

## ЗАХИСТ ОБТ ВІД ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА УРАЖЕННЯ

УДК 621.396.96

В.В. Атаманюк

*Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів*

### ОСОБЛИВОСТІ ДОПЛЕРІВСЬКИХ СПЕКТРІВ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ЯК ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПАРАМЕТР ДЛЯ ЇХ РОЗПІЗНАВАННЯ СТАНЦІЯМИ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ РОЗВІДКИ

*Розглянута математична модель радіолокаційного сигналу від рухомого складного об'єкта. Описані експериментальна установка для дослідження характеристик розсіювання наземних радіолокаційних об'єктів. Наведені результати експериментальних досліджень радіолокаційних сигналів деяких рухомих об'єктів. Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що існують характерні особливості доплерівських спектрів радіолокаційних сигналів, які дають можливість ідентифікувати як радіолокаційні об'єкти, так і режими їх роботи.*

**Ключові слова:** *рухомий радіолокаційний об'єкт, радіолокаційний сигнал, спектр радіолокаційного сигналу, ефект Доплера, доплерівська частота.*

#### Вступ

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.** В існуючих станціях артилерійської розвідки одним з небагатьох можливих напрямів їхньої модернізації з точки зору розпізнавання цілей є удосконалення обробки доплерівської складової радіолокаційного сигналу. В результаті розвитку комп'ютерних технологій з'явилась можливість удосконалення цих РЛС шляхом застосування розроблених інтелектуальних алгоритмів класифікації.

Основою принципу розпізнавання типу рухомої наземної цілі використовуючи доплерівську інформацію є спектральний аналіз відбитого сигналу. Як відомо, доплерівська складова сигналу, відбитого від точкової рухомої цілі, являє собою сумарний доплерівський сигнал розсіяних сукупністю так званих локальних центрів розсіювання (ЛЦР). При опроміненні рухомої цілі кожен з її локальних центрів розсіювання є джерелом своєї складової доплерівського сигналу. При цьому сумарний доплерівський сигнал перетворюється в сигнал складної форми, основна гармонійна складова якого визнається радіальною складовою швидкості руху цілі.

У процесі руху має місце механічне переміщення і вібрація окремих частин цілі відносно один одного (за рахунок нерівності дороги, роботи двигуна, особливостей конструкції і т.д.). Цей ефект обумовлює відмінність спектрів сигналів від різних типів цілей. Ці відмінності спектрів можна покласти в основу роботи апаратури розпізнавання.

Таким чином, для визначення типу цілі необхідне проведення аналізу спектра відбитого сигналу з досить високою роздільною здатністю та порівняння його із заздалегідь зареєстрованими спектрами відомих цілей (еталонами).

Отже, ефективним методом радіолокаційного розпізнавання є порівняння сигналів не у часовій а в частотній області, оскільки дозволяє виділити характерні особливості рухливості цілей, збільшити стійкість ознак розпізнавання а, отже, зменшити кількість еталонів.

Класичний пристрій розпізнавання здійснює порівняння двох зразків сигналу, один з яких є еталоном, на основі чого повинно бути винесене рішення про належність сигналу до певного типу. Критерієм може бути мінімізація ймовірності ухвалення неправильного рішення.

Основною проблемою при практичній реалізації таких пристроїв є відсутність банку даних радіолокаційних характеристик практично цікавих об'єктів. Вирішення цієї проблеми пов'язано з дослідженням характеристик розсіювання складних об'єктів і підстильних поверхонь, чому присвячений ряд наукових досліджень [1-6].

Однак і в даний час ця проблема не має прямого та однозначного вирішення. Тому спроби започаткувати нові підходи до пошуків розв'язку зазначеної проблеми є актуальними і важливими як для науки, так і для практики завданням.

Розглянемо можливість теоретичного отримання характеристик розсіювання рухомих об'єктів.

