’єднує центр Землі і відповідні пеленгаційні пости (рис. 2).

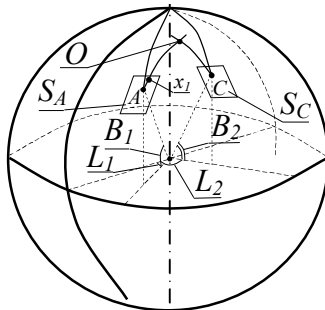


Рис. 2. Кутомірна система визначення координат на сфері

У площинах S_A і S_C лінії положень ДРВ і лінії, що вказують напрямком на північ, які в загальному випадку є дугами на поверхні Землі, можна вважати прямими.

Нехай x_1 (рис. 2) – точка, що лежить у площині S_A на прямій лінії положення на деякій відстані від точки $A(B_1, L_1)$, що дорівнює dx_1 (рис. 3). Відповідно прирости відстані в площині S_A у напрямку на північ до точки x_1 – dB_1' ; у перпендикулярному напрямку dL_1' . З прямокутного трикутника $AA'A''$ знаходимо:

$$dB_1' = dx_1 \cdot \cos Q_A, \quad (12)$$

$$dL_1' = dx_1 \cdot \sin Q_A. \quad (13)$$

Обчислюється приріст географічної широти dB_1 у радіанній мірі. Оскільки dB' – довжина дуги на поверхні Землі, то

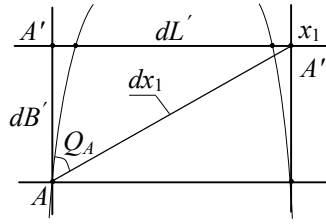


Рис. 3. Обчислення приростів

$$dB_1 = \left(\frac{dB_1'}{R_3} \right), \quad (14)$$

де R_3 – радіус Землі.

При обчисленні приросту довготи враховується явище зближення меридіанів, що пояснене на рис. 4.

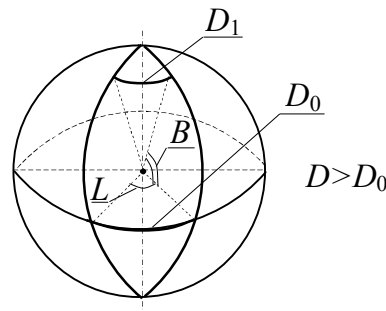


Рис. 4. Зближення меридіанів

Зближення меридіанів полягає у зменшенні довжини дуги, утвореної на поверхні Землі перетином двох площин меридіанів ($\Delta L = const$) і площиною, паралельною екватору, зі збільшенням широти B .

Тому приріст довготи у радіанній мірі обчислюється

$$dL_1 = \left(\frac{dL_1'}{R_3} \right) \cdot k_3, \quad (15)$$

де k_3 – коефіцієнт зближення меридіанів, що дорівнює

$$k_3 = \frac{R_3(B_1) \cdot \cos B_1}{R_3(B_2) \cdot \cos B_2}, \quad (16)$$

де $R_3(B_1)$, $R_3(B_2)$ – радіуси Землі залежно від широти (рис. 1) для еліпсоїда. Для випадку сфери k_3 обчислюється таким чином:

$$k_3 = \frac{\cos B_1}{\cos B_2}. \quad (17)$$

Для точки x_2 , що лежить у площині S_A на прямій лінії положення, для якої $dx_2 = 2dx_1$, аналогічно обраховуються прирости на площині:

$$dB_2' = dx_2 \cdot \cos Q_A; \quad dL_2' = dx_2 \cdot \sin Q_A \quad (18)$$

та прирости кутових координат:

$$dB_2 = \left(\frac{dB_2'}{R_3} \right); \quad dL_2 = \left(\frac{dL_2'}{R_3} \right) \cdot k_3. \quad (19)$$

Таким чином, географічні координати двох точок лінії положення ДРВ на поверхні Землі з поста A визначаються формулами:

$$x_1(B_1 + dB_1; L_1 + dL_1); \quad x_2(B_2 + dB_2; L_2 + dL_2). \quad (20)$$

Аналогічно знаходиться достатня кількість координат точок лінії положення ДРВ з постів A та B у межах робочої зони.

Координати точок, які належать різним лініям положення і максимально збігатимуться, але з похибкою, не більшою ніж та, що зумовлена кроком розбиття dx_1 , і будуть шуканими географічними координатами ДРВ $O(B_0, L_0)$.

