

# Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ

УДК 621.396

В.Д. Карлов<sup>1</sup>, Г.В. Певцов<sup>1</sup>, М.М. Петрушенко<sup>2</sup>, В.Л. Місайлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

<sup>2</sup> Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця

## СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ, ВІДБИТИХ ВІД МІСЦЕВИХ ПРЕДМЕТІВ В УМОВАХ АНОМАЛЬНОЇ РЕФРАКЦІЇ

Наведено результати експерименту по визначенню статистичних характеристик радіолокаційних сигналів, відбитих від місцевих предметів, розташованих за межами дальності прямої видимості, при поширенні радіохвиль в умовах аномальної рефракції над морем, який було виконано у липні 2010 року. Описана експериментальна установка та методика виконання експерименту. Показано, що амплітуда та початкова фаза відбитих сигналів розподілені за нормальним законом, а їх кореляційні функції мають осцилюючий характер.

**Ключові слова:** радіолокаційні засоби, рефракція, статистичні характеристики

### Введение

**Постановка проблеми.** Надрефракційне поширення радіохвиль призводить до виникнення тропосферних хвильоводів і збільшенню дальності дії радіотехнічних засобів [1 – 4]. Багатоприменеве поширення радіохвиль у тропосферних хвильоводах (ТХВ) призводить до зміни статистичних характеристик сигналів, що пройшли деяку відстань у ТХВ [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Більшість досліджень, присвячених поширенню радіохвиль у ТХВ, зосереджено на визначенні коефіцієнту ослаблення вздовж радіотраси та його залежності від параметрів хвильоводу [1 – 8]. Експериментальні дані, які є до теперішнього часу, про статистичні характеристики сигналів, що пройшли деяку відстань в тропосферному хвильоводі, отримані лише для ТХВ випаровування [9 – 11]. Для підведених хвильоводів у [12] були виконані лише теоретичні оцінки.

**Метою** статті є висвітлення результатів експериментального дослідження статистичних характеристик сигналів, відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції.

### Експериментальна установка

В якості радіолокаційного вимірника було використано розташовану на позиції Ай-Петрі РЛС 35Д6Д, дальністю дії якої складає 400 км. Схема експериментальної установки наведена на рис. 1.

Корисний сигнал знімався із виходів квадратурних фазових детекторів "Эхо К1" та "Эхо К2" каналу 1 блоку 354ПУ03 приймального пристрою РЛС. Для перетворення аналогового вихідного сигналу квадратурних каналів у цифрову форму та подальшого їх архівування використовувався двоканальний цифро-

вий осцилограф-приставка "Bordo" В-421 та ПЕОМ HP Compaq Evo N610с. Блок В-421 поєднується із ПЕОМ USB-кабелем. Для синхронізації роботи осцилографа та РЛС використовувався сигнал від блоку формування сигналів обміну і синхронізації 354УТ01.

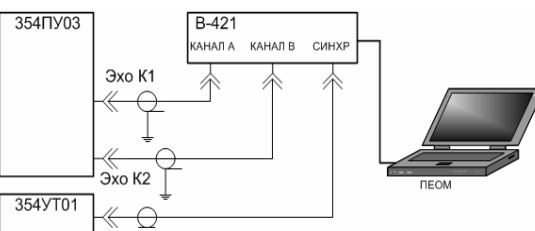
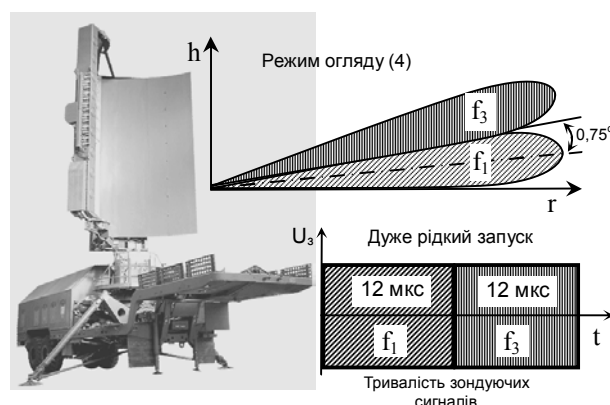


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Для подальшого зіставлення та ідентифікації вигляд індикатора кругового огляду РЛС 35Д6Д фіксувався за допомогою цифрового фотоапарату (ЦФА).

Нахил антени РЛС від вертикальної вісі складає  $-1^{\circ}20'$ . РЛС працювала у 4 режимі огляду простору із дуже рідким запуском.