Розсіяне складним об'єктом поле у конкретній точці спостереження  $U(R, \varphi)$  є сумою  $n$  векторних полів деяких локальних центрів розсіювання  $U_i(R, \varphi)$  (ЛЦР) з відповідними фазовими і амплітудними співвідношеннями, які враховують відстань до кожного центра  $R$  та його ракурс  $\varphi$ :

$$U(R, \varphi) = \sum_{n=1}^N U_i(R, \varphi) \exp[i(\omega t - 2kR_i)]$$

Внаслідок взаємного переміщення РЛС і цілі доплерівське зміщення частоти сигналу  $f_{di}$ , розсіяного  $i$ -м ЛЦР, визначається в результаті наступного співвідношення:

$$f_{di} = \frac{2V_{ri}r_i}{c} f_0,$$

де  $r_i$  – одиничний вектор, проведений з фазового центру антени в точку інтенсивного розсіювання,  $V_{ri}$  – радіальна швидкість  $i$ -го ЛЦР,  $f_0$  – частота зонduючого сигналу.

Проте можливість отримання точних рішень обмежена тілами простої форми (сфера, конус, тор та ін.) внаслідок відомих проблем формалізації процесу розсіювання електромагнітних хвиль складною поверхнею радіолокаційного об'єкта [7-11].

Тому для багатьох практичних задач єдиним можливим рішенням є використання експериментальних досліджень.

**Метою роботи було** створення експериментальної установки, отримання та дослідження характеристик розсіювання рухомих наземних об'єктів, пошук характерних особливостей їх доплерівських спектрів.

## Виклад основного матеріалу

### Експериментальна установка

Для дослідження характеристик розсіювання рухомих об'єктів була використана установка, яка дозволяє знімати, обробляти та реєструвати радіолокаційну інформацію. Вона складається з РЛС, плати збирання та обробки даних, персонального комп'ютера (ПК) та комплексу програм.

В установці ПК і мікропроцесорний комплект з вбудованим аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) є основою побудови вимірювального пристрою електричних величин – реєстратора, осцилографа, аналізатора спектра та ін. Використовуються обчислювальні потужності або вбудованого мікропроцесора або ПК, що дозволяє вирішувати вимірювальні задачі широкого спектра складності при аналізі сигналів у часовій та частотній областях та дослідженні їх параметрів.

З виходу фазового детектора РЛС сигнал поступає на плату збирання даних, в якій відбувається його перетворення у цифрову форму, запам'ятовування та деякі види обробки. Тут же реалізований інтерфейс зв'язку з ПК, який керує режимами роботи установки (осцилограф, спектроаналізатор або реєстратор даних). Програмна частина вимірювального пристрою емулює передню панель керування. В ПК також відбувається формування банку даних та обробка даних алгоритмами, які можна гнучко змінювати.

Технічні характеристики установки:

Режими роботи: осцилограф, спектроаналізатор, реєстратор даних.

Кількість каналів: 2, частота дискретизації: 100 Гц ... 200 кГц.

Глибина пам'яті читання через буфер: 1126 відліків/канал (1 канал), 563 відліків/канал (2 канали); потокове читання: 64К відліків/канал (1 або 2 канали).

Розрядність АЦП: 10 біт.

Віконні функції: Хеммінга, Ханнінга, Блекмана, Блекмана-Харріса.

В режимі реєстратора частота дискретизації 0,01 Гц ... 200 кГц, максимальний час запису 24 години при частоті дискретизації  $F_{\text{дискр}} < 100$  Гц.

Установка забезпечує високу точність вимірювань, автоматизацію вимірювань параметрів сигналів, статистичну обробку сигналу, зчитування та обробку попередньо записаних даних, широкі аналітичні можливості та архівацію даних, детальний перегляд вибраної частини сигналу, можливість аналізу сигналів у частотній та часовій областях, наявні засоби самодіагностики та самокалібрування.

Структурна схема експериментальної установки наведена на рис. 1.

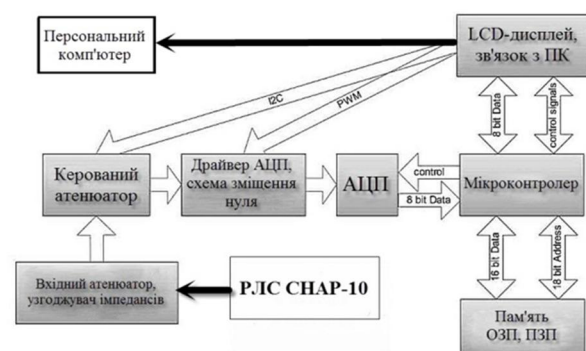


Рис. 1. Структурна схема експериментальної установки

### Результати експериментальних досліджень та обговорення

Для дослідження характеристик розсіювання рухомих об'єктів проведені експериментальні дослідження радіолокаційних характеристик рухомих цілей у діапазоні 8 мм (використовувалась РЛС SHAR-10) та 2,5 см (РЛС ПСНР-5).