Для переходу від сферичної моделі Землі до еліпсоїда у формулах (14), (15), (19) визначається R_3 за формулою (7) залежно від широти (рис. 1).

3. Вимоги до параметрів обчислень.

Необхідно визначити мінімальне значення приросту dx_1 та максимальне значення dx_{max} , які необхідні для проведення обчислень координат точок ліній положення. Приріст dx_1 залежить від значення R_{min} – мінімальної відстані, на якій потрібно визначити МПДРВ з похибкою, що наближається до похибки вимірювання пеленга σ_Q , dx_{max} залежить від значення R_{max} – відстані від пеленгаційного поста до дальньої межі робочої зони.

На рис. 5 зображено сектор перетину земної кулі площиною, що проходить через центр Землі, та лінію положення на її поверхні.

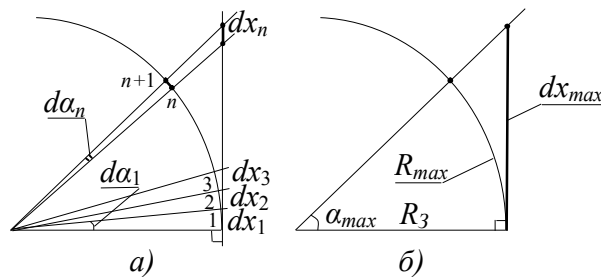


Рис. 5. Взаємозв'язок R_{min} , R_{max} з dx_1 , dx_{max}

Точки 1, 2, ..., n , $(n+1)$ – точки на лінії положення. Відрізки $dx_1 =, dx_2 =, \dots dx_n =$ – значення мінімального приросту. Кути $d\alpha_1 \neq, d\alpha_2 \neq, \dots d\alpha_n =$ – кути приросту. Відрізок 1–2 на поверхні Землі дорівнює значенню кроку розбиття dx_1 на відстані R_{min} і знаходиться (рис. 6) як

$$dx_1 = 2R_{min} \cdot \operatorname{tg} \frac{\sigma_Q}{2}. \quad (21)$$

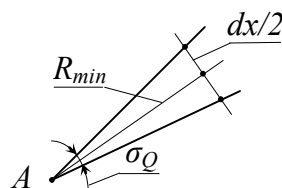


Рис. 6. Похибка лінії положення

Кут $d\alpha_1$ у радіанній мірі обчислюється як

$$d\alpha_1 = \frac{dx_1}{R_3}. \quad (22)$$

Щоб не обчислювати R_3 для кожного значення dx , взято його максимальним: $R_3 = \alpha$, де α – велика піввісь еліпсоїда Красовського, тоді

$$d\alpha_1 = \frac{dx_1}{a}. \quad (23)$$

Завдяки цьому крок розбиття dx_1 буде меншим, що забезпечить вищу точність визначення кутових координат. Крім того, справедливий вираз (рис. 5).

$$\lim_{n \rightarrow \infty} dx_n = const; \quad \lim_{n \rightarrow \infty} d\alpha_n = 0. \quad (24)$$

Перший крок розбиття dx_1 забезпечує на поверхні Землі приріст відстані dx_1 , а наступні – ще менші відстані, отже, зі збільшенням дальності частота точок лінії положення на поверхні Землі, для яких обчислені географічні координати, збільшується, а точність обчислень підвищується.

За допомогою рис. 5 (б) обчислено dx_{max} – такий сумарний приріст, при якому координати лінії положення виходять за межі робочої зони пеленгаційного поста (відстань перевищить R_{max}).

Кут α_{max} у радіанній мірі обчислюється як

$$\alpha_{max} = \frac{R_{max}}{R_3}, \quad (25)$$

де R_3 – радіус Землі. Візьмемо $R_3 = b$, де b – мала піввісь еліпсоїда Красовського, тоді

$$\alpha_{max} = \frac{R_{max}}{b}. \quad (26)$$

Таке значення α_{max} гарантовано забезпечить визначення координат точок лінії положення в межах робочої зони незалежно від розташування пеленгаційного поста. Звідси

$$dx_{max} = tg\alpha_{max} \cdot R_3, \quad (27)$$

де R_3 – радіус Землі в точці стояння пеленгаційної станції.

4. Обчислення радіальної похибки визначення координат ДРВ здійснюється аналогічно визначенню координат ДРВ, але за умови знаходження координат перетину не ліній положень, а їх максимальних відхилень, що обумовлюються похибкою визначення пеленга σ_Q (рис. 7).

