

УДК 621.396

М.М. Петрушенко

Головна інспекція Міністерства оборони України

## РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ФЛУКТУАЦІЙНОЇ ПОМИЛКИ ВИМІРЮВАННЯ КУТОВОЇ КООРДИНАТИ МАЛОВИСОТНОЇ ЦІЛІ ПРИ ЇЇ ЛОКАЦІЇ В МЕЖАХ ПРЯМОЇ ВИДИМОСТІ

В статті представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень флуктуаційної помилки вимірювання куткової координати маловисотної цілі при її локації в межах прямої видимості, які обумовлені випадковими неоднорідностями середовища. В роботі приведені залежності флуктуації кутів приходу від кута місця, отримані в результаті теоретичних розрахунків та експериментально. Порівняльний аналіз показує добрий збіг результатів розрахунків з експериментом в метровому діапазоні хвиль. Обґрунтовано, що при локації в зоні прямої видимості і під кутами місця більше  $5^\circ$  випадкові помилки менше регулярних, а за межами дальності прямої видимості ці помилки в 2 – 3 рази перевищують регулярні.

**Ключові слова:** випадкові помилки, неоднорідності тропосфери, флуктуації кутів приходу.

### Вступ

**Постановка проблеми.** При виявленні та супроводженні маловисотних цілей (МЦ) достатньо жорсткі вимоги висуваються до вимірювань їх куткових координат. Якщо на відстанях, що не перевищують дальність прямої видимості (ДПВ), мова може йти про вимірювання як кута місця, так і азимуту цілі, то за межами ДПВ можна вести мову тільки про азимутальну інформацію. При цьому, оскільки розглядаються тільки МЦ, то, як показують натурні експерименти [1], станції наведення ракет маловисотних зенітних ракетних систем не забезпечують достовірність виміру малих кутів місця повітряних цілей над землею менше 10 градусів і мають недостатню для наведення вогневих засобів точність вимірювання малих кутів місця. Особливо складною є задача вимірювання куткових координат при необхідності збільшення дальності виявлення МЦ та необхідності їх знищення на великих дальностях. В цьому випадку додаткові, у порівнянні з ДПВ, спотворення фазової структури сигналів, особливо в тропосферних радіохвилеводах (ТРХ), ускладнюють задачу вимірювання куткової координати. В цьому випадку крім впливу відбиттів від земної поверхні, обумовлену ТРХ, багатопромієвість, суттєвий вплив вносять і неоднорідності тропосфери. Оскільки в [1] вдалося оцінити збільшення флуктуаційної помилки вимірювання куткової координати цілі при її локації в ТРХ у порівнянні з локацією в межах ДПВ, представляє інтерес оцінити цю флуктуаційну помилку при локації МЦ в межах дальностей, що не перевищують ДПВ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В відомій літературі [1 - 4] такий матеріал був у розрізному вигляді, тому доцільно узагальнити дані та провести оцінку впливу регулярної тропосфери і випад-

кових помилок, які вносяться нижньою частиною тропосфери на точність виміру куткових координат маловисотної цілі. Необхідність таких оцінок була обумовлена також тим, що, як відомо [2, 3], при локації під великими кутами місця регулярна помилка при вимірюванні куткової координати суттєво перевищує випадкову. У зв'язку з цим, компенсації регулярної помилки у відомій літературі приділено значну увагу і розроблено методи, які добре себе зарекомендували [3, 4]. Разом з цим, при локації маловисотних цілей, особливо на дальностях, що перевищують ДПВ, дослідження [4] показали зростання випадкової складової помилки вимірювання куткової координати. Особливо зростання випадкової складової помилки вимірювання було зафіксовано по цілях, лоцюємих над морем [5], що обумовлено аномальністю середовища розповсюдження радіохвиль.

**Метою статті** є порівняння експериментально отриманих даних з результатами теоретичних розрахунків флуктуаційної помилки вимірювання куткової координати маловисотної цілі при її локації в межах дальностей, що не перевищують ДПВ.