Для перевірки можливостей плати збирання даних та алгоритмів обробки досліджувався гармонічний низькочастотний сигнал з виходу прецизійного генератора (рис. 2).

Можна зробити висновок, що роздільна здатність установки за частотою складає не гірше 1 Гц за рівнем -20 дБ, що достатньо для дослідження доплерівських характеристик рухомих об'єктів.

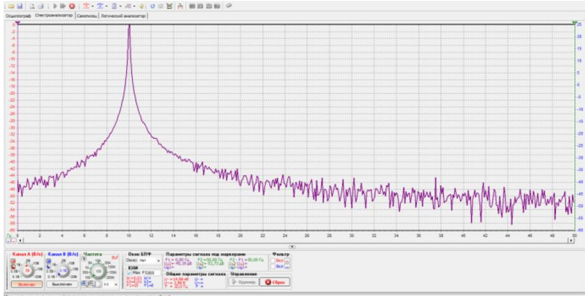


Рис. 2. Амплітудний спектр тестового гармонічного сигналу при  $f=10$  Гц

Для визначення смуги пропускання доплерівського каналу СНАР-10 досліджувався амплітудний спектр власних шумів приймача РЛС (рис. 3-4).

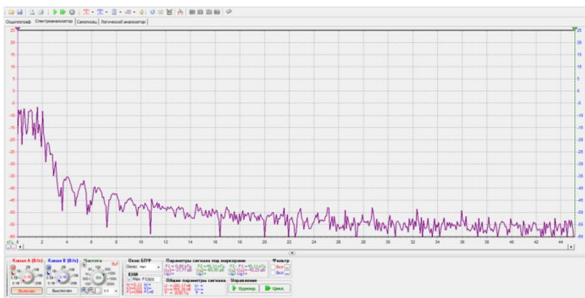


Рис. 3. Амплітудний спектр власних шумів приймача (масштаб логарифмічний, смуга аналізу 45кГц)

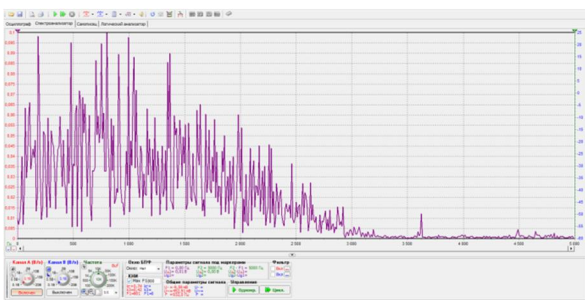


Рис. 4. Амплітудний спектр власних шумів приймача (масштаб лінійний, смуга аналізу 10кГц)

Отже, смуга пропускання доплерівського каналу РЛС СНАР-10 за рівнем -3 дБ складає 2,5 кГц, що дозволяє проводити однозначні дослідження рухомих цілей з максимальними складовими радіальних швидкостей для діапазону

$$\text{радіохвиль } 8\text{мм } V_r = \frac{f_d \lambda}{2} = 10 \text{ м/с.}$$

При досягнутій роздільній здатності за частотою цього достатньо для дослідження “тонкої структури” доплерівських спектрів повільно рухомих наземних цілей.

Для дослідження радіолокаційних сигналів спочатку необхідно отримати сигнали елементарних нерухомих об'єктів. На рис. 5 наведено осцилограма відбитого сигналу від нерухомого кутникового відбивача в режимі радіолокаційного огляду простору при використанні РЛС СНАР-10, а на рис. 6 її доплерівський спектр.