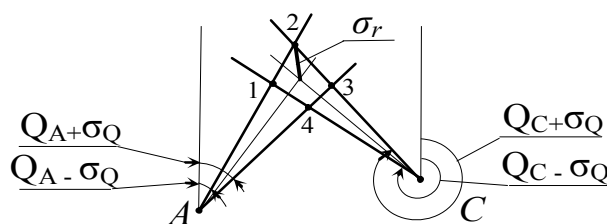


Рис. 7. Визначення радіальної похибки

Таким чином, для двох ліній положення визначається чотири значення координат перетину максимально відхилених (на значення σ_o) ліній положення. Найбільша відстань між цими точками та центром і буде радіальною похибкою визначення МПДРВ.

Математична модель визначення ДРВ різницево-дальномірним методом

1. Постановка задачі. Різницево-дальномірна система визначення МПДРВ з трьома постами радіомоніторингу $A(B_1, L_1), C(B_2, L_2), D(B_3, L_3)$ на поверхні Землі утворює дві бази AC, DC . Точка $O(B_0, L_0)$ – ДРВ на земній поверхні з невідомими координатами. Відомі різниці відстаней проходження сигналу від ДРВ до поста A та C ; від ДРВ до поста D та C : $\Delta r_{AC}, \Delta r_{DC}$ відповідно. Необхідно визначити координати ДРВ різницево-дальномірним методом.

2. Розв’язання. Нехай задано однобазову гіперболічну систему визначення МПДРВ на площині (рис. 8): XOY – система координат; AC – база, симетрична відносно осі OY , що належить осі OX .

За допомогою гіперболічного методу за наявності лише однієї бази визначається множина координат точок ліній положення.

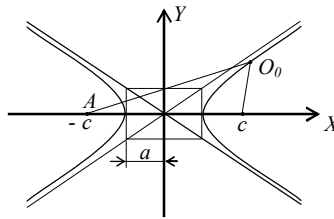


Рис. 8. Визначення лінії положення гіперболічним методом

Рівняння лінії положення ДРВ залежно від Δr_{AC} мають вигляд:

$$y = \pm \sqrt{b^2 \cdot \left(\frac{x^2}{a^2} - 1\right)}, \quad x \in (\alpha, \infty) \text{ при } \Delta r_{AC} > 0, \tag{28}$$

$$y = \pm \sqrt{b^2 \cdot \left(\frac{x^2}{a^2} - 1\right)}, \quad x \in (-\infty, \alpha) \text{ при } \Delta r_{AC} < 0, \tag{29}$$

де x, y – координати точок ліній положення;

$$a = \left| \frac{\Delta r_{AC}}{2} \right|; \quad b^2 = c^2 - a^2 \quad c = \frac{AC}{2}, \tag{30}$$

де Δr_{AC} – різниця відстаней AO і CO ;

AC – база.

Побудова лінії положення на сферичній поверхні. Припускаючи, що площина, в якій побудовано гіперболу, дотикається до сфери точкою початку координат у точці, яка є серединою бази AC з координатами B, L , то для визначення ліній МПДРВ у географічних координатах необхідно спочатку виразити координати системи XOY на площині (вісь OX якої проходить через точки A, C , а її проекція на сферу – через пости A, C на сфері) у координатах нової системи $X'OY'$, вісь OX' якої паралельна екватору.

Принцип повороту системи координат [5] показано на рис. 9. Нові координати виражаються за формулами (31), де γ – кут повороту нової системи координат відносно старої:

$$\begin{cases} x' = x \cdot \cos \gamma + y \cdot \sin \gamma \\ y' = -x \cdot \sin \gamma + y \cdot \cos \gamma. \end{cases} \quad (31)$$

На рис. 10 зображено точки розміщення постів A, C у сітці географічних координат. Кут γ – кут повороту системи координат, який потрібно знайти (рис. 9).

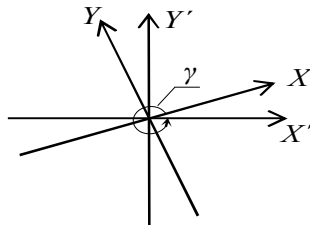


Рис. 9. Поворот системи координат

Точки перетину географічної сітки утворюють трапецію $ABCD$. BM, CK – висоти з точок B, C на відрізок AD ; CK – відстань між паралелями:

$$CK = (B_1 - B_2)R_3. \quad (32)$$

Кут γ обчислюється за допомогою пояснювального рис. 10 та формули (35).

