

УДК 621.371.039:64

В.Д. Карлов¹, М.М. Петрушенко², А.В. Челпанов¹¹Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків²Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця**АНАЛІЗ ФЛУКТУАЦІЙ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ПРИ ЇХ РОЗПОВСЮДЖЕННІ НАД МОРЕМ**

У статті розглянутий вплив середовища розповсюдження радіохвиль над морем на інформативні параметри радіолокаційних сигналів – амплітуду, фазу, кут надходження хвилі, та оцінені можливості реалізації когерентної обробки, а також фазового моноімпульсного методу вимірювання кута місця цілі, оцінки похідних дальності та забезпечення точносних характеристик кутомісцевого каналу в умовах підвищеної рефракції та розсіювання радіохвиль. Розглянуті умови виникнення підвищеної рефракції, зокрема, за рахунок тропосферного хвилеводу в приводному шарі.

Ключові слова: рефракція розсіювання радіохвиль, розповсюдження радіохвиль, радіолокаційні сигнали.

Вступ

Постановка проблеми. На умови розповсюдження радіохвиль (РРХ) над морем впливають різні фактори, в першу чергу, турбулентності тропосфери, які визначають просторову неоднорідність коефіцієнту переломлення. Це призводить до виникнення підвищеної рефракції та розсіювання радіохвиль, відбиттям від шарових структур середовища РРХ та викликає флуктуації інформативних параметрів радіолокаційних сигналів, що впливає на якість виявлення та точність побудовання траєкторії повітряних цілей. У зв'язку із цим виникає задача оцінки ефективності обробки радіолокаційної інформації (РЛІ) в умовах змінювання параметрів середовища РРХ над морською поверхнею.

Аналіз літератури. Вплив параметрів середовища РРХ на характеристики радіолокаційних сигналів на приморському напрямку розглядалися в [1, 2, 4]. Основна увага при цьому приділялась амплітудним та фазовим флуктуаціям сигналів в умовах неоднорідностей середовища РРВ, які представлені у вигляді двох основних моделей – гаусівської (ізотропної турбулентності) та колмогорівської (локально-ізотропної), для різних значень хвильового параметру [3]. Розглянуті умови виникнення підвищеної рефракції, зокрема, за рахунок тропосферного хвилеводу в приводному шарі.

Ціль роботи. Розглянути вплив середовища РРХ над морем на інформативні параметри радіолокаційних сигналів – амплітуду, фазу, кут надходження хвилі, та оцінити можливості реалізації когерентної обробки, а також фазового моноімпульсного методу вимірювання кута місця цілі в умовах підвищеної рефракції та розсіювання радіохвиль.

Основна частина

Практика застосування РЛС на приморському напрямку свідчить про існування при визначених

умовах над морською поверхнею тропосферних хвилеводів, які з'являються за рахунок виникнення шарових неоднорідностей у приводному шарі та викликають підвищену рефракцію радіохвиль. Зростання температури та зниження вологості з висотою в інверсному шарі сприяє виникненню неоднорідностей коефіцієнту переломлення n (або індексу переломлення $N = (n - 1) \cdot 10^6$). Ступінь рефракції радіохвиль характеризується радіусом кривизни траєкторії РРХ r , який визначається градієнтом коефіцієнту переломлення по висоті $\frac{dn}{dh}$:

$$r = \frac{1}{\frac{dn}{dh}}. \quad (1)$$

При підвищеній рефракції зазвичай вводять поняття ефективного радіуса Землі R_e , для якого $R_e = \eta \cdot R_3$, де $R_3 = 6371$ км (радіус Землі).

Коефіцієнт η визначиться як:

$$\eta = \left[1 + R_3 \frac{dn}{dh} \right]^{-1}. \quad (2)$$

Для нормальної атмосфери $\eta = \frac{4}{3}$;

$R_e = 8500$ км; при критичній рефракції $r = R_3$.

Неоднорідності середовища РРХ, що зумовлюють змінювання коефіцієнту переломлення n , призводять також до розсіювання радіохвиль та флуктуаціям інформативних параметрів сигналів. В конкретних задачах аналізу істотну роль відіграє співвідношення між лінійними розмірами розсіюючої області l , відстанню до точки спостереження (довжиною траси РРВ) L довжиною хвилі λ , зокрема, значення хвильового параметру τ :

$$\tau = \frac{2L\lambda}{\pi l^2}. \quad (3)$$

Для реальної дальності радіолокаційної розвідки:

$$l_{\max} \ll L, \quad (4)$$

тобто $\tau \gg 1$.