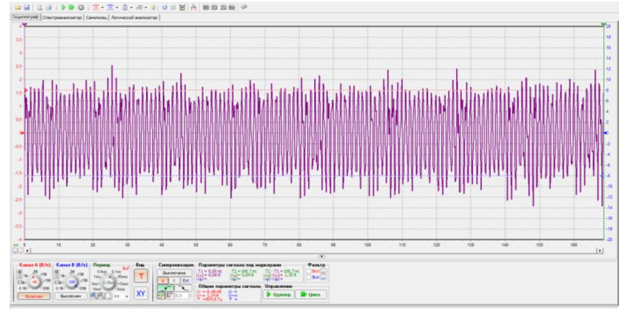


Рис. 5. Осцилограма сигналу нерухомого об'єкта в режимі радіолокаційного огляду простору

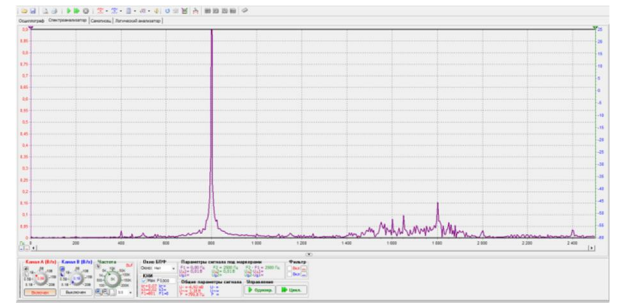


Рис. 6. Амплітудний спектр сигналу нерухомого об'єкта в режимі радіолокаційного огляду простору

Як можна бачити, основна енергія сигналу зосереджена у складовій з частотою 800 Гц. Проте ця складова не є інформативною, оскільки вона виникає внаслідок сканування діаграмою направленості антени (ДНА) з частотою 800 Гц. Інформативна складова спектра виявляється розподілена у широкій області частот через “квазіперіодичність” відбитого сигналу. Тому, дослідження доплерівської інформації про рухомі цілі необхідно виконувати у режимі слідування РЛС.

На рис. 7 наведений амплітудний спектр радіолокаційного сигналу, відбитого нерухомих об'єктом, а на рис. 8 його більш детальне зображення.

Як відомо, доплерівський спектр сигналу нерухомого об'єкта зосереджений в єдиній частотній складовій (на несучій частоті при використанні неперервного сигналу). У РЛС, які використовують радіоімпульсний сигнал, він переноситься в низькочастотну область. При цьому несуча частота відповідає нульовій частоті.

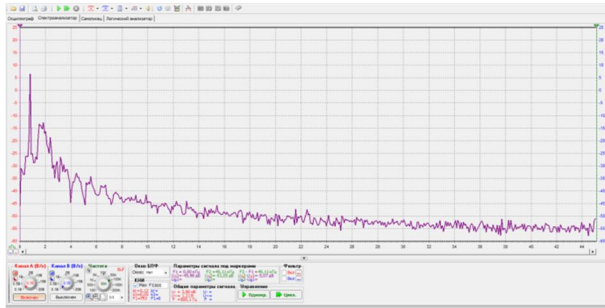


Рис. 7. Амплітудний спектр сигналу нерухомого об'єкта в режимі слідування за ціллю (масштаб лінійний, смуга аналізу 45 кГц)

Оскільки особливістю підсилювача доплерівського сигналу СНАР-10 є те, що він не пропускає постійну складову, то очікуваним результатом експерименту повинен би бути рівномірний шум у смузі пропускання приймача. Проте з рис. 8 видно, що доплерівський спектр відбитого сигналу достатньо добре структурований (у ньому можна виділити окремі спектральні складові).

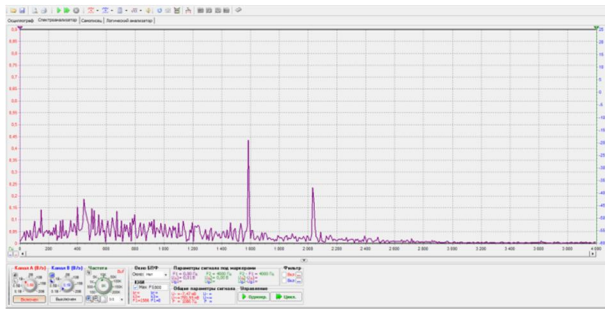


Рис. 8. Амплітудний спектр сигналу нерухомого об'єкта в режимі слідування за ціллю (масштаб лінійний, смуга аналізу 2,5 кГц)