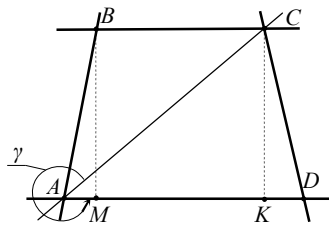


Рис. 10. Обчислення кута γ

$$AK = AD - KD; \quad KD = \frac{AD - BC}{2}. \quad (33)$$

Відрізки AD, BC дорівнюють довжинам дуг, обмежених меридіанами L_1, L_2 на широтах B_1, B_2 відповідно, і з урахуванням зближення меридіанів обчислюються:

$$AD = (L_2 - L_1) \cdot R_3 \cdot \cos(B_1); \quad BC = (L_2 - L_1) \cdot R_3 \cdot \cos(B_2). \quad (34)$$

З трикутника CAK знаходимо

$$\operatorname{tg}(2\pi - \gamma) = \frac{CK}{AK}; \quad \gamma = 2\pi - \operatorname{arctg}\left(\frac{CK}{AK}\right). \quad (35)$$

За допомогою (34, 35) розраховується масив координат (x', y') лінії положення на площині, дотичній до центра бази AC , вісь координат OX' якої паралельна екватору (рис. 11), потім він проектується на сферу. Проте, як видно з рис. 12, однаковим приростам відстані dr на поверхні сфери відповідають різні прирости відстані dx_n на площині.

Оскільки параметром побудови гіперболи є різниця відстаней, то перед проекцією точок лінії положення на сферу потрібно „стиснути” систему координат, щоб прирости відстані dx на площині відповідали приростам відстаней dr на сфері. Цю операцію названо спотворенням координат (її результат умовно зображено на рис. 13).

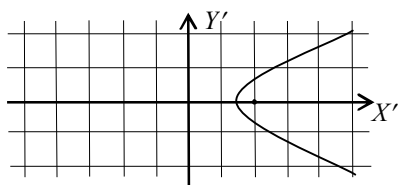


Рис. 11. Неспотворена система

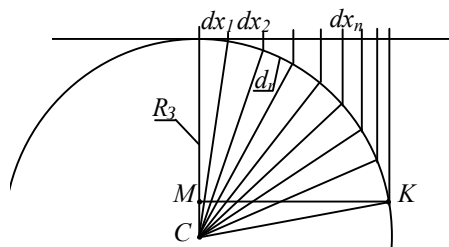


Рис. 12. Нерівність приростів відстані на площині

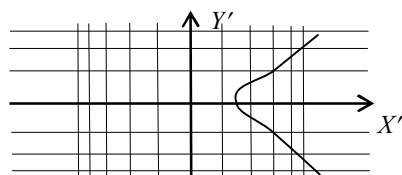


Рис. 13. Спотворена система координат

Спотворені координати x'' , y'' обчислюються таким чином

$$x'' = R_3 \cdot \sin\left(\frac{x'}{R_3}\right); \quad y'' = R_3 \cdot \sin\left(\frac{y'}{R_3}\right), \quad (36)$$

де $\left(\frac{x'}{R_3}\right)$, $\left(\frac{y'}{R_3}\right)$ – значення кутів у радіанній мірі, що відповідають приростам відстаней dr на сфері (рис. 12);

x'' , y'' є катетами трикутників, наприклад, катет MK трикутника CMK на рис. 12.

Перехід до географічних координат. Для широти

$$dB' = \frac{y''}{R_3} = \sin \frac{y'}{R_3}, \quad (37)$$

де dB' – приріст широти в радіанах;

$$B_n = B + dB, \quad (38)$$

де B_n – широта точки, спроектованої на сферу;

B – широта середини бази;

dB – приріст широти в градусах.

Для довготи

$$dL' = \frac{dx'' \cdot \cos B}{R_3 \cdot \cos B_n} = \sin\left(\frac{x'}{R_3}\right) \cdot \frac{\cos B}{\cos B_n}, \quad (39)$$

де dL' – приріст довготи в радіанах;

$$L_n = L + dL, \quad (40)$$

де L_n – довгота точки, спроектованої на сферу;

L – довгота середини бази;

dL – приріст довготи в градусах.

Обчисливши координати для кожної точки, отримуємо масив географічних координат лінії положення.

Аналогічні обчислення для бази AD . З двох отриманих масивів координат ліній положень вибрано ті, що належать різним масивам і найбільше збігаються. Це координати точки перетину ліній положення, тобто географічні координати точки $O(B_0, L_0)$.