При цьому результат додавання розсіяних хвиль буде визначатись їх фазовими співвідношеннями.

1. Аналіз амплітудних флуктуацій радіолокаційних сигналів.

Практичне значення має оцінка потужності сигналу або відношення сигнал/шум в умовах наявності тропосферних хвилеводів.

Тут слід розрізняти три основні випадки:

а) ціль та антена РЛС знаходяться у межах тропосферного хвилеводу;

б) антена РЛС або ціль знаходяться поза межами (вище) хвилеводу;

в) антена РЛС та ціль знаходяться вище за тропосферний хвилевод.

У залежності від наведеного варіанту положення цілі та РЛС змінюється щільність потоку потужності зондуючого сигналу у цілі та луна-сигналу антени РЛС.

Варіант (а) розглянуто в [4]. Тут щільність потоку потужності у цілі буде визначатись співвідношенням:

$$S_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{пор}} G \cdot \gamma \cdot m}{2\pi \cdot R_{\text{ц}} \cdot \Delta H_x}, \quad (5)$$

де ΔH_x – товщина тропосферного хвилеводу;

G – коефіцієнт підсилення антени у напрямку на ціль;

$$G = G_{\max} \cdot F(\varepsilon_{\text{ц}} \cdot \beta_{\text{ц}});$$

$F(\varepsilon_{\text{ц}} \cdot \beta_{\text{ц}})$ – діаграма спрямованості (ДС) антени по потужності;

γ – коефіцієнт відбору потужності в тропосферний хвилевод;

$$\gamma = \gamma_1 = \frac{2\varepsilon_{\text{кр}}}{\pi};$$

$\varepsilon_{\text{кр}}$ – критичний кут падіння радіохвилі, у межах якого хвиля відбивається від стінки тропосферного хвилеводу;

$m = m_1$ – коефіцієнт втрат потужності у хвилеводі за рахунок її виходу через стінки хвилеводу.

Відповідно, щільність потоку потужності у приймальної антени визначиться співвідношенням:

$$S_{\text{пр}} = \frac{S_{\text{ц}} \cdot \sigma_{\text{ц}} \cdot \gamma \cdot m}{2\pi \cdot R_{\text{ц}} \cdot \Delta H_x}, \quad (7)$$

де $\sigma_{\text{ц}}$ – ЕПР цілі.

Для варіанту (б) необхідно в (5) враховувати, яка частина потужності просочується в тропосферних хвилевод (або виходить за його межі, якщо ціль знаходиться вище за хвилевод).

У цьому випадку коефіцієнти γ та m приймають значення $\gamma = 1 - \gamma_1$ та $m = 1 - m_1$.

Для варіанту (в) при оцінюванні використовується співвідношення для потужності сигналу при поширенні у вільному середовищі, але з урахуванням впливу підстилаючої поверхні, роль якої виконує верхня стінка тропосферного хвилеводу [3].

Далі розглянемо можливі значення амплітудних флуктуацій сигналу при його поширенні в неоднорідному середовищі.

При виконанні умови (4) отримаємо для дисперсії флуктуацій рівня сигналу χ (логарифму нормованого значення амплітуди) σ_{χ}^2 [1]:

$$\sigma_{\chi}^2 = \sqrt{\pi} \overline{\delta n^2} r_0 L k^2; \quad (8)$$

$$\text{де } \chi = \ln \frac{A(R)}{A_0};$$

A_0 – амплітуда сигналу точечного випромінювача на відстані R без урахування флуктуацій;

$\overline{\delta n^2}$ – середньостатистичне значення квадрату величини δn (дисперсії);

δn – значення флуктуації коефіцієнту переломлення n ;

r_0 – просторовий радіус кореляції коефіцієнту переломлення (відповідає середньому розміру неоднорідності середовища l);

L – довжина траси РРХ;

k – хвильове число; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

При цьому є залежність від довжини хвилі λ : $\left(\sigma_{\chi}^2 \sim \frac{1}{\lambda^2}\right)$ та, відповідно, з'являється ефект дифракції. Залежність дисперсії від довжини траси РРХ L має лінійний характер.

