

УДК 621.396.96

В.Л. Місайлов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ В МОРСЬКОМУ ТРОПОСФЕРНОМУ ХВИЛЕВОДІ

Проведено оцінку впливу непрямої поширення радіохвиль у тропосферних хвилеводах (ТХВ) над акваторією Чорного моря на точність вимірювання дальності до повітряних об'єктів та доцільності його врахування для сучасних та перспективних радіолокаційних станцій. Розглянутий спосіб підвищення точності вимірювання дальності до повітряних об'єктів, що знаходяться всередині морського тропосферного хвилеводу за рахунок використання сигналу, відбитого від об'єкту із апріорно відомими координатами (комплексування вимірювань) та даних про параметри ТХВ.

Ключові слова: помилка вимірювання, тропосферний хвилевод, непрямої поширення радіохвиль, комплексування вимірювань.

Вступ

Постановка проблеми. Надрефракційне поширення радіохвиль призводить до виникнення тропосферних хвилеводів і збільшенню дальності дії радіотехнічних засобів [1, 2]. Виникнення ТХВ найчастіше відмічають над поверхнею великих водоймищ (водосховищ, морів, океанів), але відомі нерідкі випадки появи ТХВ і над великими площами суші [3]. Непрямої поширення радіохвиль (ПРХ) у тропосферних хвилеводах призводить до додаткової похибки при вимірюванні координат повітряних об'єктів (ПО) [2, 4]. Поточне значення цієї похибки апріорно не відомо, а в [4] вказано, що вона може досягати 7%. Таке збільшення помилок вимірювання дальності може бути неприйнятним і для сучасних, і для перспективних РЛС. Особливо це стосується систем зовнішньотраєкторних вимірювань (ЗТВ) [5], що є унікальними пристроями із малими помилками вимірювань. Для України це є актуальним з огляду на перспективу дообладнання приморського полігону "Чауда", який входить до складу Державного науково-випробувального центру Збройних Сил України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для зменшення поточних помилок вимірювань координат рухомих об'єктів успішно застосовується метод комплексування вимірювань [6, 7]. В [8] для підвищення точності вимірювання дальності до ПО в умовах існування морського тропосферного хвилеводу запропоновано використання інформації, яка міститься в сигналі, відбитому від об'єкту з відомими координатами. Але в цій публікації не були враховані дані о фактичних параметрах тропосферних хвилеводів, що виникають над акваторією Чорного моря.

Метою статті є оцінка впливу непрямої поширення радіохвиль у ТХВ над акваторією Чорного моря на точність вимірювання дальності до ПО та доцільність його врахування для сучасних і перспективних РЛС, а також оцінка можливості

комплексування вимірювань з урахуванням даних про параметри ТХВ.

Точність вимірювання дальності у тропосферних хвилеводах

Дальність до ПО у ТХВ визначається за формулою:

$$D_{\text{ПО}} = \frac{R_{\text{ПО}}}{K_{\text{ПО}}}, \quad (1)$$

де $R_{\text{ПО}}$ – груповий шлях ехо-сигналу від ПО; $K_{\text{ПО}}$ – коефіцієнт подовження траси локації РЛС-ПО.

Дисперсія помилок визначення дальності до ПО $\sigma_{D_{\text{ПО}}}^2$ відповідно до [9] і вважаючи, що помилки вимірювання групового шляху і коефіцієнта подовження розподілені по нормальному закону, визначається як:

$$\sigma_{D_{\text{ПО}}}^2 = \left(\sigma_{R_{\text{ПО}}} \frac{\partial D_{\text{ПО}}}{\partial R_{\text{ПО}}} \Big|_{\bar{R}_{\text{ПО}}, \bar{K}_{\text{ПО}}} \right)^2 + \left(\sigma_{K_{\text{ПО}}} \frac{\partial D_{\text{ПО}}}{\partial K_{\text{ПО}}} \Big|_{\bar{R}_{\text{ПО}}, \bar{K}_{\text{ПО}}} \right)^2, \quad (2)$$

де $\sigma_{D_{\text{ПО}}}$, $\sigma_{R_{\text{ПО}}}$, $\sigma_{K_{\text{ПО}}}$ – середньоквадратична помилка (СКП) визначення дальності, групового шляху і коефіцієнта подовження траси відповідно; $\bar{R}_{\text{ПО}}$ і $\bar{K}_{\text{ПО}}$ – середнє значення групового шляху і коефіцієнта подовження траси відповідно.