### Основна частина

Жорсткість вимог, що висуваються до точності виміру куткових координат радіолокаційних цілей, викликає необхідність врахування регулярних випадкових помилок, внесених середовищем розповсюдження. У [5 - 7] проводиться аналіз помилок, джерелом яких є регулярні неоднорідності середовища розповсюдження. Показано, що ці помилки обумовлюються станом середовища, залежать від кута місця, під яким відбувається випромінювання і прийом радіохвиль, довжини хвилі, дальності та рядом інших факторів. Згідно даних, приведених у [7], регулярні помилки вимірювання куткових координат цілей знаходяться в межах 1 – 40 куткових хвилин.

Проаналізуємо помилки, обумовлені випадковою зміною стану атмосфери і порівняємо їх з регулярними. Мірою помилок при вимірі кутової координати, внесених випадковими неоднорідностями середовища розповсюдження, може бути середньоквадратична помилка флуктуацій кутів приходу радіосигналів. На практиці для оцінки дисперсії флуктуації кутів приходу радіосигналів, обумовлених неоднорідностями тропосфери ( $\sigma_{\tau_0}^2$ ), використовують [7] співвідношення (1):

$$\sigma_{\tau_0}^2 = 4\pi\sigma_n^2 \frac{L_T}{L_0 \sin \alpha}, \quad (1)$$

де  $\sigma_n^2$  – дисперсія флуктуацій коефіцієнта заломлення в тропосфері;  $L_T, L_0$  – ефективна товщина шару тропосфери і розмір неоднорідностей;  $\alpha$  – кут місця.

У табл. 1 приведені обчислені по формулі (1) значення середньоквадратичних помилок кутів приходу радіосигналів для слабо і сильнозбуреної тропосфери при різних розмірах неоднорідностей. При використанні співвідношення (1) вважають, що кореляційна функція діелектричної проникності має гаусовий вигляд [7] і записується у вигляді:

$$K_g(r) = \sigma_g^2 \exp(-r^2/\rho^2), \quad (2)$$

де  $\rho$  – радіус просторової кореляції.

Таблиця 1

Значення середньоквадратичних помилок кутів приходу радіосигналів (модель Гауса)

Розмір неоднорідностей (м)	Слабкозбурена тропосфера $\sigma_n = 10^{-6}$	Сильнозбурена тропосфера $\sigma_n = 10^{-5}$
$L_0 = 5$	63''	10,5'
$L_0 = 10$	44''	7,3'
$L_0 = 50$	20''	3,3'
$L_0 = 100$	14''	2,3'

Однак реальне середовище розповсюдження радіохвиль є анізотропним і локально однорідним, статистичні властивості якого краще описувати структурною функцією  $D(r)$ , що підкоряється закону двох третин [5]:

$$D(r) = C_g^2 \cdot r^{2/3} = 2\sigma_g^2 \left( r / L_0 \right)^{2/3}, \text{ при } l_0 \ll r \ll L.$$

У цьому випадку дисперсія флуктуацій кутів приходу визначається наступним виразом:

$$\sigma_0^2 = 0.82 \cdot C_g^2 \cdot L \cdot l_0^{-1/3}, \quad (3)$$

де  $C_g^2$  – структурна характеристика діелектричної проникності;  $L, l_0$  – зовнішній і внутрішній масштаби неоднорідностей.

Використовуючи формулу (3), у табл. 2 приведені результати розрахунку середньоквадратичних значень флуктуацій кутів приходу. Порівнюючи результати обчислень, відмітимо, що флуктуація кутів приходу, що обчислюються в припущенні гаусової кореляційної функції діелектричної про-

кності, менше, ніж при використанні для розрахунків структурної функції, що описується законом двох третин. Важливо мати дані експериментальних досліджень флуктуацій кутів приходу, тому що формули (1, 3) припускають використання кореляційної і структурної функції певного виду.