Для характеристики просторово-часової когерентності поля хвилі важливим показником є коефіцієнт просторової (поперечної) кореляції амплітудних флуктуацій поля $R_{\chi(\rho)}$ в площині $x = L$, розташованої перпендикулярно напрямку поширення хвилі, де $\rho = \rho_z$ – відстань між точками, що лежать в даній площині (по напрямку Z).

Для випадку $\rho \ll r_0$ маємо [2]:

$$R_{\chi(\rho)} = \exp\left(-\frac{\rho_z^2}{r_0^2}\right). \quad (9)$$

Отже, радіус кореляції амплітудних флуктуацій співпадає з радіусом кореляції флуктуацій показника переломлення n .

Коефіцієнт повздовжньої (часової) кореляції амплітудних флуктуацій поля хвилі (у напрямку поширення x) за виконання умови (4) запишеться як [2]:

$$R_{\chi(\rho_x)} = \frac{1}{1 + \frac{2\rho_x}{kl^2}}, \quad (10)$$

де l – середній розмір неоднорідності.

При $\rho_x = \frac{\kappa l^2}{2}$ радіус кореляції зменшиться вдвоє.

2. Аналіз фазових флуктуацій радіолокаційних сигналів та їх вплив на результати когерентної обробки.

Для гаусівської моделі ізотропної турбулентності тропосфери при хвильовому параметрі $\tau \gg 1$ отримаємо для значення дисперсії фазових флуктуацій сигналу [1]:

$$\sigma_\phi^2 = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \overline{\delta n^2} \kappa^2 L r_0. \quad (11)$$

Отже, на відміну від (8) тільки коефіцієнтом $\frac{1}{2}$, тому для описання фазових флуктуацій можна використовувати перше наближення геометричної оптики.

Коефіцієнт поперечної кореляції фази $R_{\phi(\rho_z)}$ при цьому практично співпадає з коефіцієнтом кореляції для показника переломлення (9), а коефіцієнт поздовжньої кореляції фази визначається, як і для рівня сигналу (10).

Коефіцієнт кореляції флуктуацій рівня (амплітуди) сигналу та фази визначиться як [2]:

$$K_{\chi\phi} = \frac{\ln(1 + \tau^2)}{2\sqrt{\tau^2 - \arctg^2 \tau}}. \quad (12)$$

При $\tau \gg 1$ отримаємо $K_{\chi\phi} = \frac{1}{\tau} \ln \tau$, отже, кореляція між амплітудою та фазою при збільшенні довжини траси РРХ зменшується.

Розглянемо вплив фазових флуктуацій радіолокаційних сигналів на ефективність когерентної обробки. Даний аналіз проведений за допомогою цифрового моделювання на ЕОМ. Когерентна обробка пачки із m радіоімпульсів використовується, як правило, для уточнення похідних дальності (\dot{R} , \ddot{R}). В ході кореляційної обробки отриманої функції фази відбитого сигналу $\phi(t_i)$ (шляхом її порівняння з набором із M опорних функцій Φ_{ji}) формується M значень кореляційного інтегралу Q_j [6]:

$$Q_j = \frac{1}{m} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^m A_i \sin(\phi(t_i) - \Phi_{ji}) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^m A_i \cos(\phi(t_i) - \Phi_{ji}) \right]^2}, \quad (13)$$

де $\phi(t_i) = \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_0 + \dot{R}(t_i - t_0) + \frac{1}{2} \ddot{R}(t_i - t_0)^2 \right]. \quad (14)$

За оцінки похідних дальності \hat{R} та $\hat{\ddot{R}}$ приймаються параметри тієї опорної функції фази

$\Phi_{ji} = \Phi_i(\hat{R}_j, \hat{\ddot{R}}_j)$, при порівнянні з якою отримане максимальне значення кореляційного інтегралу $Q_j = Q_{\max}$:

$$\hat{R} = \dot{R}_j; \hat{\ddot{R}} = \ddot{R}_j.$$

Достовірність отриманих оцінок характеризується перевищенням величини Q_{\max} деякого порогу:

$$Q_{\max} \geq Q_{\text{пор}}. \quad (15)$$

Збільшення фазових флуктуацій викликає зниження величини Q_{\max} та, можливо, його зміщення.