З урахуванням (1) отримуємо:

$$\sigma_{D_{\text{ПО}}}^2 = \frac{1}{\bar{K}_{\text{ПО}}^2} \left(\sigma_{R_{\text{ПО}}}^2 + \frac{\bar{R}_{\text{ПО}}^2}{\bar{K}_{\text{ПО}}^2} \sigma_{K_{\text{ПО}}}^2 \right). \quad (3)$$

Визначимо коефіцієнт збільшення помилок вимірювання дальності ПО у ТХВ у порівнянні із вільним простором α_1 як:

$$\alpha_1^2 = \frac{\sigma_{D_{ПО}}^2}{\sigma_{R_{ПО}}^2} = \frac{1}{\bar{K}_{ПО}^2} \left(1 + \frac{\bar{R}_{ПО}^2}{\sigma_{R_{ПО}}^2} \frac{\sigma_{K_{ПО}}^2}{\bar{K}_{ПО}^2} \right). \quad (4)$$

Величина $\sigma_{R_{ПО}}$ визначена в технічних характеристиках РЛС.

Поточні значення $K_{ПО}$ і $\sigma_{K_{ПО}}$ без додаткових джерел інформації є невідомими, але можливо оцінити їх імовірні значення по раніше отриманим статистичним даним. Для ТХВ звичайно $K_{ПО}$ знаходиться в межах від 1 до деякого $K_{ПО \max}$, тобто:

$$1 \leq K_{ПО} \leq K_{ПО \max}. \quad (5)$$

За відсутності інших гіпотез вважатимемо, що поточне значення $K_{ПО}$ рівномірно розподілено в цих межах.

За критерієм мінімуму середнього квадрату помилки найкращою оцінкою випадкової величини (у нашому випадку $\bar{K}_{ПО}$) є її математичне сподівання $m_{K_{ПО}}$ [10], що визначається як:

$$m_{K_{ПО}} = \frac{1 + K_{ПО \max}}{2}. \quad (6)$$

Відповідно $\sigma_{K_{ПО}}$ знаходиться як

$$\sigma_{K_{ПО}} = \frac{K_{ПО \max} - 1}{2\sqrt{3}}. \quad (7)$$

Для забезпечення однозначності вимірювань необхідно, щоб

$$R_{ПО} \leq \frac{R_{ПО \max}}{K_{ПО \max}}. \quad (8)$$

Оцінимо α_1 на максимальній дальності ПО. Із урахуванням (6)–(8) формула (4) перетворюється наступним чином:

$$\alpha_1^2 = \frac{4}{(1 + K_{ПО \max})^2} \left(1 + \frac{1}{\delta_R^2} \frac{(K_{ПО \max} - 1)^2}{3K_{ПО \max}^2 (1 + K_{ПО \max})^2} \right), \quad (9)$$

де δ_R – приведена похибка вимірювання $R_{ПО}$ [11], що є узагальненою характеристикою вимірювача і визначає його клас точності.

В табл. 1 наведені точнісні характеристики сучасних та перспективних РЛС [5, 12 – 16].

Використовуючи дані, наведені в [17], отримуємо, що для ТХВ, які виникають над акваторією Чорного моря, $K_{ПО \max} \approx 1,001$.

На рис. 1 наведені графіки, що відбивають залежність коефіцієнту збільшення помилок вимірювання дальності α_1 в ТХВ при різних δ_R .

Як можна побачити, для РЛС типу 55Ж6-1 та 5Н84АЭ непрямолінійне ПРХ у ТХВ майже не впливає на точність вимірювання дальності.

Тепер знайдемо, для РЛС яких типів треба враховувати непрямолінійність ПРХ.