На рис. 1 – 3 приведені залежності флуктуацій кутів приходу від кута місця, викликаних випадковими неоднорідностями середовища розповсюдження, і помилок у вимірі кута приходу відбитого сигналу, внесених регулярно середою за рахунок рефракції.

Таблиця 2

Значення середньоквадратичних помилок кутів приходу радіосигналів (модель Калмагорова)

Розмір неоднорідностей (м)	Слабкозбурена тропосфера $\sigma_n = 10^{-6}$	Сильнозбурена тропосфера $\sigma_n = 10^{-5}$
$L_0 = 5$	128''	21'
$L_0 = 10$	104''	17,3'
$L_0 = 50$	60''	10'
$L_0 = 100$	48''	8'

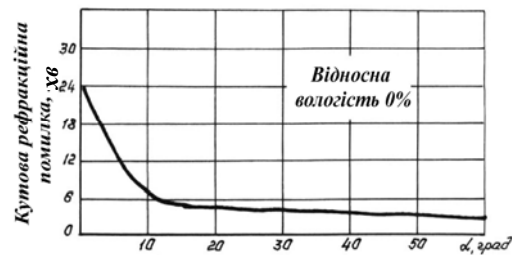


Рис. 1. Результати розрахунків

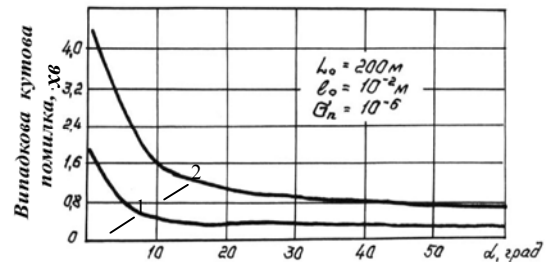


Рис. 2. Результати теоретичних (1) і експериментальних (2) досліджень

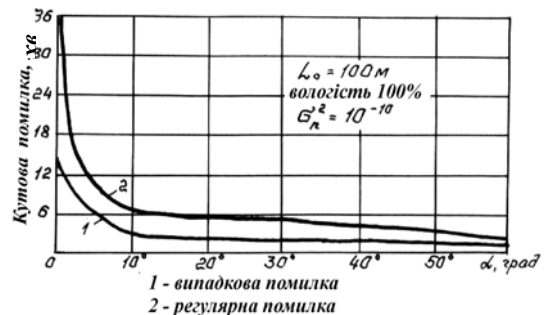


Рис. 3. Результати теоретичних (1) і експериментальних (2) досліджень

На рис. 4 приведені графіки, що характеризують зміну флуктуацій кутів приходу відбитого сигналу від довжини хвилі. Крива 2, отримана в [4] на підставі експериментальних досліджень. Крива 1 розрахована теоретично по формулі (1). З рис. 4 видно, що результати експериментальних даних приблизно збігаються з теоретичними. З графіків можна стверджувати про добрий збіг результатів розрахунків з експериментом на метрових довжинах хвиль.

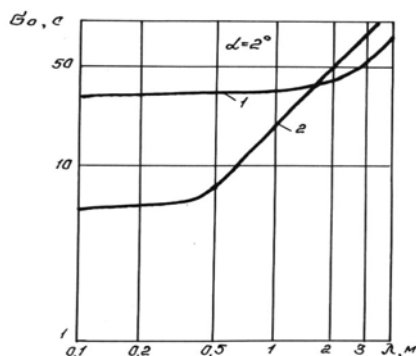


Рис. 4. Результати теоретичних (1) і експериментальних (2) досліджень

Порівняння цих графіків і даних, приведених у таблицях, дозволяє зробити висновок, що при локації в зоні прямої видимості і під кутами місця більше  $5^\circ$  випадкові помилки менше регулярних. Однак при локації під малими кутами місця й особливо над морем та на дальностях, більших за ДПВ, ці помилки в 2–3 рази перевищують регулярні.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, для підвищення якості радіолокаційної інформації, а саме точності вимірювання кутових координат маловисотних цілей над морем доцільно враховувати зміни метеорологічних параметрів нижніх шарів тропосфери.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФЛУКТУАЦИОННОЙ ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОЙ КООРДИНАТЫ МАЛОВЫСОТНОЙ ЦЕЛИ ПРИ ЕЕ ЛОКАЦИИ В ПРЕДЕЛАХ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

