

УДК 621.396

В.Д. Карлов, А.О. Радюков, І.М. Пічугін, Д.В. Карлов

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

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 вересні 2014 року. Описана експериментальна установка та методика виконання експерименту. Показано, що амплітуда та початкова фаза відбитих сигналів розподілені за нормальним законом, а кореляційна функція фази відбитих сигналів має осцилюючий характер.

Ключові слова: радіолокаційні засоби, рефракція, статистичні характеристики.

Вступ

Постановка проблеми. Надрефракційне поширення радіохвиль призводить до виникнення тропосферних хвильоводів і збільшенню дальності дії радіотехнічних засобів [1 – 4]. Багатопробневе 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]. Для підведених хвильоводів у [10] 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 вимірювача було використано розташовану на узбережжі Азовського моря 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 цифровий 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.

Для подальшого зіставлення та ідентифікації вигляд індикатору 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.

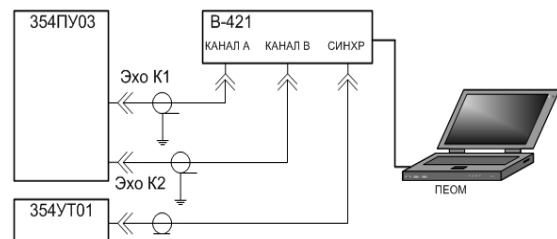
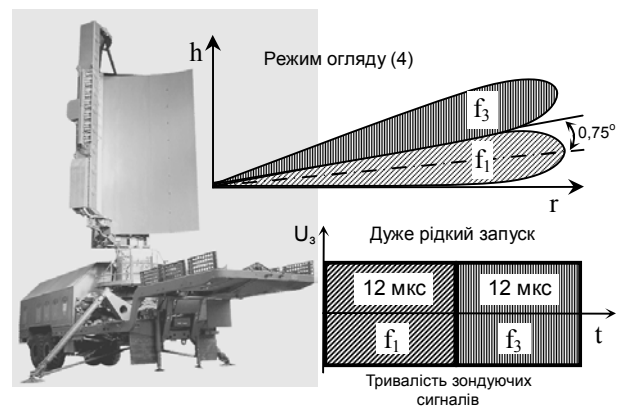


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Виконання експерименту

Експериментальні дослідження було виконано в період з 28 серпня по 02 вересня 2014 року у різний час доби на узбережжі Азовського моря. Це зображено на рис.2.

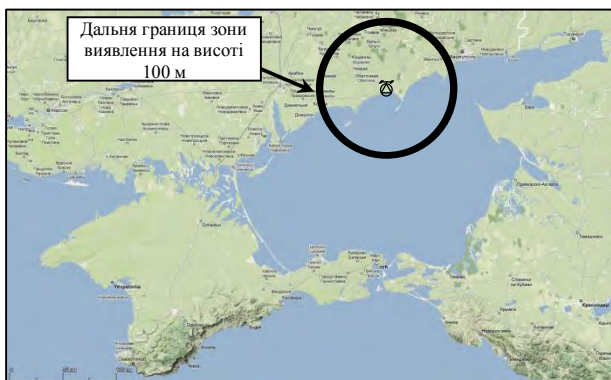


Рис. 2. Місце проведення експерименту

Порядок виконання досліджень був наступний:

- фіксувались місцеві метеорологічні умови;
- 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 рідкому запуску (частота повторення зондуючих сигналів ($F_{\Pi} = 690-820$ Гц), що дозволяє отримувати відбиття на максимальній дальності;

- вимикалась система захисту від завад;

- на індикаторі кругового огляду (ІКО) оператором спостерігалась загальна обстановка. За наявності на ІКО відміток, які ідентифікувалися, як відбиття від об'єктів, що знаходяться поза дальністю прямої видимості (ДПВ), зображення індикатора на протязі 1 хвилини фіксувалось за допомогою ЦФА. На рис. 3 наведено характерний вигляд ІКО. На рис. 4 показано зображення ІКО, яке було накладене на картографічну основу.

