

УДК 682.964

М.Ф. Пічугін, Д.В. Карлов, О.О. Клімішен, А.С. Воловодюк

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

КОМПЛЕКСУВАННЯ ПАСИВНИХ МЕТОДІВ МІСЦЕВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ У СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ РАДІОМОНІТОРИНГУ

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 методику забезпечення її функціональної стійкості на основі комплексування пасивних методів місце визначення.

Ключові слова: джерела радіовипромінювання, метод місцевизначення, радіомоніторинг, комплексування.

Вступ

Постановка проблеми. Існує низка показників, за якими оцінюється ефективність складних систем. Одним з них є показник функціональної стійкості [1–2] – 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 унеможливає 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 [3]. Вів 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 [2; 4], 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 [1].

Огляд друкованих видань показав що, застосування даної теорії не розглядалось достатньо 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. Зазначені вимоги описуються як

$$N_X > N_{X_{\min}}; \quad N_Y > N_{Y_{\min}}, \quad (1)$$

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

$N_{X_{\min}}, N_{Y_{\min}}$ – мінімальна необхідна кількість постів, що використовують кутомірний, різницево-дальномірний методи.

2. Працездатність усіх засобів радіомоніторингу, що обчислюється за формулами

$$\begin{aligned} \forall x_i \in X &\Leftarrow \omega_i(\tau) = 1, \tau \in [0, t]; \\ \forall y_j \in Y &\Leftarrow \nu_j(\tau) = 1, \tau \in [0, t], \end{aligned} \quad (2)$$

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

$\omega(\tau); \nu(\tau)$ – 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:

$$\begin{aligned} \forall x_i \in X \Leftarrow \lambda_i(\tau) = 1, \tau \in [0, t]; \\ \forall y_j \in Y \Leftarrow k_j(\tau) = 1, \tau \in [0, t], \end{aligned} \quad (3)$$

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

$\lambda(\tau); k(\tau)$ – 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

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

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 $\sigma_\lambda, \sigma_\phi, \sigma_H$:

$$\sigma_\lambda \leq \sigma_\lambda^{\max}, \sigma_\phi \leq \sigma_\phi^{\max}, \sigma_H \leq \sigma_H^{\max}. \quad (5)$$

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

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

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 а тому, що система радіомоніторингу має властивість парирувати наслідки обумовлених нештатних ситуацій, тоді ймовірність цієї події $P(A) = P_{\text{пар}}$.

Виходячи із попередніх міркувань, можна записати, що

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

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

$A_{\text{упр}}$ – подія, яка полягає в можливості керувати надмірністю.

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

Отже, умова функціональної стійкості системи радіомоніторингу зображується як

$$\begin{cases} P_{\text{пел}} \geq P_{\text{пел}}^{\min}; \\ P_{\text{пар}} \geq P_{\text{пар}}^{\min}. \end{cases} \quad (8)$$

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 [1–2], 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 ($P_{\text{пел}}$) є зменшення похибки визначення координат. У існуючих системах радіомоніторингу точність визначення координат ДРВ не досягає теоретично можливої через неавтоматизацію процесу їх визначення, застосування плоских проєкцій 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; оптимального розміщення постів радіомоніторингу та алгоритму їх застосування.

Реалізація функціонально стійкої системи радіомоніторингу здійснюється за рахунок створення відповідної методики, що ґрунтується на математи-

чних моделях: комплексування застосування засобів кутомірної та різницево-далекомірної 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, коли необхідно враховувати кривизну земної поверхні, обчислюють значення аплікати z , тобто висоти точки над поверхнею Землі, з координатами (x, y) , що розраховані в площині прямокутної системи координат. Крім того, наявність z передбачає сферичну модель земної поверхні, оскільки задано постійне значення радіусу Землі.

Похибка, що вноситься моделлю Землі, повинна бути значно меншою інструментальної похибки визначення параметра. За модель земної поверхні обрано еліпсоїд Красовського [5].

Географічні координати збігаються з геодезичними при рівності радіуса сфери поточному радіусу еліпсоїда.

Модель визначення місцеположення ДРВ кутомірним методом.

Вважаємо що існує кутомірна система визначення МПДРВ з двома пеленгаційними постами А, С 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 А, С. Необхідно знайти географічні координати точки $O(B_0, L_0)$.

Припустимо, що поверхня Землі є правильною сферою. Пости А, С 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. 1).