Отже, з'являються помилки оцінки похідних дальності, а при невиконанні умови (15) оцінки вважаються недостовірними.

Залежність максимального значення кореляційного інтегралу Q_{\max} від величини фазових флуктуацій, отримана по результатам моделювання на ЕОМ, наведена на рис. 1.

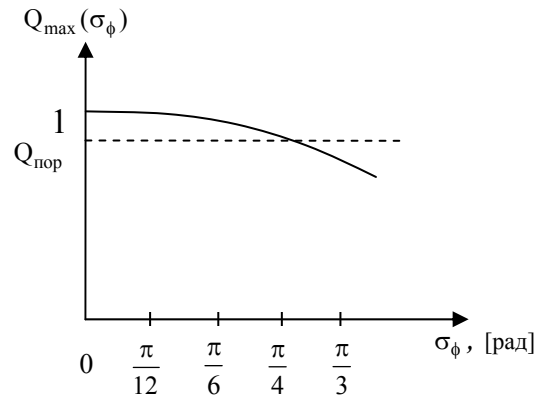


Рис. 1. Залежність максимального значення кореляційного інтегралу від величини фазових флуктуацій

Із рисунку видно, що при величині середньоквадратичної помилки фази сигналу, зумовленої флуктуаціями за рахунок змінювання умов РРХ та помилками вимірювання $\sigma_\phi > \frac{\pi}{4}$, та при $Q_{\text{пор}} = 0,75$ не буде виконуватись умова (15) та отримані оцінки швидкості та прискорення вважаються недостовірними.

3. Аналіз флуктуацій кутів приходу хвилі.

Рефракція радіохвиль в атмосфері викликає помилки вимірювання координат, в першу чергу, кута місця цілі.

Помилка вимірювання кута місця цілі $\Delta\phi$ може бути представлена через кутові параметри ζ , α , α_0 та значення коефіцієнту переломлення n та n_0 [5]:

$$\Delta\alpha = \arctg \frac{\cos \zeta - \sin \zeta \cdot \text{tg} \alpha - \frac{n}{n_0}}{\frac{n}{n_0} \cdot \text{tg} \alpha - \sin \zeta - \cos \zeta \cdot \text{tg} \alpha}, \quad (16)$$

де $\Delta\alpha = \gamma_{ц} - \alpha_0$;

$\gamma_{ц}$, α_0 – відповідно дійсні та уявлені значення кута місця цілі;

ζ – кут між напрямком приходу відбитої хвилі та вектором \vec{s} , дотичним до траєкторії хвилі в точці знаходження цілі;

α – поточний кут між вектором \vec{s} та перпендикуляром до радіус-вектору \vec{r} ;

$$\alpha = \vec{s} - \vec{r} - \frac{\pi}{2}.$$

Наведені співвідношення справедливі, якщо коефіцієнт переломлення не притерпає істотних змінювань у межах ділянки, порівняного із довжиною хвилі λ .

Якщо градієнт коефіцієнту переломлення великий, та в атмосфері виникає шар, у межах якого від'ємний вертикальний градієнт рефракції перевищує 157 N-одиниць на кілометр, виникає атмосферний хвилевод.

Для кутів місця, більших за 5° , можна використовувати наближену формулу [5] рефракційного кута ζ_p між двома точками (одна – у РЛС, друга – у цілі):

$$\zeta_p = - \left| N_{ц} \text{ctg} \alpha \cdot 10^{-6} \right|_{N_0}^{N_{ц}} = N_0 \text{ctg} \alpha \cdot 10^{-6} - N_{ц} \text{ctg} \alpha \cdot 10^{-6}, \quad (17)$$

де N_0 , $N_{ц}$ – індекси переломлення, відповідно у поверхні Землі та в точці знаходження цілі.

За відсутності ефекту рефракції можна вважати, що середнє флуктуації приходу хвилі за рахунок неоднорідностей середовища РРХ буде дорівнювати нулю, тобто $\overline{\delta\alpha} = 0$. Тоді флуктуації $\delta\alpha$ призводять до розмитості (розширення) головного пелюстка ДС.