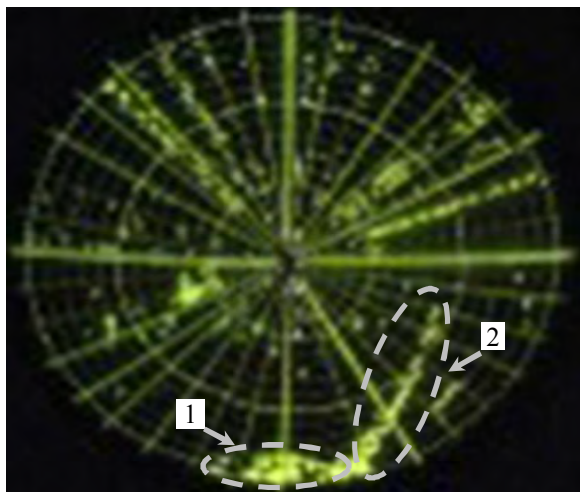


Рис. 3. Вигляд ІКО РЛС

Для ідентифікації відбиттів було проведення співставлення карт місцевості і зображення ІКО.

Як можна побачити, область інтенсивних відбиттів, позначена на рис. 3 та 4 (цифра 1), за формою і просторовим положенням відповідає Керчен-

ському півострову. Обробка відбиттів, позначених на рисунках 3 та 4 цифрою 2 вказує на те, що ці відмітки виникли внаслідок неповної компенсації відбиттів від Кавказьких гір, які розташовані на відстані, більшій інтервалу однозначного вимірювання дальності РЛС 19Ж6 (тому вони з подальшого аналізу виключені).

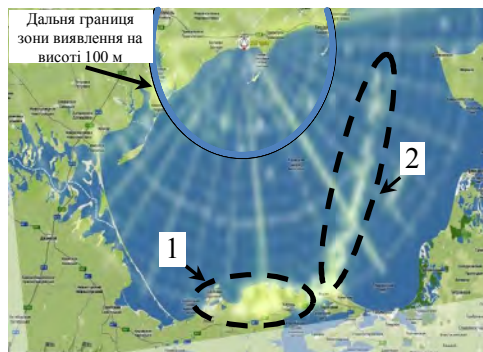


Рис. 4. Накладання фотографії ІКО на картографічну основу:

1 – відбиття від Керченського півострова;
2 – відбиття від Кавказьких гір

Північний берег Керченського півострова є урвистим, із прибережними висотами до 100 м. В північній частині півострова знаходиться гора Маяк із висотою 189 м, яка є самою високою точкою півострова. Центральна частина півострова має більш пологий рельєф.

Підвищення рельєфу починається ближче до північного узбережжя із максимальними висотами 120-180 метрів. Таким чином центральна і південна частина Керченського півострова є екранованою із півночі, що пояснює наявність на ІКО РЛС відбиттів лише від північної частини півострова.

Знайдемо дальність прямої видимості для цих об'єктів, за умови, що висота розташування фазового центру антени РЛС на позиції складає приблизно 30 м. Відомо [11], що дальність ПВ об'єктів $D_{\text{пв}}$, яка вимірюється у кілометрах, визначається як:

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

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.

Для узбережжя Керченського півострова ДПВ при нормальній рефракції дорівнює 64 км, що менше дальності відбиттів зони 1. Навіть для гори Маяк ДПВ в таких умовах складає 80 км, що майже у два рази менше, ніж відстань, з якої були отримані від-

биття. З аналізу рівняння (1) випливає, що єдиною неконтрольованою змінною є вертикальний градієнт індексу заломлення повітря g_N . В нашому випадку значення g_N склало $-0,19$ N-од./м, що майже у п'ять разів відрізняється від нормального значення.