Таблиця 1

Точнісні характеристики РЛС

| Тип РЛС | $R_{ПО \max}$, км | $-\sigma_{R_{ПО}}$, м | δ_R , $\times 10^{-3}$ |
|---------------------|--------------------|------------------------|-------------------------------|
| П-18 (БФ РЛС з ЦАР) | 150 | 10 | 0,07 |
| РЛС ЗТВ | 50 | 5 | 0,1 |
| ГАММА-ДЕ | 400 | 50 | 0,125 |
| КОЛЬЦО | 400 | 60 | 0,15 |
| П-18/2005 | 300 | 107 | 0,36 |
| ІЛІ17М | 350 | 125 | 0,36 |
| Фрегат-МАЭ-2 | 300 | 120 | 0,4 |
| КАСТА-2Е2 | 150 | 100 | 0,67 |
| 55Ж6-1 | 400 | 400 | 1 |
| 5Н84АЭ | 300 | 1200 | 4 |

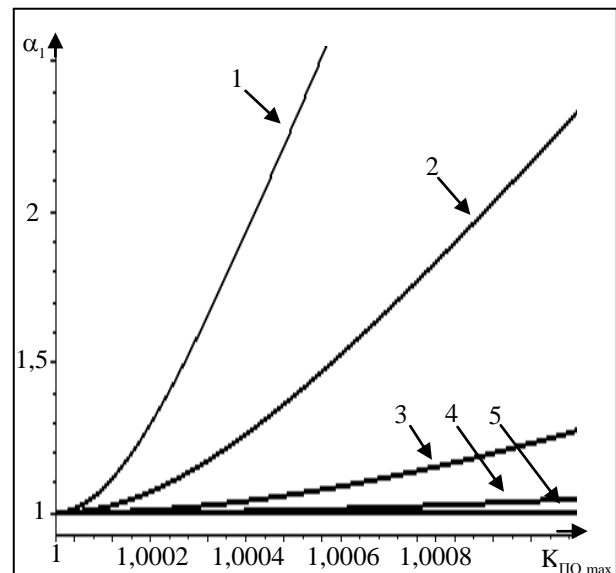


Рис. 1. Коефіцієнт збільшення помилок вимірювання дальності α_1 при різних δ_R :

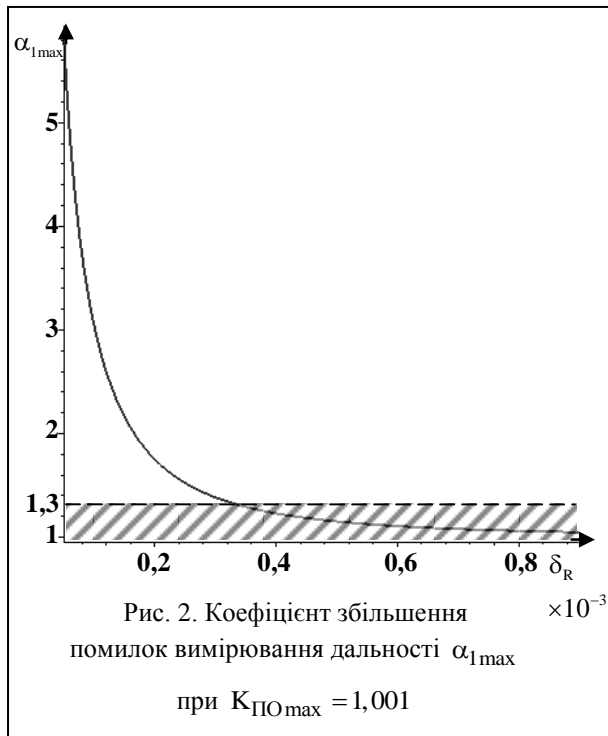
- 1 – $\delta_R = 0,07 \cdot 10^{-3}$;
- 2 – $\delta_R = 0,15 \cdot 10^{-3}$;
- 3 – $\delta_R = 0,4 \cdot 10^{-3}$;
- 4 – $\delta_R = 1 \cdot 10^{-3}$;
- 5 – $\delta_R = 4 \cdot 10^{-3}$

В [18] вказується, що якщо додаткова помилка вимірювань не перебільшує 30% від основної, то нею можна знехотувати.

Тоді, припустивши, що ПО знаходиться на максимальній відстані, а $\sigma_{K_{ПО}}$ задана виразом (7), із (4) отримуємо коефіцієнт максимального збільшення помилок вимірювання $\alpha_{1 \max}$:

$$\alpha_{1\max}^2 = \frac{1}{K_{\text{ПО max}}^2} \left(1 + \frac{1}{\delta_R^2} \frac{(K_{\text{ПО max}} - 1)^2}{12K_{\text{ПО max}}^4} \right). \quad (10)$$

На рис. 2 наведено приклад залежності $\alpha_{1\max}$ від δ_R при $K_{\text{ПО max}} = 1,001$. З рис. 2 можна побачити, що додаткову помилку вимірювання дальності, яка виникає за рахунок непрямої лінійної поширення радіохвиль у ТХВ, характерних для акваторії Чорного моря, необхідно враховувати для РЛС, приведена помилка вимірювання дальності яких $\delta_R \leq 0,35 \cdot 10^{-3}$.