Далі розглянемо фазовий розподіл сигналу в апертурі приймальної антени, бо флуктуації кута приходу хвилі за рахунок впливу турбулентного шару визначатимуть розподіл фази та, відповідно, значення помилок вимірювання кута місця цілі (зокрема, для фазових моноімпульсних РЛС).

Розложимо фазовий розподіл по апертурі приймальної антени навколо точки $Z = 0$ ординати Z (що відповідає фазовому центру антени):

$$\phi(Z) = \phi(0) + \phi_0' \cdot Z + \frac{1}{2} \phi_0'' \cdot Z^2 + \dots \quad (18)$$

Тут перший член ряду описує синфазний розподіл хвиль у напрямку фокальної вісі.

Другий член ряду визначається лінійними фазовими помилками, які виражаються через кут приходу хвилі:

$$\alpha = \frac{1}{k} \frac{\partial \phi}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = \lim_{kZ} \frac{\phi(Z)}{kZ},$$

де $\phi(Z)$ – різниця фаз сигналів в точках $0; Z$.

Третій додаток в (18) визначає квадратичні фазові помилки, які призводять до розширення головного пелюстка та підвищення рівня бокових пелюстків ДС.

У випадку, коли розмір апертури антени $b \ll l$, де l – середній розмір турбулентності, достатньо обмежитись другим членом в розкладанні (18) та вважати фазовий розподіл лінійним.

При цьому для гаусівської моделі ізотропної турбулентності тропосфери та точкової цілі дисперсія кута приходу σ_α^2 при значенні хвильового параметру $\tau \gg 1$ (3) визначиться, як [1]:

$$\sigma_\alpha^2 = \sqrt{\pi} \frac{L}{r_0} \overline{\delta n^2}. \quad (19)$$

Отже, дисперсія σ_α^2 пропорційна дисперсії коефіцієнту переломлення $\overline{\delta n^2}$, довжині траси РРХ L та зворотно пропорційна радіусу кореляції коефіцієнту переломлення r_0 .

Аналіз експериментально отриманих даних [1]

для середніх значень флуктуації $\overline{\delta\alpha}$ показав, що при значеннях вертикального градієнту індексу переломлення $\text{grad}_h N > -0,5$ спостерігається найбільший розкид кутів приходу хвилі (до одного кутового градуса у літні місяці).

Розглянемо вплив середовища РРХ на ефективність функціонування фазових моноімпульсних систем.

На роботу фазової моноімпульсної системи при вимірюванні кута місця цілі впливають наступні основні фактори:

а) постійна складова помилки кутомісцевої фази $\Delta(\Delta\phi)$, зумовлена підвищеною рефракцією радіохвиль;

б) випадкова складова помилки вимірювання кутомісцевої фази $\delta(\Delta\phi)$, зумовлена флуктуаціями коефіцієнту переломлення δn на трасі РРВ;

в) помилка неоднозначності вимірювання кутомісцевої фази $\Delta(\Delta\phi) = \pm 2\pi$, яка відповідає сектору однозначного вимірювання кута місця $\Delta\epsilon_0$ (виникає, коли цілі знаходяться на краях сектору огляду по куту місця).

Постійну та випадкову складові помилки вимірювання кута місця $\Delta\epsilon$ та $\delta\epsilon$ можна визначити із співвідношення:

$$\epsilon_{ц} = \arcsin \frac{\lambda \cdot \Delta\phi}{2\pi d}, \quad (20)$$

де $\Delta\phi$ – значення кутомісцевої фази (різниця фаз сигналів, прийнятих верхньою та нижньою антенною структурами $\Delta\phi = \phi_{в} - \phi_{н}$);

d – відстань між фазовими центрами антенних структур;

$\varepsilon_{\text{ц}}$ – кут місця цілі у біконічній системі координат.

Наприклад, при $\lambda = 2$ м, $d = 6$ м та $\Delta(\Delta\phi) = \frac{\pi}{4}$

отримаємо $\Delta\varepsilon_{\text{ц}} \approx 0,04$ рад $\approx 2,3^{\circ}$.