Це експериментально підтверджує розрахунки, виконані у [12]. 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° , де тривалий час спостерігались яскраві відбиття. Для подальшої обробки використовувались значення амплітуди сигналів, що за своїм часовим положенням відповідали місцезнаходженню гори Круглої (азимут 85° , 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. 5 наведено гістограма розподілу амплітуди відбитого сигналу. Плавна крива, яка апроксимує цей розподіл та позначена на рис.5 цифрою 1 відповідає нормальному закону із математичним очікуванням (МО) $m_{A_0}=0$ та середньоквадратичним відхиленням (СКВ) $\sigma_{A_0}=0,20$.

На рис. 6 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 $\mu=-2,13$, $\sigma=0,92$.

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

На рис. 8 наведено результати кореляційного аналізу даних виконаного експерименту. Пунктир-

ною лінією позначена нормована кореляційна функція $R_\varphi(\tau)$ фази відбитого сигналу. Як можна побачити на рис .8 функція $R_\varphi(\tau)$ має осцилюючий характер.

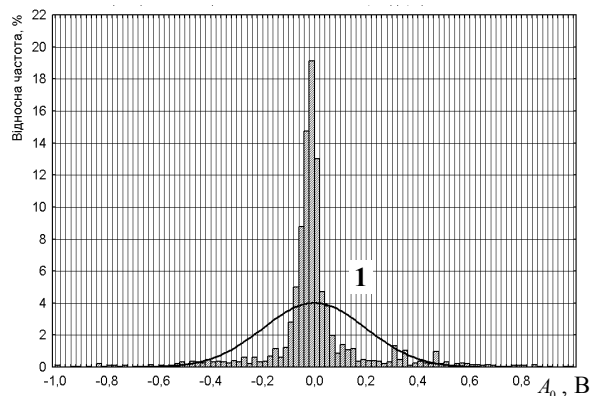


Рис. 5. Гістограма розподілу нормованої амплітуди відбитого сигналу: 1 - графік функції нормального розподілу ($m_{A_0}=0$, $\sigma_{A_0}=0,20$)

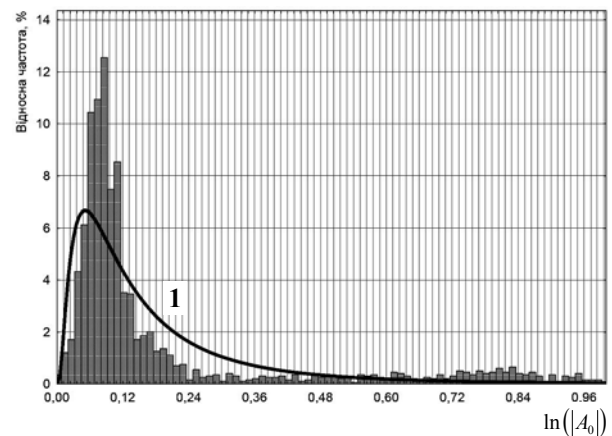


Рис. 6. Гістограма розподілу модуля амплітуди відбитого сигналу: 1 - графік функції логнормального розподілу $\mu=-2,13$, $\sigma=0,92$

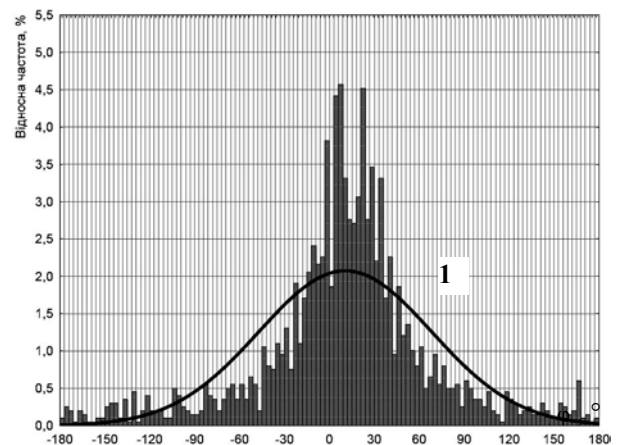


Рис. 7. Гістограма розподілу фази 1 - графік функції нормального розподілу ($m_\varphi=10,6^\circ$, $\sigma_\varphi=57,7^\circ$)