Довжина бази AC (рис. 10) обчислюється як

$$AC = \frac{AK}{\cos(2\pi - \gamma)}. \quad (41)$$

Координати середини бази AC , що використовуються у формулах, визначаються так

$$B = \frac{B_1 + B_2}{2}; \quad L = \frac{L_1 + L_2}{2}, \quad (42)$$

де (B, L) – координати середини бази AC ;

$(B_1, L_1), (B_2, L_2)$ – координати постів A, C відповідно.

Для переходу від сферичної моделі Землі до еліпсоїда Красовського у наведених формулах застосовується радіус Землі R_3 залежно від широти B_n (55) за формулою (11).

3. Вимоги до параметрів обчислень.

Як видно з рис. 12, максимальна дальність визначення координат лінії положення за допомогою запропонованої математичної моделі не перевищує $\frac{1}{2}$ довжини меридіана, оскільки площину не можливо спроектувати на півкулю, протилежну півкулі розміщення середини бази. Виходячи з цього, взято:

$$x_{max} = y_{max} = R_{max}, \quad (43)$$

де x_{max} – максимальне значення x на площині;

y_{max} – максимальне значення y на площині (рис. 11).

При перевищенні будь-якого з цих значень у розрахунках координат гіперболи вважається, що побудовано достатню кількість точок і розрахунки далі не проводяться.

Мінімальний приріст x вибирається таким, щоб забезпечити достатньо малу похибку за рахунок приросту y порівнянні з похибкою методу, тобто таку, якою можна знехтувати.

4. Обчислення радіальної похибки.

Радіальна похибка обчислюється аналогічно радіальній похибці кутомірною методом: побудовою точок перетину ліній положення, які „зміщені” на похибку вимірювання різниці відстаней (рис. 14).

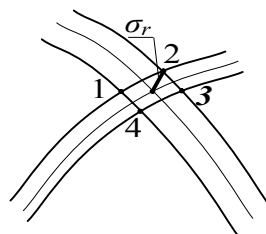


Рис. 14. Визначення радіальної похибки гіперболічного методу

Радіальною похибкою буде максимальна відстань між отриманими точками перетину, поділена навпіл.

Модель комплексуювання методів визначення місцеположення ДРВ

Комплексування методів визначення МПДРВ – це поєднання різних способів визначення МПДРВ з наданням залежно від показника комплексуювання переваги тим чи іншим методам. Показником комплексуювання обрано спроможність системи визначати координати точок, що належать лінії положення.

Тобто, якщо система визначення МПДРВ спроможна знайти хоч одну лінію положення, то вона береться до уваги при визначенні місцеположення.

Нехай гіперболічним і пеленгаційним постами визначено по одній лінії положення, які перетинаються. Координати, які найбільше збігаються (з масивів координат ліній положення різних методів) у межах кроку обчислення координат і будуть шуканими координатами ДРВ.

Радіальна похибка (рис. 15) визначається за описаною методикою для кожного з методів.

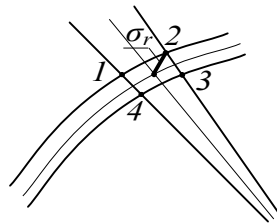


Рис. 15. Обчислення радіальної похибки при комплексуюванні методів визначення МПДРВ

Таким чином, не важливо, яким методом обраховуються координати ліній положення: методика розрахунку координат ДРВ та радіальної похибки залишається однаковою.

У випадку, коли визначених ліній положення більше, ніж дві, існують дві й більше точки їх перетину. У загальному випадку, якщо всі лінії положення перетинаються між собою, кількість точок перетину n :

$$n \geq N - 1, \quad (44)$$

де N – кількість визначених ліній положення.

У такому випадку координати точок перетину та похибки їх визначення обчислюються попарно для всіх ліній положення, у результаті чого отримуємо масив координат точок перетину

$$(B_{11}, L_{11}; B_{12}, L_{12}; \dots; B_{1n}, L_{1n}; \dots; B_{nn}, L_{nn}) \quad (45)$$

та масив відповідних їм похибок

$$(\sigma_{r11}; \sigma_{r12}; \dots; \sigma_{r1n}; \dots; \sigma_{rnn}). \quad (46)$$

На основі цих даних оцінюються координати ДРВ. Оскільки відомі малі параметри, в ролі яких виступають похибки (46), для оцінювання координат точки O вибирається критерій максимально-правдоподібної оцінки координат [1]. Тобто оціночні координати точки будуть тяжіти до тих, похибка визначення яких найменша. Математично: нехай

