УДК 629.7.05:621.396.6

В.П. Климчук, канд. техн. наук, доц.,
П.М. Яблонський, канд. техн. наук, доц.

ОЦІНКА КУТОВОЇ ЧУТЛИВОСТІ РАДІОТЕХНІЧНОЇ ДОПЛЕРІВСЬКОЇ СИСТЕМИ ПОСАДКИ

Проаналізовано кутову чутливість радіотехнічної доплерівської системи посадки. Проведено порівняння з фазовою системою визначення кутових координат літального апарата. Показано переваги доплерівської системи посадки.

У роботі [1] наведений вираз для визначення доплерівського зсуву частоти, що пропорційний відхиленню літального апарата (ЛА) від рівносигнального напрямку:

$$\Delta\omega = \frac{\omega\, r\, \Omega}{c}\left[\sin\beta\cos\Omega t - \sin\alpha\sin\Omega t\right],$$

де ω – миттєва частота сигналу, що випромінюється обертовою антеною; r – радіус обертової антени; $\Omega = 2\pi F$ – кутова частота обертання антени; F – частота сканування антени; c – швидкість поширення радіохвиль; α, β – азимутальне кутомісцеве відхилення ЛА від вісі обертання наземного радіомаяка.

Аналогічний вираз для девіації частоти можна одержати, використовуючи співвідношення

$$R\cos(\psi + \varphi) = R\cos\psi\cos\varphi - R\sin\psi\sin\varphi\,. \tag{1}$$

Позначив $R\cos\varphi = \sin\beta$, $R\sin\varphi = \sin\alpha$, формулу (1) можна записати у вигляді

$$R\cos(\psi + \varphi) = \sin\beta\cos\psi - \sin\alpha\sin\psi\,.$$

Таким чином, положення вектора R однозначно характеризується довжиною й кутом нахилу φ, що знаходяться з рівнянь:

$$R = \sqrt{\sin^2\alpha + \sin^2\beta}\,, \tag{2}$$

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\,. \tag{3}$$

Використовуючи вирази (2), (3), девіацію частоти можна одержати у вигляді

$$\Delta\omega = \frac{\omega\, r\, \Omega}{c}\sqrt{\sin^2\alpha + \sin^2\beta}\cos(\Omega t + \varphi). \tag{4}$$

Для визначення кутової чутливості доплерівської системи посадки продиференцюємо вираз (4) за кутами α та β:

$$\frac{\partial\Delta\omega}{\partial\beta} = \frac{\omega\, r\, \Omega}{c}\frac{\sin\beta\cos\beta}{\sqrt{\sin^2\alpha + \sin^2\beta}}\,;$$

$$\frac{\partial\Delta\omega}{\partial\alpha} = \frac{\omega\, r\, \Omega}{c}\frac{\sin\alpha\cos\alpha}{\sqrt{\sin^2\alpha + \sin^2\beta}}\,.$$

Мінімально помітний частотний зсув сигналів $\delta f_{\min}$, вимірюваний у герцах, що відповідає кутовим відхиленням ЛА від заданої лінії на кути $\alpha_{\min}$ та $\beta_{\min}$, визначимо згідно з формулою

$$\partial f_{\min} = \frac{r\,\Omega}{\lambda}\left[\frac{\sin\beta\cos\beta}{\sqrt{\sin^2\alpha+\sin^2\beta}}\alpha_{\min} + \frac{\sin\beta\cos\beta}{\sqrt{\sin^2\alpha+\sin^2\beta}}\beta_{\min}\right]. \tag{5}$$

Для аналізу виразу (5) припустимо, що $\alpha = \beta$ і $\alpha_{\min} = \beta_{\min}$.

За прийнятих умов формула (5) прийме вигляд:

$$\partial f_{\min} = \frac{r\,\Omega}{\lambda}\frac{2\sin\alpha\cos\alpha}{\sqrt{2}\sin\alpha}\alpha_{\min} = \pm\frac{\sqrt{2}r\,\Omega}{\lambda}\cos\alpha\cdot\alpha_{\min}. \tag{6}$$

Наведемо числовий приклад. Нехай $\lambda = 3$ см, $r = 100$ см, $F = 30$ Гц. При малому значенні з рівняння (6) одержимо

$$\partial f_{\min} = \pm\frac{\sqrt{2\cdot 3{,}14\cdot 100\cdot 30}}{3}\alpha_{\min} = 4440{,}6\,\alpha_{\min}.$$

Якщо вимірювач дозволяє визначити девіацію частоти з точністю до 1 Гц, то мінімальне значення кута дорівнює

$$\alpha_{\min} = \pm\frac{1}{\partial f_{\min}} \approx \pm 0{,}0129\,^{\circ}.$$

Таким чином, зсув ЛА в просторі на кут, який дорівнює 0,0129° ліворуч або праворуч, а так само вверх або вниз від заданої траєкторії посадки, відповідає збільшенню девіації частоти на 1 Гц. При малих відхиленнях ЛА від траєкторії (при малих значеннях кутів α і β) можна записати

$$\alpha_{\min} = \pm\frac{\lambda}{\sqrt{2r\pi F}}\delta f_{\min};$$

$$\beta_{\min} = \pm\frac{\lambda}{\sqrt{2r\pi F}}\delta f_{\min}. \tag{7}$$

Порівняємо кутову чутливість при частотному і фазовому методах пеленгації.

