УДК 621.396.96.

О.В. Тесленко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ФЛУКТУАЦІЙНОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ АЗИМУТУ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ, ОБУМОВЛЕНОЇ ВЕЛИКОМАСШТАБНИМИ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ ТРОПОСФЕРИ

Наведені теоретичні викладки визначення величини флуктуаційної похибки вимірювання азимуту повітряних об'єктів радіолокації на заобрійних відстанях над поверхнею моря. При цьому враховується вплив великомасштабних турбулентних утворень над поверхнею моря на фазові флуктуації прийнятого сигналу.

великомасштабні турбулентні утворення, похибки вимірювання азимуту

Вступ

В [1] на підставі експериментально отриманих даних, було показано, що при радіолокації повітряних об'єктів на заобрійних відстанях над морем необхідно враховувати вплив великомасштабних турбулентних утворень на точність визначення азимуту об'єкту локації. **Метою статті** є визначення величини флуктуаційної похибки вимірювання азимуту повітряних об'єктів за рахунок зміни довжини траси локації при наявності великомасштабних турбулентних утворень над морською поверхнею.

Визначення похибки вимірювання азимуту повітряних об'єктів, обумовленої великомасштабними неоднорідностями тропосфери

Визначимо величину флуктуаційної похибки вимірювання азимуту повітряних об'єктів, яка враховує зміну довжини траси локації при наявності великомасштабного турбулентного утворення. Відбитий від літака сигнал можна представити як монохроматичний сигнал, який поширюється у середовищі з діелектричною проникністю виду $\varepsilon(r)=\bar{\varepsilon}(r)+\tilde{\varepsilon}(r)$ ($\bar{\varepsilon}(r)$ – регулярна, а $\tilde{\varepsilon}(r)$ – флуктуаційна компоненти) та нерухомими турбулентними неоднорідностями у вигляді сферичної хвилі (рис. 1). При поширенні радіосигнал зазнає як амплітудних, так і фазових спотворень. Але, як показано в [2], при проходженні радіохвилі крізь великомасштабні неоднорідності порушення просторової когерентності поля відбувається у першу чергу за рахунок фазових флуктуацій, тоді як флуктуації амплітуди мають менше значення.

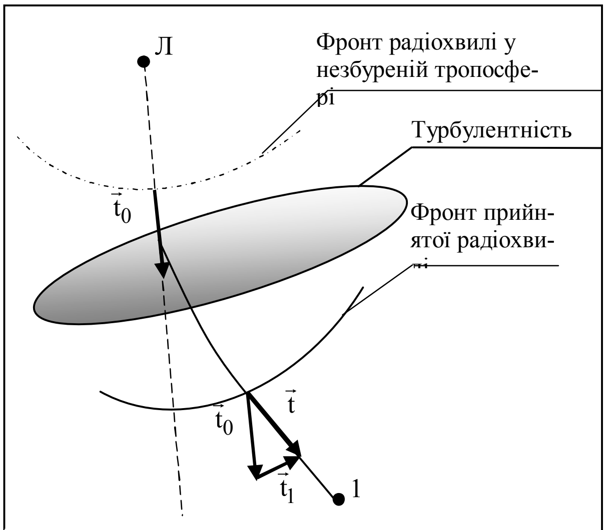

Рис. 1. Визначення величини азимутальної поправки

Кут прийому радіохвилі, відбитої від літака, визначається напрямком нормалі до фазового фронту, який у ізотропному середовищі співпадає з напрямком одиничного вектору $\vec{t}=\nabla S/\sqrt{\varepsilon}$, дотичного до променю. Ейконал радіохвилі S представимо у вигляді ряду $S=S_0+S_1+S_2+\ldots$, де S_0 задовольняє незбуреному рівнянню ейконалу

$$(\nabla S_0)^2=\bar{\varepsilon}\quad |\nabla S_1| << \sigma_\varepsilon << |\nabla S_0|,$$

і $\left|\nabla S_2\right| << \sigma_\varepsilon << \left|\nabla S_1\right|$ та т.д. Тоді з точністю до першого наближення вектор $\vec{t}$ визначимо як:

$$\vec{t} = \frac{\nabla(S_0 + S_1 + ...)}{\sqrt{\bar{\varepsilon} + \tilde{\varepsilon}}} = \frac{\nabla S_0}{\sqrt{\bar{\varepsilon}}} + \frac{1}{\sqrt{\bar{\varepsilon}}}\left[\nabla S_1 + \frac{\tilde{\varepsilon}\nabla S_0}{2\bar{\varepsilon}} + ...\right].$$

Вважаючи, що рівняння поправки першого порядку S_1 має вигляд $2(\nabla S_0 \nabla S_1) = 2\sqrt{\bar{\varepsilon}}(\vec{t}\nabla S_1) = \tilde{\varepsilon}$, тоді $\vec{t} \approx \vec{t}_0 + \frac{1}{\sqrt{\bar{\varepsilon}}}\left[\nabla S_1 - \vec{t}_0(\vec{t}_0 \nabla S_1)\right]$.