Аналіз показує, що причина криється в особливостях проведення експерименту. Попри те, що досліджуваний об'єкт був нерухомий, РЛС СНАР-10 працювала у штатному режимі з ввімкненням автономного джерела живлення. Тобто, внаслідок "інверсії спектра" ми спостерігаємо структуру доплерівського спектра самої РЛС СНАР-10 (як би РЛС та її частини були нерухомими, а об'єкт з точки зору розсіювальних властивостей еквівалентний РЛС та рухам її частин). Фактично проводиться дослідження доплерівського сигналу гусеничного транспортного засобу з ввімкненим двигуном та іншими рухомими частинами, що має велику практичну цінність.

Можна виділити наступне:

- чітко спостерігається спектральна складова, яка виникає внаслідок вібрації корпусу СНАР-10 від роботи автономного джерела живлення (2050 Гц);

- максимальна спектральна складова (1590 Гц) найбільш імовірно виникає внаслідок вібрації корпусу СНАР-10 від роботи компресора підтримання тиску у хвилевідній системі;

- в області 400-500 Гц виникають складові внаслідок вібрації корпусу від роботи вентиляторів охолодження СНАР-10.

На рис. 9-10 наведені доплерівські спектри сигналів, відбитих різними природними неоднорідностями (кущі). Як видно, особливостями доплерівських спектрів є розширення вже описаних спектральних складових, яке виникає внаслідок власних коливань елементів кущів від вітру.

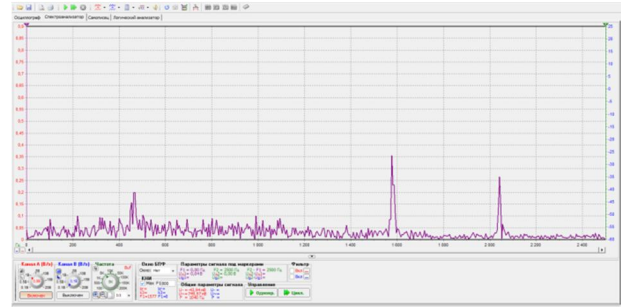


Рис. 9. Амплітудний спектр сигналу нерухомого об'єкта в режимі слідування за ціллю (масштаб лінійний, смуга аналізу 2,5 кГц)

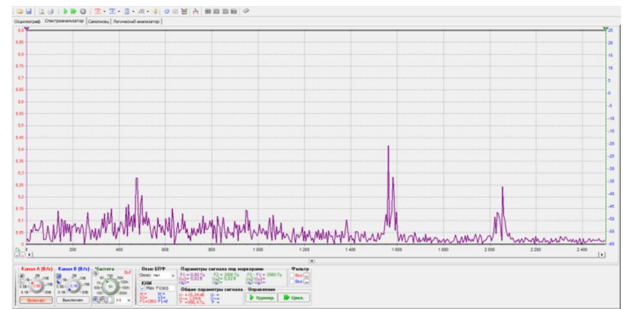


Рис. 10. Амплітудний спектр сигналу нерухомого об'єкта в режимі слідування за ціллю (масштаб лінійний, смуга аналізу 2,5 кГц)

Також досліджувались доплерівські спектри рухомих об'єктів у см-діапазоні хвиль (використовувалась РЛС ПСНР-5). На рис. 11 наведені доплерівські спектри колісних транспортних засобів, які рухаються по дрібнорегулярній структурі (бруківці).

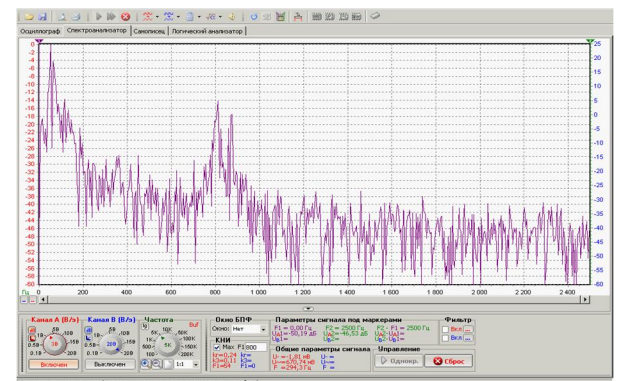


Рис. 11. Амплітудний спектр рухомих об'єктів (транспортні засоби, які рухаються по бруківці, довжина хвилі 2,5 см)

В даному випадку доплерівська чутливість суттєво нижча, ніж у діапазоні 8 мм. Спостерігається розширення тонких спектральних ліній, і можна говорити тільки про середню ширину спектрів сигналів. При цьому середня частота спектра свідчить про радіальну швидкість об'єктів, а ширина спектра (близько 100 Гц) про нерівномірність дороги.

