

УДК 621.396.946

Д.П. Пашков, Ю.Б. Прібилев, А.А. Кизима

Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОСТІ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ

У статті розглядаються особливості радіотехнічних методів вимірювання навігаційних параметрів. Наведено аналітичні залежності, які дозволяють провести кількісну оцінку похибок вимірювань навігаційних параметрів. Визначена потенційна точність вимірювань навігаційних параметрів.

Ключові слова: радіонавігаційні системи, похибки радіонавігаційних вимірювань, умови розповсюдження радіосигналів.

Вступ

Підвищені вимоги до рішення навігаційних завдань призвели до необхідності освоювати нові діапазони радіохвиль, зокрема, сантиметрові і міліметрові. Знання умов поширення сантиметрових та міліметрових хвиль поблизу земної поверхні з урахуванням впливу реальної тропосфери Землі дозволяють проектувати радіонавігаційні системи (РНС), які здатні забезпечувати задані технічні характеристики, у тому числі точність радіонавігаційних вимірювань, при впливі умов поширення радіосигналів.

Аналіз літератури [1, 3, 4] показав, що основна особливість радіоканалів, які використовуються в РНС – наявність великих втрат радіосигналу, обумовлених загасанням енергії на трасі його поширення. Крім того, істотним фактором, що впливає на радіосигнали при їх поширенні, є частотно-селективні замирання в тропосферному шарі атмосфери Землі, які призводять до зміни сигналу. Крім цього, радіосигнал у тропосферних радіоканалах зазнає впливу і іншим впливам [2 – 4]. Облік впливу умов поширення сигналів у радіоканалах, що зазнають впливу різних факторів, дозволить забезпечувати впевнену роботу РНС і в той же час дасть можливість виключити зайві енергетичні витрати, що дуже важливо при побудові бортової апаратури рухомих об'єктів [3].

Метою статті є визначення аналітичних залежностей, які дозволяють провести кількісну оцінку похибок вимірювань навігаційних параметрів та визначення потенційної точності цих вимірів.

Викладення основного матеріалу

Одним із складних завдань навігаційної системи є завдання визначення місцезнаходження рухомих об'єктів [5 – 7]. При радіонавігаційних вимірах [5] місце розташування рухомих об'єктів отримують як точку перетину двох або більше ліній положення. У цьому випадку можливі похибки визначення місцезнаходження рухомих об'єктів, що залежать від точності визначення ліній положення, від взаємного

розташування в просторі наземного і бортового радіонавігаційного обладнання [5].

Похибки радіонавігаційних вимірювань.

Зазначені похибки носять випадковий характер [3]. У зв'язку з цим і місце розташування рухомих об'єктів має випадковий характер, що вимагає використання статистичних методів [6] при визначенні місця розташування цих об'єктів.

Розглянемо похибки визначення лінії положення для різних РНС (по вимірюваному навігаційного параметру) [5, 6]. У кутомірних системах вимірюваним навігаційним параметром є кут Θ (рис. 1). Припустимо, що кут Θ вимірюється з похибкою $\Delta\Theta$. Визначимо середньоквадратичну похибку (СКП) зміщення ліній положення σ_l , яка обумовлена похибкою вимірювання кута Θ . Skorистаємося рис. 1. Для невеликих похибок $\Delta\Theta$ отримуємо $\Delta l \approx R \cdot \Delta\Theta$. Величина Δl має гаусів закон розподілу [6]. Вважаючи, що математичне сподівання похибки вимірювань дорівнює $\langle \Delta l \rangle = 0$, отримаємо СКП зміщення ліній положення (для похибки виміру кута)

$$\sigma_l = R \sigma_\Theta, \quad (1)$$

де σ_Θ – СКП вимірювання кута Θ .

Таким чином, в кутомірних системах величина СКП ліній положення прямо пропорційна σ_Θ , а також величині дальності від точки відліку до об'єкта.

У далекомірних системах [7] вимірюваним навігаційним параметром є дальність R (рис. 2), яка вимірюється як час проходження радіосигналу від точки відліку до об'єкта.

Припустимо, що дальність вимірюється з похибкою ΔR . Визначимо величину СКП σ_R зміщення ліній положення, обумовлену похибкою вимірювання дальності. Вважаючи, що математичне сподівання похибки вимірювань дорівнює $\langle \Delta R \rangle = 0$, отримаємо СКП зміщення ліній положення (для помилки виміру дальності):

$$\sigma_R = (C/2) \cdot \sigma_\tau, \quad (2)$$

де C – швидкість світла; σ_τ – СКП вимірювання часового інтервалу.