Вектор $\vec{t}$ може бути розкладений за векторами $\vec{t}_0$ та $\vec{t}_1$ де напрямок вектору $\vec{t}_0 = \frac{\nabla S_0}{\sqrt{\bar{\varepsilon}}}$ співпадає з фронтом приходу радіохвилі у незбуреній тропосфері, а напрямок вектору $\vec{t}_1$ визначає величину азимутальної поправки. Величина азимутальної поправки прийнятої радіохвилі визначається як поправка першого порядку до величини кута приходу плоскої радіохвилі, що поширюється у ізотропній тропосфері. Відхилення фазового фронту прийнятого радіолокаційного сигналу визначимо як [1]:

$$\vec{t}_1 = \vec{t} - \vec{t}_0 = \frac{1}{\sqrt{\bar{\varepsilon}}}\left[\nabla S_1 - \vec{t}_0(\vec{t}_0 \nabla S_1)\right] = \frac{\nabla_\perp S_1}{\sqrt{\bar{\varepsilon}}}, \quad (1)$$

де $\nabla_\perp$ - оператор поперечного (по відношенню до незбуреного променю) диференціювання.

Згідно (1) вектор $\vec{t}_1$ перпендикулярний по відношенню до $\vec{t}_0$ та лежить у площині дотичної до незбуреного фазового фронту S_0 = const. Задамо ортогональні вектори $\vec{\alpha}$ та $\vec{\beta}$ (рис. 2), які лежать у площині незбуреного фазового фронту та разом з вектором $\vec{t}_0$ складають ортогональну систему координат (α, β, t_0). Вектор $\vec{t}_1$ розкладемо на дві складові за напрямками $\vec{\alpha}$ та $\vec{\beta}$:

$$\vec{t}_1 = t_{1\alpha}\vec{\alpha} + t_{1\beta}\vec{\beta}.$$

З точністю до членів другого порядку малості кути приходу променю θ_α та θ_β, відраховані від напрямку незбуреного променю $\vec{t}_0$ (рис. 2), визначаються, згідно [2], як:

$$\Theta_\alpha \approx t_{1\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\bar{\varepsilon}}}(\vec{\alpha}\nabla_\perp S_1) = \frac{1}{\sqrt{\bar{\varepsilon}}}\frac{\partial S_1}{\partial \rho_\alpha},$$

$$\Theta_\beta \approx \frac{1}{\sqrt{\bar{\varepsilon}}}\frac{\partial S_1}{\partial \rho_\beta},$$

де ρ_α та ρ_β - є проекціями двомірного вектору $\vec{\rho} = (\vec{\alpha}, \vec{\beta})$ на напрямки $\vec{\alpha}$ та $\vec{\beta}$, відповідно.

Ейконал S_1 визначимо як:

$$S_1 = \frac{1}{2}\int_0^L \frac{\tilde{\varepsilon}}{\sqrt{\bar{\varepsilon}}} dl, \quad (2)$$

де L - довжина траси локації, dl - елемент довжини променю.

Для приземного шару тропосфери та радіохвиль ультракороткого діапазону $\bar{\varepsilon} \approx 1$ і вираз (2) можна записати у вигляді:

$$S_1 = \frac{1}{2}\int_0^\ell \tilde{\varepsilon}(\vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{t}_0) dl.$$

Середнє значення кута приходу в обох взаємно ортогональних площинах $(\vec{t}_0, \vec{\alpha})$ та $(\vec{t}_0, \vec{\beta})$ дорівнює нулю, $\overline{\Theta}_\alpha = \overline{\Theta}_\beta = 0$, оскільки $\overline{S}_1 = 0$, а елементи кореляційної матриці цих кутів визначимо як [2]:

$$R^\Theta_{\alpha\beta}(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2) = <\Theta_\alpha(\vec{\rho}_1)\Theta_\beta(\vec{\rho}_2)> = \frac{1}{\bar{\varepsilon}}\frac{\partial^2 R_\perp(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2)}{\partial \rho_{1\alpha}\partial \rho_{1\beta}}.$$