### Проведення експерименту

Експеримент було виконано 28 липня 2010 року з 8.00 до 14.00. Порядок виконання вимірювань був наступний:

- РЛС вмикалась та проводився її контроль функціонування (КФ);

- після КФ та прийняття рішення про справність РЛС, радіолокаційна станція переводилась у 4-й режим огляду простору при дуже рідкому запуску (частота повторення зондуючих сигналів  $F_{\Pi} = 340\text{--}400$  Гц), що дозволяє отримувати відбиття на максимальній дальності;

- осцилограф В-421 під'єднувався до ПЕОМ та проводилось його юстування;

- осцилограф В-421 з'єднувався із 354ПУ03 та 354УТ01 відповідно до схеми рис.1, переводився у режим "Автоматичний" та контролювалась наявність сигналів у каналах;

- вимикалась система захисту від завад;

- на протязі 1 хвилини на індикаторі кругового огляду (ІКО) оператором спостерігалась загальна обстановка, яка також фіксувалась ЦФА (рис.2);

- обирався об'єкт, відбиття від якого не спостерігались у звичайних умовах і який класифікувався як місцевий предмет за межами прямої видимості (ПВ), і визначався його азимут;

- вимикалось обертання антени РЛС і вона встановлювалась у визначеному напрямку;

- осцилограф В-421 переводився у режим "Очікування" і виконувався запис та архівування відбитого сигналу на жорсткий диск ПЕОМ.

На рис. 2 показано зовнішній вигляд ІКО РЛС. Цифрами позначені області інтенсивних відбиттів від гірських масивів та узбережжя.

Область, що позначена на рис.2 цифрою 1, відповідала відбиттям від Кримських гір, які оточують позицію РЛС, і з аналізу виключалась.

Область, що позначена на рис.2 цифрою 2 за напрямом та відстанню відповідає відбиттям від Таманського півострова та Кавказьких гір, висота яких досягає 700 м.

Область, що позначена на рис.2 цифрою 3, за напрямом та відстанню відповідає відбиттям від Західних Понтійських гір, висоти яких 1500...2000 м.

Знайдемо дальність ПВ для цих об'єктів, за умови, що висота розташування позиції РЛС складає приблизно 1300 м.

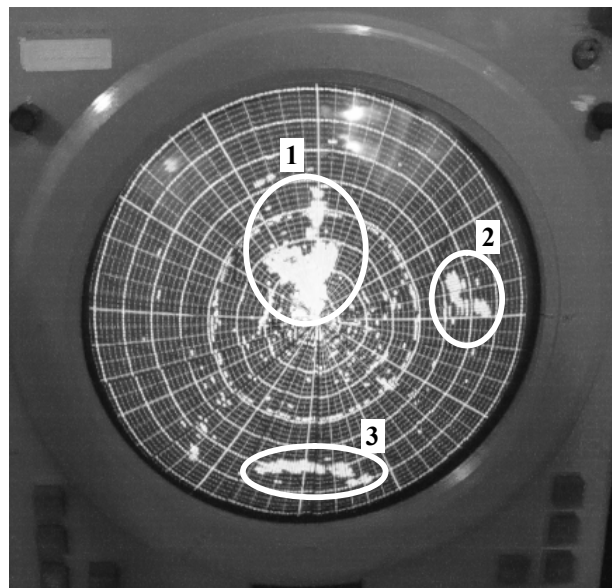
Відомо [13], що дальність ПВ об'єктів  $D_{\text{ПВ}}$ , яка вимірюється у кілометрах, визначається як:

$$D_{\text{ПВ}} = \sqrt{2a_e} \left( \sqrt{h_{\text{РЛС}}} + \sqrt{h_0} \right), \quad (1)$$

де  $a_e = \frac{a_3}{1 + a_3 g_N \cdot 10^{-6}}$  – еквівалентний радіус Землі;

$a_3 = 6370$  км – справжній радіус Землі;  $g_N = \frac{\partial N}{\partial h}$  – вертикальний градієнт індексу заломлення повітря,

при нормальній рефракції,  $g_N = -0,04$  N-од./м;  $h_{\text{РЛС}}$ ,  $h_0$  – висота центру антени РЛС та об'єкту яка вимірюється у кілометрах над поверхнею моря відповідно.



1 – відбиття від Кримських гір;  
2 – відбиття від Таманського півострова та Кавказьких гір;  
3 – відбиття від Західних Понтійських гір

Рис. 2. Вигляд ІКО

Для Кавказьких гір дальність ПВ в при нормальній рефракції дорівнює 260 км, що менше дальності відбиттів зони 2, а для Західних Понтійських гір – 300...330 км, що приблизно дорівнює дальності відбиттів зони 3. Таким чином відбиття зони 2 отримані від об'єктів, що знаходяться за межами ПВ й були обрані для подальшого дослідження.