Комплексування вимірювань для зменшення похибки

Якщо в середині ТХВ в зоні дії РЛС є об'єкт, дальність до якого відома із інших джерел із високою точністю (репер), то скориставшись методикою [8], можливо зменшити похибки вимірювання дальності ПО. Дальність до репера знаходиться аналогічно (1), тобто:

$$D_p = R_p / K_p, \quad (11)$$

де R_p – груповий шлях ехо-сигналу від репера; K_p – коефіцієнт подовження траси локації РЛС-репер, звідки:

$$K_p = R_p / D_p. \quad (12)$$

Для приповерхневих та підведених хвильоводів над акваторією Чорного моря можна вважати, що їх параметри слабо залежать від дальності [19], і $K_p = K_{\text{ПО}}$. Враховуючи це та (12), у (1) по методиці [9] отримуємо:

$$\sigma_{D_{\text{ПОР}}}^2 = \frac{1}{K_p^2} \left(\sigma_{R_{\text{ПО}}}^2 + \frac{\bar{R}_{\text{ПО}}^2}{R_p K_p^2} \sigma_{R_p}^2 \right), \quad (13)$$

де $\sigma_{D_{\text{ПОР}}}$ і σ_{R_p} – СКП визначення дальності до ПО з урахуванням луна-сигналу від репера та СКП визначення дальності до репера.

Визначимо коефіцієнт зменшення помилок вимірювання дальності ПО при урахуванні ехо-сигналу від репера α_2 .

Вимірювання дальності до ПО і репера виконуються одною РЛС, тому вважатимемо, що $\sigma_{R_{\text{ПО}}}^2 = \sigma_{R_p}^2$ і α_2 знайдемо як:

$$\alpha_2^2 = \frac{\sigma_{D_{\text{ПО}}}^2}{\sigma_{D_{\text{ПОР}}}^2} = \frac{1 + \frac{\bar{R}_{\text{ПО}}^2}{\sigma_{R_{\text{ПО}}}^2} \frac{\sigma_{K_{\text{ПО}}}^2}{K_{\text{ПО}}^2}}{1 + \frac{\bar{R}_{\text{ПО}}^2}{R_p^2}}. \quad (14)$$

При максимальній дальності ПО вираз (14) перетворюється у:

$$\alpha_{2\max}^2 = 0,5 + \frac{\delta_K^2}{2\delta_R^2} \frac{1}{K_{\text{ПО}}^2}, \quad (15)$$

де δ_K – приведена похибка вимірювання коефіцієнту подовження траси локації (КПТЛ).

Якщо вважати, що $\sigma_{K_{\text{ПО}}}$ задана виразом (7), а

$K_{\text{ПО}} = K_{\text{ПО max}}$, то із (15) отримуємо:

$$\alpha_{2\max}^2 = 0,5 + \frac{1}{\delta_R^2} \frac{(K_{\text{ПО max}} - 1)^2}{24K_{\text{ПО max}}^4}. \quad (16)$$