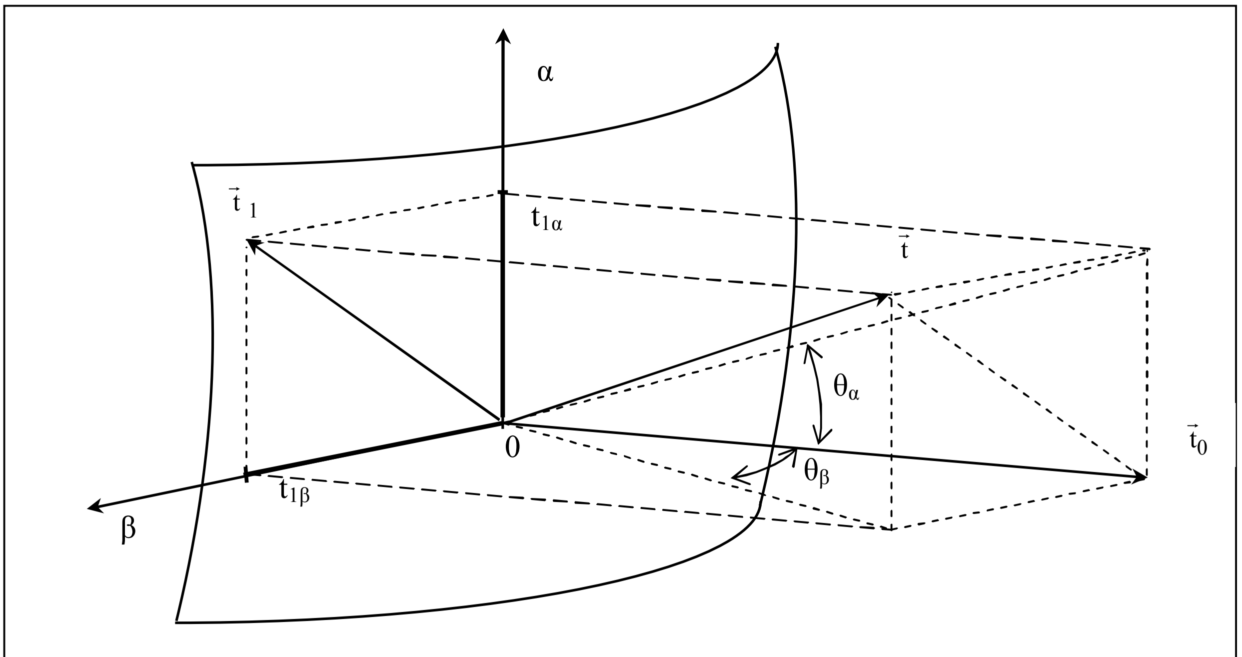

Рис. 2. Кутове зміщення променю радіохвилі при перетинанні фронту великомасштабної неоднорідності

Оберемо орти $\vec{\alpha}$ та $\vec{\beta}$ так, щоб при малих $\vec{\rho}$ поперечна структурна функція ейконалу $D_\perp$ мала вигляд $D_\perp \approx \tilde{n}_\alpha \rho_\alpha^2 + \tilde{n}_\beta \rho_\beta^2$, де $\tilde{n}_\alpha$ та $\tilde{n}_\beta$ - флуктуації показника заломлення тропосфери вздовж напрямків $\vec{\alpha}$ та $\vec{\beta}$, відповідно. Тоді флуктуації кутів приходу θ_α та θ_β, взяті у тій самій точці прийому, тобто при $\vec{\rho} = 0$, будуть некорельованими:

$$< \Theta_\alpha \Theta_\beta >= R^{\Theta}_{\alpha\beta}(0) = \frac{1}{2\bar{\varepsilon}} \frac{\partial^2 D_\perp(0)}{\partial \rho_\alpha \partial \rho_\beta} = 0, \ (\alpha \neq \beta).$$

Дисперсії кутів приходу описуються так:

$$< \Theta_\alpha^2 >= R^{\Theta}_{\alpha\alpha}(0) = \frac{1}{2\bar{\varepsilon}} \frac{\partial^2 D_\perp(0)}{\partial \rho_\alpha^2}; \tag{3}$$

$$< \Theta_\beta^2 >= R^{\Theta}_{\beta\beta}(0) = \frac{1}{2\bar{\varepsilon}} \frac{\partial^2 D_\perp(0)}{\partial \rho_\beta^2}, \tag{4}$$

У загальному вигляді анізотропних флуктуацій ейконалу дисперсії кутів приходу за напрямками $\vec{\alpha}$ та $\vec{\beta}$ будуть різними. На величину азимутальної похибки значно впливає горизонтальний градієнт показника заломлення тропосфери, в той час як вплив вертикального градієнту буде незначним, про що свідчать вирази (3) та (4).