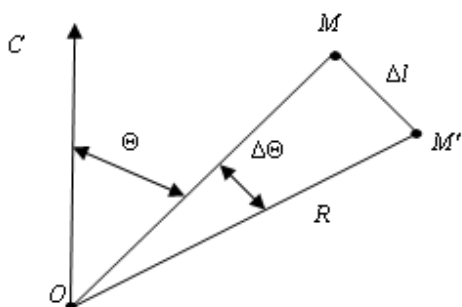


Рис. 1. Метод оцінки похибок вимірювань кутових координат

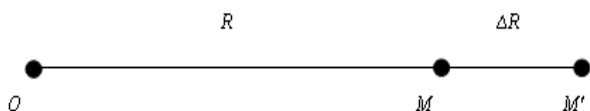


Рис. 2. Метод оцінки похибок вимірювань дальності.

На рис. 1, 2 позначено:
 точка М – вказує справжнє положення об'єкта;
 точка М' – обчислене положення об'єкту в результаті вимірювання навігаційних параметрів;
 точка О – точка відліку (місце розташування радіомаяка);
 R – дальність до об'єкта;
 ΔR – похибка вимірювання дальності;
 ОС – лінія відліку;
 Δl – лінійний зсув ліній положення внаслідок похибки одиничного вимірювання.

Таким чином, у далекомірних системах СКП лінії положення при постійній швидкості поширення

електромагнітних хвиль залежать тільки від величини σ_t [7].

У різницево-далекомірних системах [6] параметр, що вимірюється – дальність R, являє собою час τ , як різниця моментів часу надходження сигналів з двох точок (станцій) відліку.

$$\tau = t_k + \frac{R_B - R_A}{C},$$

де t_k – час кодової затримки, частини за все $t_k = \text{const}$; R_B – відстань від першої опорної точки (станції Б) до об'єкта; R_A – відстань від другої точки (станції А) до об'єкта.

Вимірювання величини τ проводиться з похибкою $\Delta\tau$, що, в свою чергу, призведе до похибки вимірювання різниці відстаней $R_p = R_B - R_A$, таким чином

$$\Delta R_p = C \Delta\tau.$$

Через похибки ΔR_p виміряна лінія положення зміститься стосовно справжньої.

Для визначення величини похибки одиничного вимірювання Δl скористаємося рис. 3.

Необхідно знайти зв'язок Δl і ΔR_p . З цією метою з геометричних співвідношень визначаються величини проєкцій Δl на напрями БМ і АМ, тобто відрізки МК і МF. Величини відрізків МК і МF визначаються виразами

$$MK = \Delta l \cos \frac{\gamma_B}{2} = \Delta l \sin \frac{\psi_B}{2},$$

$$MF = \Delta l \cos \frac{\gamma_B}{2} = \Delta l \sin \frac{\psi_B}{2},$$

звідки

$$MK = MF = m = \Delta l \sin \frac{\psi_B}{2}. \quad (3)$$

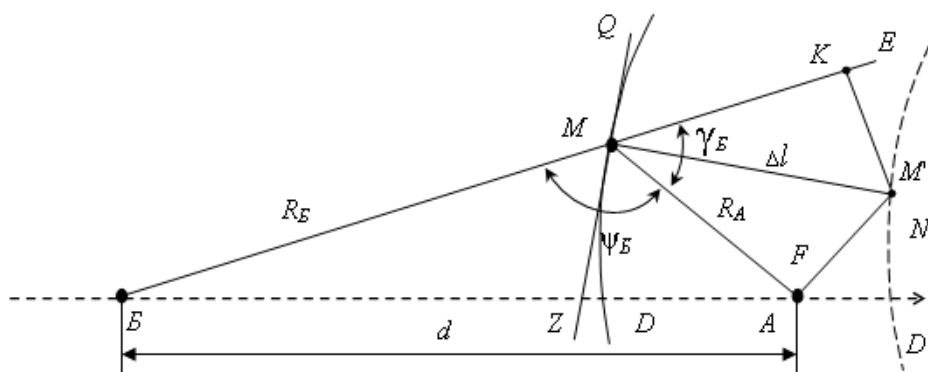


Рис. 3. Метод оцінки похибок вимірювань в різницево-далекомірних системах:
 точка А – станція А (точка відліку 1); точка Б – станція Б (точка відліку 2);
 d – відстань між станціями А і Б (база); точка М – вказує справжнє положення об'єкта;
 точка М' – обчислене положення об'єкту в результаті вимірювання навігаційних параметрів;
 MD та M'D' – відповідні гіперболи до точок М і М';
 ZQ – дотична до гіперболи MD в точці М; MN – перпендикуляр до дотичної в точці М;
 M'K – перпендикуляр до прямої БЕ; M'F – перпендикуляр до прямої АМ;
 m – відстань, рівна відрізку МК (між точками М і К);
 MM' – відрізок, рівний похибці одиничного виміру (Δl);
 ψ_B – кут, під яким видно базу станцій d; γ_B – кут, під яким видно базу станцій ψ_B , тобто $\gamma_B = \pi - \psi_B$;
 Δl – лінійний зсув ліній положення внаслідок похибки одиничного вимірювання