Доплерівський сигнал має інформаційну цінність також у тому випадку, коли сам рухомий об'єкт є джерелом випромінювання.

У ході експериментальних досліджень був виконаний аналіз звукової сигнатури безпілотної літальної апаратури (БПЛА) побудованого за схемою квадрокоптера з електричними двигунами. Фрагмент підсиленого сигналу з виходу акустичного сенсора в часовій області наведений на рис. 12. На ньому добре простежується регулярна структура інформативного сигналу на фоні випадкових шумів.

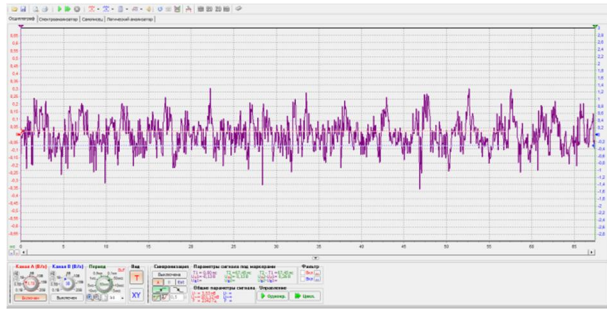


Рис. 12. Часовий фрагмент акустичного сигналу БПЛА типу квадрокоптер

Результати його спектрального аналізу наведені на рис. 13. Виявлено, що звуковий сигнал від БПЛА у частотній області складається із кінцевого числа гармонічних тонів, які мають випадковий розподіл інтенсивності. Основна частина енергії цих вузькосмугових компонент припадає на діапазон частот до 2 кГц.

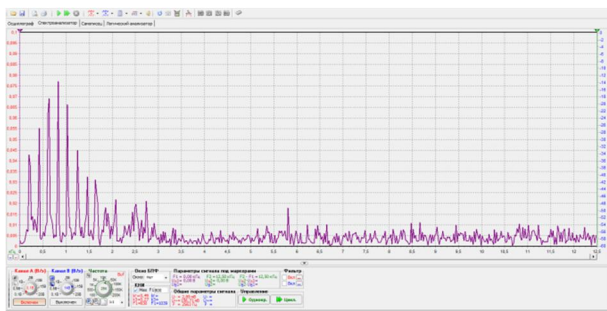


Рис. 13. Спектр акустичного сигналу БПЛА типу квадрокоптер

## Висновки

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що існують характерні особливості доплерівських спектрів радіолокаційних сигналів, які дозволяють у випадку роботи на місці ідентифікувати як радіолокаційні об'єкти, так і режими їх роботи. При поступальному русі цілей по дрібнорегулярній поверхні та збільшенні довжини хвилі тонка структура спектра порушується (швидко змінюється), що утруднює їх класифікацію і вимагає подальше досліджень.

## Список літератури

1. *Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.В. Кукобко [и др.]; под ред. О.И. Сухаревского. – Харьков: ХУПС, 2009. – 468 с.*
2. *Островитянов Р.В. Статистическая теория радиолокации протяженных объектов / Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.*
3. *Математическая модель радиолокационного образа корабля на морском волнении / В.Н. Горобец, В.Г. Гутник, С.М. Зотов и др. // Радиофизика и электрон. – 2011. – 2(16), № 4. – С. 60–65.*
4. *Небабин В.Г., Сергеев В.В. Методы и техника радиолокационного распознавания. – М.: Радио и связь, 1984. – 152с., ил.*
5. *Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.*
6. *Борзов А.Б., Соколов А.В. Математическая модель рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы. Электромагнитные волны & электронные системы. – 1998. №10. – С. 39–54.*
7. *Song J.M., Lu C.C. and Chew W.C. Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1997. – v. 45, № 10, pp. 1488–1493.*
8. *J.Volakis, A. Chatterjee, and L. Kempel, Finite Element Method for Electromagnetics, Piscataway, NJ, IEEE Press., 1998.*
9. *Антифеев В.Н., Борзов А.Б., Сучков В.Б. Физические модели радиолокационных полей рассеяния объектов сложной формы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 61 с.*
10. *H.Ling, R.C.Chou and S.W.Lee, "Shooting and bouncing rays: Calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity", IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 37, pp. 194–205, Feb. 1989.*
11. *Обнаружение и распознавание объектов радиолокации / под ред. А. В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2007. – 176 с. – (Сер. «Радиолокация»).*