На рис. 3 показано зображення ІКО, яке було накладене на картографічну основу.

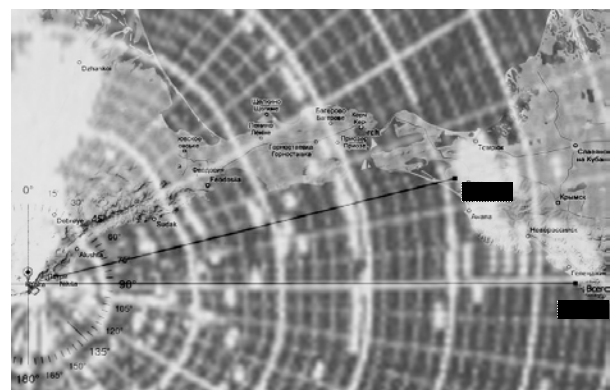


Рис. 3. Накладання фотографії ІКО на картографічну основу

Як можна побачити з рисунку 3, відбиття на ІКО відповідають не лише горам, а й рівнинній частині Таманського півострова, де висоти місцевих предметів складають приблизно 100 м над рівнем моря. Підставивши ці дані у (1), знаходимо, що за умов нормальної рефракції дальність ПВ складає 190 км, тобто на 40% менше, ніж отримано. Це екс-

периментально підтверджує розрахунки, виконані у [14]. Для отримання відбиттів від Таманського півострову вертикальний градієнт індексу заломлення повинен складати майже  $-0,1$  N-од./м, тобто приблизно у 2,5 рази перевищувати нормальне значення.

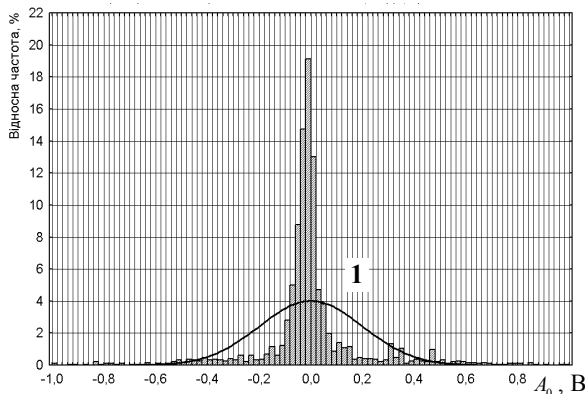
Необхідно відмітити, що при  $h_{РЛС}=1300$  м,  $h_0=100$  м значення  $D_{ПВ}=260$  км досягаються також і при  $g_N=-0,22$  N-од./м, тобто в умовах надрефракції, тому виникає питання щодо механізму поширення радіохвиль.

За час проведення експерименту площа і яскравість відбиттів, що фіксувались на ІКО РЛС 35Д6Д, зменшувалась та після 14.00 віддзеркалення зникли зовсім.

### Результати експерименту

Для запису сигналів, віддзеркалених від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції, антена РЛС була встановлена на азимут  $85^\circ$ , де тривалий час спостерігались яскраві відбиття. Для подальшої обробки використовувались значення амплітуди сигналів, що за своїм часовим положенням відповідали місцезнаходженню гори Круглої (азимут  $85^\circ$ , дальність 285 км). Для статистичного аналізу було використано 4984 значення напруги у квадратурних каналах РЛС. Результати аналізу показані на рис.4-7. Питання більш точного підбору законів розподілу випадкових величин для апроксимації результатів вимірювань є матеріалом для наступних публікацій.

На рис. 4 наведено гістограма розподілу амплітуди відбитого сигналу. Плавна крива, яка апроксимує цей розподіл та позначена на рис.4 цифрою 1 відповідає нормальному закону із математичним очікуванням (МО)  $m_{A_0}=0$  та середньоквадратичним відхиленням (СКВ)  $\sigma_{A_0}=0,20$ .