Позначимо R'_B і R'_A – лінії дальності від точок Б і А до точки М'. Вважаємо, що R_B , R_A набагато більше d , тобто R_A паралельна R'_A і R_B паралельна R'_B , тоді

$$\begin{aligned} R'_B &= R_B + \tau, \\ R'_A &= R_A + \tau. \end{aligned}$$

При цьому виміряне значення різниці відстаней буде обчислюватися

$$R'_P = R'_B - R'_A,$$

а похибку у вимірюванні різниці відстаней визначимо як

$$\Delta R = R'_P - R_P = (R_B - R_A) + 2m - (R_B - R_A) = 2m.$$

Враховуючи рівність (3), отримаємо

$$\Delta l = \frac{\Delta R_P}{2 \sin \frac{\Psi_B}{2}}.$$

Так як величина Δl має гаусів закон розподілу, а $\langle \Delta l \rangle = 0$, то

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{\Delta R_P}}{2 \sin \frac{\Psi_B}{2}},$$

де $\sigma_{\Delta R_P}$ – СКП величини ΔR_P .

Використовуючи вираз (2), отримаємо СКП лінійного зміщення

$$\sigma_1 = \frac{C\sigma_\tau}{2 \sin \frac{\Psi_B}{2}}, \quad (4)$$

Таким чином, в різницево-далекомірних системах СКП лінійного зміщення залежить від похибки вимірювання часового інтервалу і кута Ψ_B .

Узагальнюючи результати аналізу похибок, що виникають у кутомірних, далекомірних і різницево-далекомірних системах [5 – 7] і обумовлених отриманими виразами (1), (2), (4), бачимо, що похибка зміщення ліній положення залежить від похибок вимірювання кута, тимчасового інтервалу, а в доплеровських системах, відповідно, від похибок вимірювання швидкості об'єктів.

Становлять інтерес випадкові складові цих похибок, оскільки вони обумовлюють потенційну точність вимірювань.

Обчислення потенційної точності радіонавігаційних вимірювань.

Відомо [5], що дисперсія випадкової величини сигналу u , дорівнює

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{\frac{2E}{N_0} I''(u, \hat{u})},$$

де $2E/N_0$ – відношення енергії сигналу E до спектральної щільності шуму N_0 ;

$I''(u, \hat{u})$ – друга похідна нормованої кореляційної функції величини u ;

\hat{u} – оцінка випадкової u .

Функцію $I(u, \hat{u})$ отримують на виході оптимальної системи обробки.

Оцінимо потенційну точність вимірювання дальності. Встановивши $u=\tau$, можна показати, що

$$\left. \frac{d^2 I(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=\tau_0} = -\frac{1}{E} \int_0^T [u'_c(t - \tau_0)]' dt.$$

Використовуючи формулу Парсеваля, запишемо

$$\frac{1}{E} \int_0^T u'(t - \tau_0) dt = -\frac{(2\pi f)^2}{E_0} \int_{-\infty}^{+\infty} f^2 |S(f)|^2 df,$$

де $S(f)$ – спектр сигналу $u_c(t)$, для якого $f = f_0 - f_1$; f_0 – центральна частота сигналу.

Представивши $f = f_0 - f_1$, отримаємо

$$\begin{aligned} & \frac{(2\pi)^2}{E} \int_{-\infty}^{\infty} (f_0 - f_1)^2 |S(f_0 - f_1)|^2 df_1 = \\ & = \frac{(2\pi)^2}{E} \int_{-\infty}^{\infty} f_1^2 |S(f_0 - f_1)|^2 df_1 + (2\pi)^2 f_0^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Позначимо в рівнянні (5) першу складову як $\Delta f_{c.ck}^2$ – дисперсія спектра сигналу.

Тоді дисперсія величини τ (тимчасового інтервалу) матиме вигляд

$$\sigma_\tau^2 = \frac{1}{\left(\frac{2E}{N_0} \right) \left[\Delta f_{c.ck}^2 + (2\pi f_0)^2 \right]}. \quad (6)$$

Аналіз формули (6) показує, що для фазових методів вимірювання дальності за умови, що

$$2\pi f_0^2 \gg \Delta f_{c.ck}^2$$

потенційна точність вимірювання дальності визначається як

$$\sigma_\tau^2 = \frac{1}{\frac{2E}{N_0} (2\pi f_0)^2}. \quad (7)$$

При амплітудних методах вимірювань оцінка проводиться по обвідній сигналу (на виході амплітудного детектора). У цьому випадку

$$\sigma_\tau^2 = \frac{1}{\frac{2E}{N_0} 2\pi f_{c.ck}^2}. \quad (8)$$

При фазових методах (при когерентній обробці сигналу) можна отримати істотно більш високу точність вимірювань, ніж при амплітудних методах (некогерентній обробці сигналу).