Діапазон однозначного вимірювання кута місця при цьому буде дорівнювати $\Delta\varepsilon_0 \approx 20^{\circ}$, тобто $\pm 10^{\circ}$ відносно рівносигнального напрямку ε_0 .

При $\varepsilon_0 = 20^{\circ}$ та секторі огляду по куту місця $\Delta\varepsilon_{\text{огл}} \approx 30^{\circ}$ (або $\pm 15^{\circ}$ відносно ε_0) матимемо два підсектори $5^{\circ} \div 10^{\circ}$ та $30^{\circ} \div 35^{\circ}$ (відносно лінії горизонту), в яких вимірювання кута місця будуть неоднозначними.

За рахунок позитивної рефракції радіохвиль (відносно земної або морської поверхні) та, відповідно, позитивної складової помилки вимірювання кутомісцевої фази $\Delta(\Delta\phi) > 0$, сектор однозначного вимірювання кута місця цілі зміщується вниз на величину $\Delta\varepsilon_{\text{зм}} \sim \Delta(\Delta\phi)$. Це зменшує ймовірність виникнення помилки неоднозначності для цілей, що низько летять та збільшує – для цілей, що входять в зону огляду у верхній частині сектору по куту місця.

Висновки

Проведений аналіз умов впливу умов розповсюдження радіохвиль (РРХ) над морем на інформативні параметри радіолокаційних сигналів – на

фазові та амплітудні характеристики та на флуктуації кута приходу радіохвиль.

Розглянуті можливості реалізації когерентної обробки радіолокаційних сигналів при оцінюванні похідних дальності та забезпечення точносних характеристик кутомісцевого каналу в фазовій моноімпульсній РЛС в умовах флуктуацій параметрів середовища РРХ.

Список літератури

1. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью / Л.М. Лобкова – М.: Радио и связь, 1991. – 255 с.
2. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику / С.М. Рытов. – М.: Сов. радио, 1970. – 520 с.
3. Кобзарев Ю.Б. Современная радиолокация / Ю.Б. Кобзарев; пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1969. – 704 с.
4. Обнаружение маловысотных целей на загоризонтных дальностях над морским тропосферным волноводом / В.Л. Мисайлов, Н.Н. Петрушенко // Радиотехника: Всеукр. межвед. научно-технич. сб. – 2004. – Вып. 137. – С. 113-117.
5. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника; пер. с англ. – Т.1. – М.: Радио и связь, 1976. – 406 с.
6. Кореляційно-фазовий вимірник радіальної швидкості цілі / А.В. Челпанов та ін.; деклараційний патент на винахід № 48844А; видан. 15.08.02; публ. бюл. № 8.

Надійшла до редколегії 12.11.2008

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

АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ НАД МОРЕМ

В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко, А.В. Челпанов

В статье рассмотрено влияние среды распространения радиоволн над морем на информативные параметры радиолокационных сигналов – амплитуду, фазу, угол поступления волны, и оценены возможности реализации когерентной обработки, а также фазового моноимпульсного метода измерения угла места цели, оценка производных дальности и обеспечение точностных характеристик угломестного канала в условиях повышенной рефракции и рассеивания радиоволн. Рассмотрены условия возникновения повышенной рефракции, в частности, за счет тропосферного волновода в приводном слое.

Ключевые слова: рефракция рассеивания радиоволн, распространение радиоволн, радиолокационные сигналы.

ANALYSIS OF FLUCTUATIONS OF INFORMING PARAMETERS OF RADIO-LOCATION SIGNALS AT THEIR DISTRIBUTION ABOVE SEA

V.D. Karlov, M.M. Petrusenko, A.V. Chelpanov

In clause influence of the environment of distribution of radiowaves above the sea on informative parameters of radar-tracking signals – amplitude, a phase, a corner of arrival of a wave is considered, and opportunities of realization of coherent processing, and as phase monopulse method of measurement of a corner of a place of the purpose are estimated, Estimations of derivatives of range and maintenance of accuracy characteristics of the channel corner of a place in conditions of the raised refraction and dispersion of radiowaves. Conditions of occurrence of the raised refraction, in particular, due to a tropospheric wave guide in layer about water are considered.

Keywords: refraction of dispersion of radio waves, distribution of radio waves, radio-location signals.