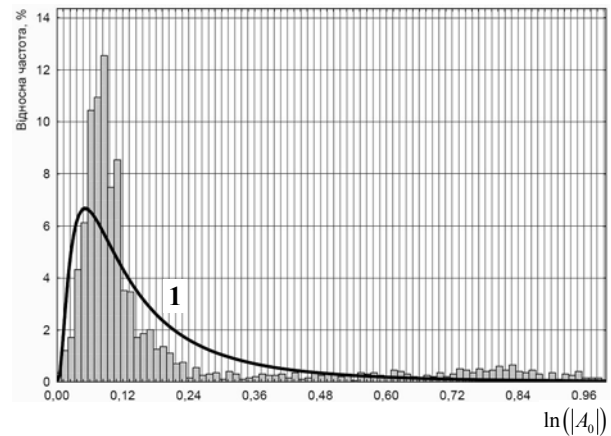


1 - графік функції нормального розподілу ( $m_{A_0}=0, \sigma_{A_0}=0,20$ ).

Рис. 4. Гістограма розподілу нормованої амплітуди відбитого сигналу

На рис. 5 наведено гістограма розподілу модуля амплітуди відбитого сигналу. Плавна крива, яка апроксимує цей розподіл та позначена на рис.5 цифрою 1

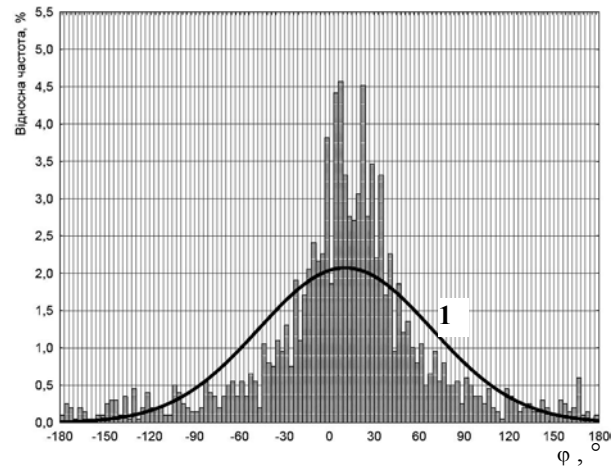
відповідає логнормальному закону із параметрами  $\mu=-2,13, \sigma=0,92$ .



1 - графік функції логнормального розподілу ( $\mu=-2,13, \sigma=0,92$ ).

Рис. 5. Гістограма розподілу модуля амплітуди відбитого сигналу

На рис. 6 наведено гістограма розподілу початкової фази відбитого сигналу. Плавна крива, яка апроксимує цей розподіл та позначена на рис.6 цифрою 1 відповідає нормальному закону із МО  $m_\varphi=10,6^\circ$  та СКВ  $\sigma_\varphi=57,7^\circ$ .



1 - графік функції нормального розподілу ( $m_\varphi=10,6^\circ, \sigma_\varphi=57,7^\circ$ ).

Рис. 6. Гістограма розподілу фази

На рис. 7 наведено результати кореляційного аналізу даних виконаного експерименту. Штрихпунктирною лінією позначена нормована кореляційна функція  $R_{|A|}(\tau)$  модуля амплітуди відбитого сигналу, а пунктирною лінією - нормована кореляційна функція  $R_\varphi(\tau)$  фази відбитого сигналу. Як можна побачити на рис. 7, функції  $R_{|A|}(\tau)$  та  $R_\varphi(\tau)$  мають осцилюючий характер.

### Висновки

В умовах аномальної рефракції при поширенні електромагнітних хвиль над морем амплітуда та

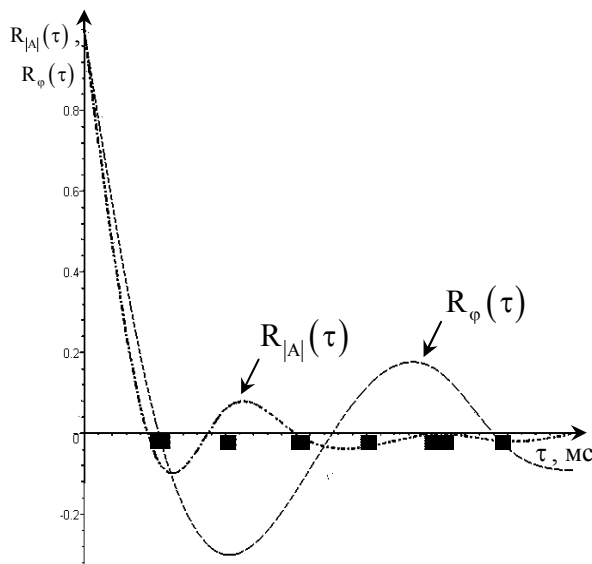


Рис. 7. Кореляційні функції модуля амплітуди та фази відбитого сигналу.