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

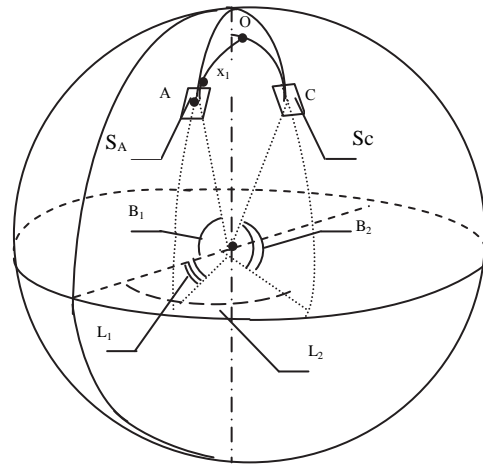


Рис. 1. Кутомірна система визначення координат на сфері

Нехай x_1 (рис. 1) – 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. 2).

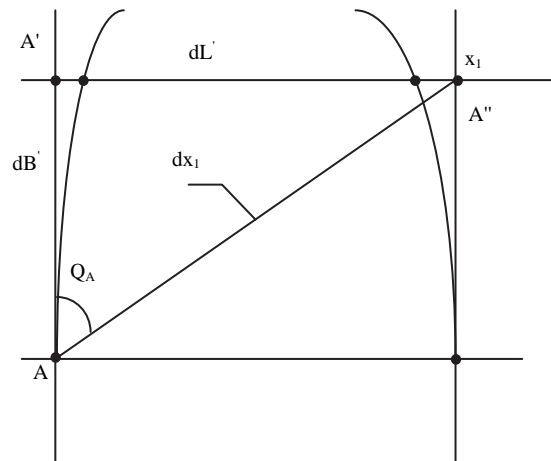


Рис. 2. Обчислення приростів

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:

$$dB_1' = dx_1 \cdot \cos Q_A; \quad (9)$$

$$dL_1' = dx_1 \cdot \sin Q_A. \quad (10)$$

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

$$dB_1 = \left(\frac{dB_1'}{R_3} \right), \quad (11)$$

де R_3 – радіус Землі.

При обчисленні приросту довготи враховується явище зближення меридіанів, яке полягає у зменшенні довжини дуги, утвореної на поверхні Землі перетином двох площин меридіанів ($\Delta L = \text{const}$) і

площиною, паралельною екватору, зі збільшенням широти B . Тому приріст довготи у радіанній мірі обчислюється як

$$dL_1 = \left(\frac{dL'_1}{R_3} \right) \cdot k_3, \quad (12)$$

де k_3 – коефіцієнт зближення меридіанів, який відрізняється у випадках коли розглядаємо еліпсоїд або сферу.

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

$$dB'_2 = dx_2 \cdot \cos Q_A; \quad dL'_2 = dx_2 \cdot \sin Q_A \quad (13)$$

та прирости кутових координат:

$$dB_2 = \left(\frac{dB'_2}{R_3} \right), \quad dL_2 = \left(\frac{dL'_2}{R_3} \right) \cdot k_3. \quad (14)$$

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

$$x_1 (B_1 + dB_1; L_1 + dL_1); \quad (15)$$

$$x_2 (B_2 + dB_2; L_2 + dL_2). \quad (16)$$

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 $O(B_0, L_0)$.

При цьому необхідно врахувати мінімальне значення приросту dx_1 та максимальне значення dx_{max} , які необхідні для проведення обчислень координат точок лінії 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.

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 .

Математична модель визначення ДРВ різницево-дальномірним методом.

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.

Нехай задано однобазову гіперболічну систему визначення МПДРВ на площині (рис. 3): 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.

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.

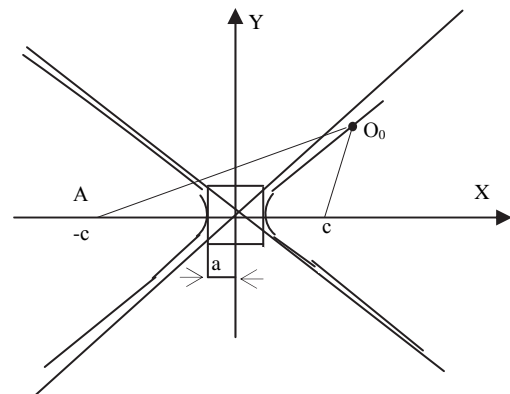


Рис. 3. Визначення лінії положення гіперболічним методом

Нові координати будуть розраховані як

$$\begin{cases} x' = x \cdot \cos \gamma + y \cdot \sin \gamma; \\ y' = -x \cdot \sin \gamma + y \cdot \cos \gamma, \end{cases} \quad (17)$$

де γ – кут повороту нової системи координат відносно старої.