відомі координати двох точок перетину лінії положення $(B_1, L_1), (B_2, L_2)$ та похибки їх обчислення σ_{r1}, σ_{r2} , тоді оціночні координати розраховуються у такий спосіб [1]:

$$\hat{B}_0 = \frac{1}{2} \cdot \left(B_1 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{r1}}{\sigma_{r1} + \sigma_{r2}} \right) + B_2 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{r2}}{\sigma_{r1} + \sigma_{r2}} \right) \right), \quad (47)$$

$$\hat{L}_0 = \frac{1}{2} \cdot \left(L_1 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{r1}}{\sigma_{r1} + \sigma_{r2}} \right) + L_2 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{r2}}{\sigma_{r1} + \sigma_{r2}} \right) \right) \quad (48)$$

У загальному випадку для n точок перетину

$$\hat{B}_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(B_i \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{ri}}{\sum_{k=1}^n \sigma_{rk}} \right) \right); \quad \hat{L}_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(L_i \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{ri}}{\sum_{k=1}^n \sigma_{rk}} \right) \right). \quad (49)$$

Вирази (47–49) справедливі для випадку, коли всі лінії положення перетинаються в межах максимальної радіальної похибки їх обчислення. Якщо хоча б одна лінія положення не перетинається з іншими або перетинається на відстані від інших точок перетину, яка більша, ніж радіальна похибка її визначення, то приймається рішення, що один пост (мінімум) здійснив грубий промах, тому він виключається з розрахунків. Визначення поста, що припустився помилки, здійснюється, наприклад, контролем побудованих на карті ліній положень.

Висновки. Запропоновано методику підвищення функціональної стійкості системи радіомоніторингу за рахунок комплексування пасивних методів визначення координат. Створено математичні моделі визначення координат та радіальних похибок визначення в умовах апроксимації земної поверхні еліпсоїдом Красовського, модель оцінки координат, якщо розрахована більш ніж одна точка перетину ліній положення.

Доцільним напрямком подальшого дослідження є створення алгоритму залучення різнотипних засобів системи для забезпечення необхідної точності визначення координат, практична реалізація запропонованої методики в існуючих системах радіомоніторингу за рахунок створення програмного забезпечення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Котов В. С. Многопозиционные радиотехнические системы / В. С. Котов, А. Ф. Котов, Л. Н. Марков; под ред. В. В. Цветанова. – М. : Радио и связь, 1986. – 264 с.
2. Радіотехнічні системи. Ч. 1. Основи побудови РТС : навч. посіб. / С. В. Петраш, Ю. О. Колос, Р. А. Андрощук, О. Є. Леонт'єв. – Житомир : ЖВІРЕ, 2005. – 308 с.
3. Смирнов Ю. А. Радиотехническая разведка / Ю. А. Смирнов. – М. : Воениздат, 2001. – 456 с.
4. Кулявець В. О. Теоретичні основи місцевизначення ядерних вибухів / В. О. Кулявець, Д. В. П'ясковський, С. П. Павленко. – Житомир : ЖВІРЕ, 1998. – 176 с.

5. Гурский Е. И. Основы линейной алгебры и аналитической геометрии / Е. И. Гурский. – М. : Воениздат, 1979. – 312 с.
6. Обеспечение функциональной устойчивости сложных иерархических систем / В. А. Машков., О. А. Машков // Тези доповідей І Української конференції з автоматичного управління. – К. : АН України, 1994. – С. 205.

Подано 23.07.08

М. Ф. Пичугин, В. А. Шуренок, О. В. Самчишин

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТОЙКОСТИ СИСТЕМЫ РАДИОМОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ПАССИВНЫХ МЕТОДОВ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ

В статье для оценивания функционирования сложной многопозиционной системы радиомониторинга с различными методами местопределения предложен показатель функциональной стойкости – вероятность выполнения задач пеленгования с заданным качеством; разработана методика обеспечения ее функциональной стойкости на основе комплексирования пассивных методов местопределения.

M. F. Pichugin, V. A. Shurenok, O. V. Samchishin

THE METHOD OF PROVIDING FUNCTIONAL STABILITY SYSTEM OF RADIO MONITORING ON THE BASES OF INTER – CONNECTING PASSIVE METHODS OF LOCATION

In the article for valuation functional compound radio monitoring system with different methods of location, it is offered to show functional stability – the possibility of solving problems of finding position, the method was made for providing its functional stability on the bases of inter – connecting passive methods of location.