**Рецензент:** д.т.н., проф. А.П. Бондарев, завідувач кафедри теоретичної радіотехніки і радіовимірювань Національний університет «Львівська політехніка», Львів.

**Особенности доплеровских спектров радиолокационных сигналов наземных объектов как информационный параметр для их распознавания станциями артиллерийской разведки**

В.В. Атаманюк

*Рассмотрена математическая модель радиолокационного сигнала от подвижного сложного объекта. Описана экспериментальная установка для исследования характеристик рассеивания наземных радиолокационных объектов. Приведены результаты экспериментальных исследований радиолокационных сигналов некоторых подвижных объектов. Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что существуют характерные особенности доплеровских спектров радиолокационных сигналов, которые дают возможность идентифицировать как радиолокационные объекты, так и режимы их работы.*

**Ключевые слова:** подвижный радиолокационный объект, радиолокационный сигнал, спектр радиолокационного сигнала, эффект Доплера, доплеровская частота.

**Features of the Doppler spectra of the radio-location signals of ground objects as informative parameter for their recognition by the stations of artillery reconnaissance**

V. Atamanjuk

*The mathematical model of the radiolocation signals from moving complex objects is considered. The experimental set-up for the scattering characteristics of ground radiolocation objects investigations is described. The experimental results of the radiolocation signals studies for some moving objects is presented. The performed studies allow to conclude that there are some characteristic features of Doppler spectra of the radiolocation signals, which make possible to identify radiolocation signals and their functioning regimes as well.*

**Key words:** moving radiolocation object, radiolocation signal, radiolocation signal spectrum, Doppler effect, Doppler frequency.

УДК 502.7:36

С.Л. Данилюк, Ю.С. Туровець

*Центральний науково-дослідний інститут ЗС України, Київ***ОЦІНКА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ У ЗОНАХ ІНТЕНСИВНОГО ВОЄННО-ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІЙСЬКОВИХ ПОЛІГОНІВ СУХОПУТНИХ ВІЙСЬК**

*Стаття присвячена комплексному підходу до оцінки розповсюдження забруднень у ґрунтах і ґрунтових водах у зонах інтенсивного воєнно-техногенного навантаження військових полігонів на основі ландшафтного профілювання та імітаційного моделювання.*

**Ключові слова:** воєнно-техногенне навантаження, розповсюдження забруднень у ґрунтах і ґрунтових водах, військова природно-техногенна геосистема, ландшафтне профілювання.

**Постановка проблеми, аналіз останніх досліджень і публікацій**

Інтенсивна бойова підготовка на військових полігонах Сухопутних військ Збройних Сил України в умовах проведення Антитерористичної операції на Сході України є одним із найважливіших чинників підтримки їх високої боєготовності. Наслідком воєнно-техногенного навантаження (ВТН) від заходів бойової підготовки є забруднення складових навколишнього природного середовища. Так на навчальних об'єктах військових полігонів (ВП), де

проводяться стрільби із широкого спектра систем тактичної зброї, спостерігається забруднення ґрунтів та ґрунтових вод як головного "депо" повітряних і наземних викидів важких металів, залишків вибухових речовин і пороху [1].

Питанню екологічної оцінки та моделювання розповсюдження забруднюючих речовин від джерел промислового та агротехнічного походження для прогнозування змін стану навколишнього природного середовища присвячено низку публікацій вітчизняних та зарубіжних авторів [3–8]. Проте застосування систем зброї і військової техніки на ВП Сухопутних