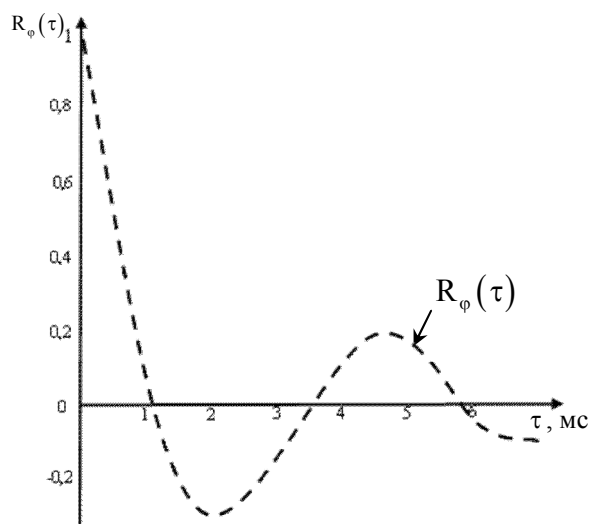


Рис. 8. Кореляційні функції модуля фази відбитого сигналу

Висновки

В умовах аномальної рефракції при поширенні електромагнітних хвиль над морем амплітуда та початкова фаза радіолокаційних сигналів, відбитих від місцевих предметів, які знаходяться за межами дальності прямої видимості, розподілені за нормальним законом, а модуль амплітуди сигналу - за лог-нормальним законом. При цьому нормована кореляційна функція фази відбитого сигналу має осцилюючий характер.

Список літератури

1. Распространение ультракоротких радиоволн: Пер. с англ. [Текст] / Под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.
2. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн [Текст] / Ф.Б. Черный – М.: Сов. радио, 1972. – 463 с.
3. 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.

4. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью [Текст] / Л.М. Лобкова – М.: Радио и связь, 1991. – 256с.

5. Рекомендация МСЭ-R P.834-6. Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн [Электронный ресурс]. – Режим доступа до матеріалу: <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 [Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст] / В.Л. Мисайлов, Н.Н. Петрушенко // Радиотехника. – 2004. – Вып. 137. – С. 113-117.

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

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

11. Родос Л.Я. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст] / Л.Я. Родос. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. – 90 с.

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

Надійшла до редколегії 21.09.2015

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, А.А. Радюков, И.Н. Пичугин, Д.В. Карлов

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 сентябре 2014 года. Описана экспериментальная установка и методика выполнения эксперимента. Показано, что амплитуда и начальная фаза отраженных сигналов распределены по нормальному закону, а корреляционная функция фаза отраженных сигналов имеет осциллирующий характер.

Ключевые слова: радиолокационные средства, рефракция, статистические характеристики.

STATISTICAL DESCRIPTIONS OF RADIO-LOCATION SIGNALS, REFLECTED FROM LOCAL OBJECTS IN THE CONDITIONS OF ANOMALOUS REFRACTION

V.D. Karlov, A.A. Radyukov, I.N. Pichugin, D.V. Karlov

Results are resulted of experiment on determination of statistical descriptions of radio-location signals, reflected from local objects, located outside distance of line-of-sight, at distribution of radio waves in the conditions of anomalous refraction above a sea, which was executed in September, 2014. The experimental setting and method of implementation of experiment is described. It is demonstrated that amplitude and initial phase of the reflected signals is up-diffused on a normal law, and the correlation function phase of the reflected signals has oscillation character.

Keywords: radars, refraction, statistical descriptions