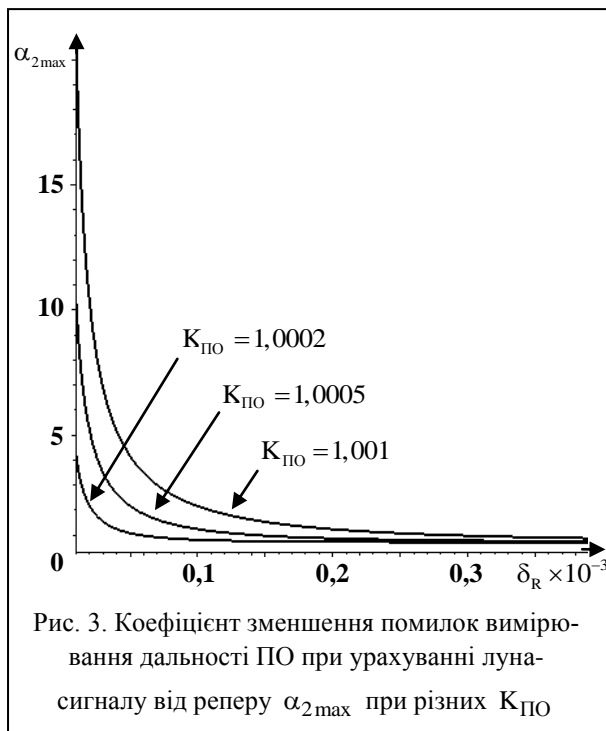
На рис. 3 приведено приклад залежності $\alpha_{2\max}$ від значення приведеної похибки вимірювання дальності δ_R при різних $K_{\text{ПО}}$ (ТХВ різних типів). Як можна побачити із рис. 3, для приповерхневих ТХВ вираш від комплексування вимірювань буде максимальним і тим більшим, чим меншу приведену помилку вимірювання дальності забезпечує РЛС.

Якщо в (15) знехатимемо малим відхиленням КПТЛ для ТХВ над акваторією Чорного моря від одиниці, то отримуємо:

$$\delta_R = \frac{\delta_K}{\sqrt{2\alpha_{2\max}^2 - 1}}, \quad (17)$$

де δ_K – приведена помилка вимірювання КПТЛ.

Із (17) отримуємо, що для можливості застосування комплексування вимірювань, приведена похибка вимірювання дальності РЛС повинна бути меншою, ніж приведена похибка вимірювання КПТЛ, яка для розрахункового методу складає $\delta_{K_{\text{розр}}} = 0,29 \cdot 10^{-3}$.



Висновки

Над акваторією великих водоймищ (озер, морів, океанів) та в районах, прилежних до них, умови поширення радіохвиль часто відрізняються від стандартних. В залежності від синоптичної ситуації надрефракційне ПРХ і поява тропосферних хвильоводів може спостерігатися і над значними ділянками суші. Непрямолінійне поширення радіохвиль у тропосферних хвильоводних каналах призводить до збільшення помилок вимірювання дальності. Величина цієї додаткової помилки може бути такою, що вже стає необхідним враховувати її вплив на точнісні показники РЛС, як існуючих, так і перспективних. Особливо це стосується систем зовнішньотраєкторних вимірювань, які мають малу приведену похибку вимірювання дальності δ_R . В Україні таке обладнання використовується, наприклад, на приморському полігоні "Чауда".

Перспектива дообладнання полігонів, розташованих у приморських районах, новітніми радіолокаційними засобами із покращеними точнісними характеристиками потребує врахування впливу наявності розділу середовищ із різними електричними властивостями (межа суша-море) та стану середовища поширення радіохвиль в таких місцевостях на якість роботи РЛС. Для РЛС, що розташовуються на узбережжі Чорного моря, непрямолінійне поширення радіохвиль необхідно враховувати якщо їх $\delta_R \leq 0,35 \cdot 10^{-3}$.

Комплексування вимірювань (або вимірювачів) дозволяє зменшити помилки вимірювання дальності повітряних об'єктів в тропосферних хвильоводах. При цьому δ_R повинна бути меншою, ніж приведена

похибка визначення коефіцієнту подовження траси локації δ_K . Для розрахункового методу для підведених тропосферних хвильоводів, характерних для акваторії Чорного моря, $\delta_{K\text{розр}} = 0,29 \cdot 10^{-3}$.

В подальшому необхідно провести додаткові дослідження по уточненню просторово-часового розподілу параметрів тропосферних хвильоводів над акваторією Чорного моря для визначення $K_{\text{ПО max}}$ для ТХВ різних типів.