Н.Н. Петрушенко

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований флуктуационной ошибки измерения угловой координаты маловысотной цели при ее локации в пределах прямой видимости, обусловлены случайными неоднородностями среды. В работе представлены зависимости флуктуации углов прихода от угла места, полученные в результате теоретических расчетов и экспериментально. Сравнительный анализ показывает хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом в метровом диапазоне волн. Обосновано, что при локации в зоне прямой видимости и под углами места больше  $5^\circ$  случайные ошибки меньше регулярных, а за пределами дальности прямой видимости эти ошибки в 2–3 раза превышают регулярные.

**Ключевые слова:** случайные ошибки, неоднородности тропосферы, флуктуации углов прихода.

## RESULTS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF FLUCTUATION ERROR OF MEASURING OF ANGULAR COORDINATE OF LITTLEPITCH AIM AT HER LOCATION WITHIN THE LIMITS OF LINE-OF-SIGHT

M.M. Petrusenko

In the article the results of theoretical and experimental researches of fluctuation error of measuring of angular coordinate of littlepitch aim are presented at her location within the limits of line-of-sight, conditioned by casual heterogeneities of environment. Dependences of fluctuation of corners of arrival are in-process presented on a corner the places got as a result of theoretical calculations and experimentally. A comparative analysis shows the good coincidence of results of calculation with an experiment in the meter range of waves. It is reasonable, that at a location in the zone of line-of-sight and under the corners of place more than  $5^\circ$  random errors less than than regular, and outside distance of line-of-sight these errors in 2–3 pazu the regular exceed.

**Keywords:** random errors, heterogeneities of troposphere, fluctuation of corners of arrival.

Флуктуації кута приходу відбитого сигналу, обумовлені не тільки регулярними помилками (адитивні завади), але й наявністю нерегулярних помилок (мультиплікативні завади), обумовлених зміною параметрів середовища розповсюдження радіохвиль, особливо над морем. При радіолокації в зоні прямої видимості і під кутами місця більше  $5^\circ$  випадкові помилки менше регулярних. Однак при локації під малими кутами місця й особливо над морем та на відстанях, більших за дальність прямої видимості, ці помилки в 2–3 рази перевищують регулярні.

## Список літератури

1. Результаты экспериментальных исследований статистических характеристик сигналов отраженных от низколетящих целей / М.М. Петрушенко, В.Д. Карлов, В.Л. Мисайлов, С.О. Меленті // 11 НТК „Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах”, 8-9 вересня 2011 року: тези доповідей. – Феодосія: ДНВЦ МО України, 2011. – С. 141–142.
2. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: Справочник. / Я.Д. Ширма. – М.: Радиотехника, 2007. – 512с.
3. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – М.: Сов. радио, 1970. – 383 с.
4. Петрушенко М.М. Аналіз флуктуації інформативних параметрів радіолокаційних сигналів при їх розповсюдженні над морем / М.М. Петрушенко, А.В. Челпанов, В.Д. Карлов // Системи озброєння і військова техніка. – 2008. – № 4 (16). – С. 122-126.
5. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный. – М.: Сов. радио, 1972. – 249 с.
6. Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн. / Под ред. Б.А. Введенского – М.: Сов. радио, 1965. – 415 с.
7. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере / В.И. Татарский. – М.: Наука, 1967. – 548 с.

Надійшла до редколегії 9.04.2014

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