Нехай габарити антенної системи при частотному і фазовому методах пеленгації будуть однаковими. З огляду на те, що оптимальне рознесення фазових центрів антен $r_{\text{опт}} = 0{,}5\ r_{\max}$, і приймаючи мінімальний кут дозволу визначеним шириною діаграми спрямованості антени за половинною потужністю:

$$\Theta_{0{,}5} = \frac{\lambda}{r_{ф}},$$

де $r_{ф} = r_{opt}$ – розкрив антени, одержимо при фазовому методі пеленгації

$$\alpha\frac{ф}{\min} = \frac{2\lambda}{r_{\max}}. \tag{8}$$

Порівнюючи формули (7) і (8), можна зробити висновок, що мінімальний кут розділової здатності при частотній пеленгації менший, а кутова чутливість вища у порівнянні з фазовою:

$$\lambda = \frac{2\sqrt{2}\pi F}{\delta f_{\min}}.$$

Мінімально помітний частотний зсув сигналів залежить, з одного боку, від точності вимірювання доплерівського зсуву частоти і, з іншого боку, від реалізованої мінімальної смуги пропускання вузькосмугового фільтра частотного аналізатора.

Дійсно, якщо вважати, що мінімально помітний частотний зсув сигналів перевершує у визначену кількість разів середньоквадратичний розкид його оцінки

$$\Delta\omega_{\min} = \xi\sigma_{\Delta\omega}, \tag{9}$$

то на підставі виразів (6) і (9) одержимо

$$\delta f_{\min} \frac{\sqrt{6}\xi}{\pi q T} \approx \frac{0{,}8\xi}{qT}. \tag{10}$$

Необхідна смуга пропускання вузькосмугового доплерівського фільтра в частотному аналізаторі повинна вибиратися відповідно до виразу (10), із якого видно, що мінімально помітний частотний зсув сигналів цілком визначається енергетичним співвідношенням сигнал/шум, часом вимірювання і розділовою здатністю. Остання дорівнює 0,997 при ξ=6, тому що при цьому передбачається, що максимальний розкид похибки вимірювання частотного зсуву з урахуванням нормального закону її розподілу дорівнює $\pm 3\sigma_{\Delta\omega}$.

Проте, смуга пропускання вузькосмугового доплерівського фільтра повинна бути технічно реалізованою. При певному її розмірі із виразу (9) можна знайти для фіксованої розділової здатності, обумовленою обраним значенням ξ>1, необхідний час вимірювання T та відношення сигнал/шум q з огляду на те, що повинна дотримуватися умова q>2,5…3. При цьому закон розподілу похибки вимірювання частотного зсуву практично можна вважати гауссівським.

Порівняння кутової чутливості фазових і амплітудних систем пеленгації, обумовлених електричними розмірами антенних систем $\frac{r}{\lambda}$, із частотною показує, що при частотній пеленгації вона, крім того, залежить від частоти сканування антени F. Таким чином, при частотній пеленгації за рахунок швидкого сканування антени може бути забезпечене істотне поліпшення кутової чутливості в порівнянні з фазовою та амплітудною пеленгацією.

Одержані результати щодо потенційної точності і кутової чутливості при частотній пеленгації не суперечать загальновідомим. Так, при фазовій і амплітудній пеленгації зазначені параметри, крім енергетичного співвідношення сигнал/шум, цілком визначаються електричними розмірами антенних систем $\frac{r}{\lambda}$. При частотній пеленгації вони таким же чином залежать ще від частоти сканування антени. Аналіз описаного частотного методу вимірювання дальності показує, що точність і розділова здатність по дальності визначаються ефективною шириною спектра сигналу. Остання, у свою чергу, при частотному методі прямо пропорційна девіації частоти сигналу і частоті модуляції. Аналогічно, точність і кутова чутливість за кутовими координатами визначаються ефективною шириною спектру, що при частотному методі пеленгації прямо пропорційна «девіації просторових частот» $\frac{r}{\lambda}$ і частоті сканування F.

Список літератури

1. *Яблонский П.М., Климчук В.П.*. Об одном способе определения угловых координат ЛА с помощью доплеровской радиотехнической системы посадки //Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1994. – 3. – С. 23–31.

Стаття надійшла до редакції 09.11.01.