Список літератури

1. Распространение ультракоротких радиоволн: Пер. с англ. [Текст] / Под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.
2. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС [Текст] / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
3. Фехтел К. Внимание: тропосферное прохождение [Текст] / К. Фехтел // Радио. – 1976. – №1. – С. 12-14.
4. Polyarus A.V. Elektromagnetic field of an antenna located near a sea tropospheric waveguide [Текст] / A.V. Polyarus, A.A. Koval, E.V. Tsekhmistrov // Proc. of III-rd International Conference on Antenna Theory and Techniques. – 1999. – P. 138-139.
5. Постановление №6 Совета министров Союзного государства "О предложении о разработке проекта научно-технической программы союзного государства "Разработка унифицированного мобильного многофункционального комплекса внешнетраекторных измерений двойного назначения на базе специальных оптоэлектронных систем и сверхвысокочастотных элементов" на 2007-2010 годы" (принято 26.04.2007) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lawrussia.ru/texts/legal_406/doc406a227x924.htm.
6. Бобнев М.П. Комплексные системы радиоавтоматики [Текст] / М.П. Бобнев, Б.Х. Кривицкий, М.С. Ярлыков. – М.: Сов. радио, 1968. – 232 с.
7. Астафьев Г.П. Радиотехнические средства навигации летательных аппаратов [Текст] / Г.П. Астафьев, В.С. Шебшаевич, Ю.А. Юрков. – М.: Сов. радио, 1962. – 961 с.
8. Ворона А.И. Метод повышения точности измерения дальности до цели в условиях существования морского тропосферного волновода [Текст] / А.И. Ворона, В.Л. Мисайлов, О.А. Окунев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2004. – Вып. 3(9). – С. 19-21.
9. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок: [Текст] Перев. с англ. / Дж. Тейлор. – М.: Мир, 1985. – 272 с.
10. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника [Текст]: – 2-е изд., перераб и доп. / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
11. РМГ 29-99. Группа Т80. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения [Текст]. – Введ. 2001-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 134 с.
12. РЛС разведки воздушных и баллистических целей П-18/2005 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ust.com.ua/main.php?mode=p18_2005&lang=rus&f=1.
13. Мобильная многофункциональная 3-координатная РЛС с цифровой антенной решеткой (МФ РЛС с ЦАР) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ust.com.ua/main.php?mode=mr&lang=rus&f=1>.

14. Радиолокационная станция программного обзора с кольцевой фазированной антенной решеткой (РЛС ПО КАР) "Кольцо" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rusarmy.com/pvo/pvo_vvs/rls_koltso.html.

15. Радиолокационные станции "Фрегат-МАЭ", "Фрегат-МАЭ-1" "Фрегат-МАЭ-2" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rusarmy.com/pvo/pvo_vmf/rls_fregat-mae_mae-1_mae-2.html.

16. Оружие России [Текст]: Каталог. – М.: Военный парад, 2002. – 626 с.

17. Карлов В.Д. Свойства морского тропосферного волновода как элемента радиоканала [Текст] / В.Д. Кар-

лов, В.Л. Мисайлов, Н.Н. Петрушенко // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2008. – Вып. 6 (73). – С. 54-58.

18. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений [Текст] / А.Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1968. – 97 с.

19. Михайлов Н.Ф. Радиометеорологические исследования над морем [Текст] / Н.Ф. Михайлов, А.В. Рыжков, Г.Г. Щукин. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 207 с.

Надійшла до редколегії 28.12.2009

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

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В МОРСКОМ ТРОПОСФЕРНОМ ВОЛНОВОДЕ

В.Л. Мисайлов

Проведена оценка влияния непрямолинейного распространения радиоволн в тропосферных волноводах (ТВВ) над акваторией Черного моря на точность измерения дальности воздушных объектов и целесообразности его учета для современных и перспективных радиолокационных станций. Рассмотрен способ повышения точности измерения дальности воздушных объектов, которые находятся внутри морского тропосферного волновода за счет использования сигнала, отраженного от объекта с априорно известными координатами (комплексирование измерений) и данных о параметрах ТВВ.

Ключевые слова: ошибка измерения, тропосферный волновод, непрямолинейное распространение радиоволн, комплексирование измерений.

AN INCREASE OF EXACTNESS OF DISTANCE MEASURING OF AIR OBJECTS IN THE MARINE TROPOSPHERIC WAVEGUIDE

V.L. Misaylov

In the article is appraised the influence of unstraight radio waves distribution in tropospheric waveguides (TWG) above the water area of the Black Sea on the measuring exactness of air objects distance and suitability of its record for the modern and perspective radio-location stations. The method of increase of measuring exactness of the distance of air objects, which are inside the marine tropospheric waveguide due to the usage of signal, reflected from the object with the co-ordinates (complexation measurings) known a priori and information about the parameters of TWG, is considered.

Keywords: measuring error, troposphere waveguide, unstraight radio waves distribution, complexation measurings.