початкова фаза радіолокаційних сигналів, відбитих від місцевих предметів, які знаходяться за межами дальності прямої видимості, розподілені за нормальним законом, а модуль амплітуди сигналу – за логнормальним законом. При цьому нормовані кореляційні функції амплітуди і фази відбитого сигналу мають осцилюючий характер.

### Список літератури

1. Распространение ультракоротких радиоволн / Под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.
2. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный – М.: Сов. радио, 1972. – 463 с.
3. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
4. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью / Л.М. Лобкова – М.: Радио и связь, 1991. – 256 с.
5. Рекомендация МСЭ-R P.834-6. Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн [Елек-

тронний ресурс] – Режим доступа: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.834-6-200701-I/en>.

6. Карлов Д.В. Потенциальные показатели качества обнаружения низколетящих целей в условиях существования тропосферного волновода над морской поверхностью / Д.В. Карлов, В.Л. Мисайлов, Ю.И. Рафальский // Системы обработки информации. – 2003. – Вып. 5. – С. 196-201.

7. Карлов В.Д. Свойства морского тропосферного волновода как элемента радиоканала / В.Д. Карлов, В.Л. Мисайлов, Н.Н. Петрушенко // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2008. – Вып. 6 (73). – С. 54-58.

8. Мисайлов В.Л. Обнаружение маловысотных целей на загоризонтных дальностях над морским тропосферным волноводом / В.Л. Мисайлов, Н.Н. Петрушенко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2004. – Вып. 137. – С. 113-117.

9. Морская радиолокация / Под ред. В.И. Винокурова. – Л.: Судостроение, 1986. – 256 с.

10. Зуйков В.А. Характеристики распространения радиоволн СВЧ диапазона в приводном слое / В.А. Зуйков, Ю.А. Педенко, В.Б. Разсказовский // Распространение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: сб. науч. тр. – Х.: Ин-т радиофизики и электроники АН УССР, 1989. – С. 76-82.

11. Степанов В.А. Статистические характеристики радиосигналов, распространяющихся в тропосферном волноводном канале над морской поверхностью / В.А. Степанов, С.И. Марухленко, М.Д. Бутаков // Тезисы докладов XVI Всесоюз. конф. по распространению радиоволн. – Часть 2. – Х.: ХПИ, 1990. – С. 82.

12. Мисайлов В.Л. Показники якості виявлення повітряних об'єктів у морському тропосферному хвилеводі / В.Л. Мисайлов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2010. – Вып. 1 (123). – С. 62-67.

13. Родос Л.Я. Электродинамика и распространение радиоволн / Л.Я. Родос. – СПб.: СЗТУ, 2007. – 90 с.

14. Арманд Н.А. Приземные зоны видимости РЛС с учетом влияния сферичности земли и радиорефракции / Н.А. Арманд, В.А. Андрианов, Б.В. Ракитин, В.Л. Фрумович, Л.И. Шульман, А.И. Ямпольская – Препр. / АН СССР, ИРЭ, №15 (238) – М., 1977. – 78 с.

Надійшла до редколегії 18.05.2011

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

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ МЕСТНЫХ ПРЕДМЕТОВ В УСЛОВИЯХ АНОМАЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ

В.Д. Карлов, Г.В. Певцов, Н.Н. Петрушенко, В.Л. Мисайлов

Приведены результаты эксперимента по определению статистических характеристик радиолокационных сигналов, отраженных от местных предметов, расположенных за пределами дальности прямой видимости, при распространении радиоволн в условиях аномальной рефракции над морем, который был выполнен в июле 2010 года. Описана экспериментальная установка и методика выполнения эксперимента. Показано, что амплитуда и начальная фаза отраженных сигналов распределены по нормальному закону, а их корреляционные функции имеют осциллирующий характер.

**Ключевые слова:** радиолокационные средства, рефракция, статистические характеристики.

### STATISTICAL DESCRIPTIONS OF RADAR'S SIGNALS, REFLECTED FROM LOCAL OBJECTS IN THE CONDITIONS OF ANOMALOUS REFRACTION

V.D. Karlov, G.V. Pevtsov, M.M. Petrusenko, V.L. Misailov

Results are demonstrated of experiment on determination of statistical descriptions of radar's signals, reflected from local objects, located outside distance of direct visibility, at distribution of radio waves in the conditions of anomalous refraction above a sea, which was executed in July, 2010. The experimental setting and method of experiment implementation are described. It is shown that amplitude and initial phase of the reflected signals is distributed on a normal law, and their correlation functions have oscillatory character.

**Keywords:** radars, refraction, statistical descriptions.