Після розрахунку масиву координат (x', y') лінії положення на площині, дотичній до центра бази AC , вісь координат OX' якої паралельна екватору, він проектується на сферу. Проте, 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 ко-

ординат, щоб прирости відстані dx на площині відповідали приростам відстаней dr на сфері. Цю операцію названо спотворенням координат. Спотворені координати x'', y'' обчислюються таким чином

$$x'' = R_3 \cdot \sin\left(\frac{x'}{R_3}\right); y'' = R_3 \cdot \sin\left(\frac{y'}{R_3}\right). \quad (18)$$

Використовуючи (17) та (18), обчислюємо координати для кожної точки та отримуємо масив географічних координат лінії положення B_n, L_n .

Аналогічні обчислення для бази АД. 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 $O(B_0, L_0)$.

Для переходу від сферичної моделі Землі до еліпсоїда Красовського у наведених формулах застосовується радіус Землі R_3 залежно від широти B_n [5].

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. 4) визначається за описаною методикою для кожного з методів.

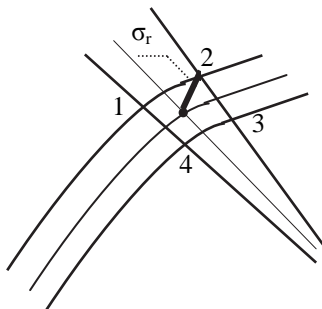


Рис. 4. Обчислення радіальної похибки при комплексуюванні методів визначення МПДРВ

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 :

$$n \geq N - 1, \quad (19)$$

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

$$(B_{11}, L_{11}, B_{12}, L_{12}, \dots, B_{1n}, L_{1n}, \dots, B_{nn}, L_{nn}) \quad (20)$$

та масив відповідних їм похибок

$$(\sigma_{r11}, \sigma_{r12}, \dots, \sigma_{r1n}, \dots, \sigma_{rnn}). \quad (21)$$

На основі цих даних оцінюються координати ДРВ. Оскільки відомі малі параметри, в ролі яких виступають похибки (21), для оцінювання координат точки O вибирається критерій максимально-правдоподібної оцінки координат. Тобто оціночні координати точки будуть тяжити до тих, похибка визначення яких найменша.

У загальному випадку для n точок перетину

$$\hat{B}_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(B_i \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{ri}}{\sum_{k=1}^n \sigma_{rk}} \right) \right); \quad (22)$$

$$\hat{L}_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(L_i \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{ri}}{\sum_{k=1}^n \sigma_{rk}} \right) \right). \quad (23)$$

Вирази (22–23) 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 комплексуювання 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.

Список літератури

1. *Обеспечение функциональной устойчивости сложных иерархических систем* / В.А. Машков, О.А. Машков // Тези доповідей I Української конференції з автоматичного управління. – К.: АН України, 1994. – 205 с.

2. *Методика забезпечення функціональної стійкості системи радіомоніторингу на основі комплексування пасивних методів місцевизначення* / М.Ф. Пичугін, В.А. Шуренок, О.В. Самчишин, С.В. Кондрашов // Збірник наукових праць ЖВІ НАУ. – Житомир: ЖВІ НАУ, 2008. – Вип. 1. – С. 81-95.

3. *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.

4. *Радіотехнічні системи. Ч. 1. Основи побудови РТС: навч. посіб.* / С.В. Петраш, Ю.О. Колос, Р.А. Андрощук, О.Є. Леонтьєв. – Житомир: ЖВІРЕ, 2005. – 308 с.

5. *Кулявець В.О. Теоретичні основи місцевизначення ядерних вибухів* / В.О. Кулявець, Д.В. П'ясковський, С.П. Павленко. – Житомир: ЖВІРЕ, 1998. – 176 с.

Надійшла до редколегії 9.01.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.В. Худов, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ПАССИВНЫХ МЕТОДОВ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ РАДИОМОНИТОРИНГА

М.Ф. Пичугин, Д.В. Карлов, А.О. Климишен, А.С. Воловодюк

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

Ключевые слова: источники радиоизлучения, метод местоопределения, радиомониторинг, комплексирование.

THE INTER-CONNECTING PASSIVE METHODS OF LOCATION RADIO EMISSION SOURCES IN THE MODERN RADIO MONITORING SYSTEMS

M. Pichugin, D. Karlov, O. Klimishen, A. Volovoduk

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.

Keywords: sources of radio emission, method of location, radio monitoring, inter-connecting.