Для локально однорідних та ізотропних полів структурна функція ейконалу плоскої хвилі $D_\perp$ може бути виражена через просторовий спектр флуктуацій [3]:

$$D_\perp(\rho, L) = 2\pi^2 L \int_0^\infty \Phi_\varepsilon(K)\left[1 - J_0(K\rho)\right] K dK, \tag{5}$$

де $K = {}^{2\pi}\!/_{L_0}$ - просторове хвильове число.

Підставивши в вираз (5) спектральну щільність $\Phi_n(K) = 0{,}033 C_n^2(K) K^{-11/3}$ для великомасштабних утворювань $\rho < L_0$ (L_0 – зовнішній масштаб турбулентності) отримаємо

$$D_\perp(\rho, L) = 0{,}82 C_\varepsilon^2 L L_0^{-1/3} \rho^2, \tag{6}$$

де C_ε^2 - структурна функція, яка характеризує інтенсивність атмосферної турбулентності.

З виразу (4), з урахуванням (6), отримаємо значення дисперсії кута приходу радіохвилі, відбитої від об'єкта локації, за азимутом:

$$\left\langle \theta_\beta^2 \right\rangle = 0{,}82 C_\varepsilon^2 L L_0^{-1/3}. \tag{7}$$

На практиці, при проведенні експериментальних досліджень, були отримані радіуси кореляції та середні значення флуктуації фази відбитого сигналу та визначались інтерференційні вимірювання, за умов орієнтування інтерферометру вздовж осі β з розміром бази ρ_β.

При цьому необхідно було фіксувати не значення самого кута відхилення, а різниці фаз у точках прийому $\Delta\varphi(\rho_\beta) = \Delta S(\rho_\beta)/k$. Якщо віднести цю різницю фаз до електричної довжини бази $k\rho_\beta$, отримаємо величину $\tilde{\beta} = \frac{\Delta\varphi(\rho_\beta)}{\rho_\beta}$, яка при малих ρ_β, а саме $\rho_\beta << L_0$, співпадає з значенням θ_β (7).

Згідно з цим, дисперсія $< \tilde{\beta}^2 >= \frac{< [\Delta\varphi(\rho_\beta)]^2 >}{\rho_\beta^2} = \frac{D_\perp(\rho_\beta)}{\rho_\beta^2}$, при малих значеннях ρ, може бути мірою $< \theta_\beta^2 >$, оскільки при $\rho_\beta << L_0$, $< \tilde{\beta}^2 > \approx \frac{1}{2} D''_\perp(0)$.

Звідси, величина флуктуаційної похибки визначення азимуту може бути визначена як:

$$\Delta\tilde{\beta}_L = 0{,}82 C_\varepsilon^2 \Delta L L_{0i}^{-1/3}$$

де $\Delta L = L_i^* - L_i$, а L_i^* - відстань до характерної точки рельєфу на i-тому азимутальному напрямку, L_i - поточне значення віддалення об'єкта локації від РЛС на i-тому азимутальному напрямку, L_{0i} – зовнішній масштаб турбулентності подовж траси локації на i-тому азимутальному напрямку.

Висновки

1. На підставі експериментальних даних отримано вираз для визначення величини флуктаційної похибки вимірювання азимуту об'єкта локації за межами радіообрію, викликану великомасштабними турбулентними утвореннями.

2 Застосовуючи інтерференційний метод вимірювання флуктуації фази сигналу, відбитого від характерних точок рельєфу, та метеорологічні данні про масштаби турбулентних утворень над морською поверхнею, може бути скомпенсована похибка визначення азимуту об'єкта локації на заобрійних відстанях.

Список літератури

1. Коваль О.А., Луценко В.І., Куц В.С., Тесленко О.В., Голінка О.О. Методика та результати експериментальних досліджень флуктуації фази радіосигналу відбитого від характерних точок рельєфу //. Системи обробки інформації: Збірник наукових праць. – Х.: ХВУ, 2004. – Вип. 10 (38). – С. 72-82.

2. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Случайные поля. Ч. П. – М.: Наука, 1978. – 464 с.

3. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.

Надійшла до редколегії 29.01.2007

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