Аналогічно можна отримати вираз для потенційної точності вимірювання кутових координат. У цьому випадку дисперсія помилки вимірювання кута визначається як

$$\sigma_{\Delta\sigma}^2 = \frac{\lambda^2}{\frac{2E}{N_0} B_0 L_a^2}, \quad (9)$$

де λ - довжина хвилі;

B_0 - коефіцієнт, що визначається розподілом амплітуди сигналу по розкриву антени;

L_a^2 - середньоквадратичний розмір апертури.

При часовому методі вимірювання кутових координат і гаусовій діаграмі спрямованості антени дисперсія вимірювання кута визначатиметься виразом

$$\sigma_{\Delta\Theta} = \frac{0,36F_{0,5}^2(\Theta)}{\frac{2E}{N_0}}, \quad (10)$$

де $F_{0,5}(\Theta)$ – ширина діаграми спрямованості антени на рівні 0,5 потужності.

Розглянутий раніше метод дозволяє визначити потенційну точність виміру швидкостей руху об'єктів. У цьому випадку дисперсія помилки вимірювання швидкості визначається як

$$\sigma_V^2 = \left(\frac{\lambda}{2}\right) \frac{1}{\frac{2E}{N_0} T_{с.ск}^2}, \quad (11)$$

де $T_{с.ск}^2$ – середньоквадратична тривалість сигналу.

Слід звернути увагу на те, що потенційна точність вимірювань навігаційних параметрів, що обумовлена виразами (7) – (11), залежить від відношення енергії сигналу E до спектральної щільності шуму N_0 . Дана залежність явно показує залежність точності вимірювань від зміни енергетичної характеристики сигналу, що обумовлена енергією сигналу та його спектром.

Висновки

Таким чином, в ході проведених досліджень були розглянуті особливості радіотехнічних методів

вимірювання навігаційних параметрів і визначені аналітичні залежності, які дозволяють провести кількісну оцінку похибок вимірювань навігаційних параметрів та визначити потенційну точність цих вимірів. При цьому можна зробити висновок про наявність залежності точності вимірювань навігаційних параметрів об'єктів від енергетичних характеристик сигналу.

Список літератури

1. Бакулев П.А. Радионавигационные системы / П.А. Бакулев, А.А. Сосновский. – М.: Радиотехника, 2005. – 224 с.
2. Баранов Г.Л. Аналітичний зв'язок навігаційних параметрів стану і сигналів адаптивного управління на програмних траєкторіях руху високошвидкісних транспортних засобів / Г.Л. Баранов, І.В. Тихонов, С.А. Банішевський // Системи управління, навігації та зв'язку: Зб. наук. праць. – К.: ЦНДІ НУ, 2008. – Вип. 3(7). – С. 19–23.
3. Беляевський Л.С. Теоретичні основи радіонавігації та радіонавігаційних систем / Беляевський Л.С. – К.: КМУЦА, 1997. – 420 с.
4. Беляевский Л.С. Точность радиоизмерительных систем / Л.С. Беляевский, В.Г. Черкашин. – К.: Техника, 1981. – 136 с.
5. Воздушная навигация и элементы самолетовождения / [Мамаев В.Я., Синяков А.Н., Петров К.К., Горбунов Д. А.]. – СПб.: СПбГУАП, 2002. – 256 с.
6. Основы радионавигационных измерений. / В. А. Губин, Н. Ф. Клюев, А. А. Костылев и др.; под ред. Н.Ф. Клюева. – МО СССР, 1987. – 430 с.
7. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / [Ипатов В.П., Казаринов Ю.М., Коломенский Ю.А. и др.]; под. ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Сов. радио, 1975. – 340 с.

Надійшла до редколегії 30.10.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Д.П. Пашков, Ю.Б. Прибылев, А.А. Кизима

В статье рассматриваются особенности радиотехнических методов измерения навигационных параметров. Описаны аналитические зависимости, которые позволяют провести количественную оценку погрешностей измерений навигационных параметров. Определена потенциальная точность измерений навигационных параметров.

Ключевые слова: радионавигационные системы, погрешности радионавигационных измерений, условия распространения радиосигналов.

IMPROVED METHOD FOR DETERMINING THE ACCURACY OF MEASUREMENTS RADIONAVIGATION

D.P. Pashkov, Y.B. Pribylev, A.A. Kizima

The current state of peculiarities of radio navigation methods of measurement parameters. Analytical dependences are described that allow a quantitative assessment of the measurement errors of navigation parameters. Identify potential accuracy of the navigation parameters.

Keywords: radio navigation system, radio navigational error of measurement, radio propagation conditions.