

## ОБРОБКА СИГНАЛІВ ДЛЯ ЗВУКОЛОКАЦІЇ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

С. В. Ємельянов, Я. В. Деревягін, Г. В. Улізко, Д. Г. Паску

Національний університет «Одеська політехніка»  
Україна, м. Одеса  
emelianov@op.edu.ua

*Розглянуто особливості акустичних сигналів звукового діапазону частот, що надходять від рухомих об'єктів, і запропоновано рішення щодо забезпечення можливості виділення сигналів в умовах їх трансформації у часі. Наведено результати моделювання й експериментальних досліджень. Показано можливість застосування обчислювальної та звукової апаратури загального призначення.*

*Ключові слова:* акустика, звуколокація, обробка сигналів, виявлення сигналів.

Пристрої для звуколокації використовують як просту заміну радіолокації. Вони працюють в ультразвуковому діапазоні акустичних хвиль, які не чує людина, та дозволяють вимірювати відстань до 30 — 40 м [1]. Звукові хвилі у тропосфері (залежно від діапазону частот) можуть прийматись на відстані не менше ніж 200 м [2], що дозволяє задіяти звукову та обчислювальну техніку загального призначення для звуколокації. При цьому, однак, методи обробки сигналів, що застосовуються у радіолокації, не враховують умови поширення акустичних коливань, наприклад швидкість хвиль.

Метою цієї роботи є визначення особливостей реалізації алгоритмів виявлення й оцінки параметрів прийнятого імпульсу з урахуванням умов його розповсюдження у тропосфері та руху об'єкта.

Зондувальний ( $\dot{x}(t)$ ) і відбитий ( $\dot{y}(t)$ ) від рухомого об'єкта сигнали можуть бути представлені в аналітичній формі [3]:

$$\dot{x}(t) = \dot{A}(t)e^{-j2\pi f_0 t}, \quad \dot{y}(t) = \dot{A}(K_r(t - \tau))\exp(-j2\pi f_0 K_r(t - \tau)),$$

де  $\dot{A}(t)$  — комплексна огибаюча;  $f_0$  — центральна частота;  $t$  — час;  $\tau$  — час затримки відбитого сигналу;  $K_r$  — коефіцієнт трансформації масштабу у часі, пов'язаний зі швидкістю руху об'єкта.

Комплексна огибаюча є скінченою у часі:

$$\dot{A}(t) = \begin{cases} \dot{a}(t), & t \leq T_i \\ 0, & t > T_i \end{cases},$$

де  $T_i$  — тривалість імпульсу,  $\dot{a}(t)$  — закон зміни комплексної огибаючої.

Сигнал повертається від об'єкта із стисненням або розтягненням імпульсу у часі. Значення  $K_r$  має зв'язок з доплерівським зсувом частоти та швидкостями звуку і об'єкта, від якого надходять акустичні коливання (у разі рівномірного руху) [4, 5]:

$$K_r = (V_c - V_t)/(V_c + V_t); \quad f_d = f_0[1 - K_r],$$

де  $V_c$  — швидкість поширення хвилі в середовищі (швидкість звуку, прийнято значення 340 м/с);  $V_t$  — швидкість руху об'єкта;  $f_d$  — доплерівський зсув частоти.

У цьому випадку відбитий сигнал може бути записаний як

$$\dot{y}(t) = \dot{A}(K_r(t - \tau))e^{-j2\pi(f_0 - f_d)(t - \tau)}.$$

Перед здійсненням узгодженої фільтрації для заданого значення  $V_c$  і відповідного йому  $f_d$  виконується перенос прийнятого сигналу на нульову частоту. Імпульсна характеристика узгодженого фільтра має буди трансформована в часі на величину, обернену до  $K_r$ . Для трансформації в часі застосовано рішення з передискретизації сигналу, засноване на перетворенні Фур'є, що є можливим, оскільки величина  $\dot{A}(t)$  є скінченою у часі, за якого імпульсна характеристика може бути представлена різною кількістю відліків [6]. Реалізація є багатоканальною, кількість каналів визначається шириною функції невідзначеності уздовж осі частот та очікуваного діапазону швидкостей переміщення об'єктів [5].

При  $T_i = 0,1$  с,  $f_d = 10$  кГц синтезовано такі зондувальні сигнали:

- ЛЧМ із дев'ятьма частоти 5 кГц;
- фазоманіпульований (ФМ) з кількістю елементів 127;
- з частотною модуляцією зі стрибками частоти за схемою Костаса із кількістю стрибків 148.

Моделювання при різниці між тривалістю імпульсу та імпульсною характеристикою погодженого фільтра понад 1% (що відповідає швидкості руху об'єкта приблизно 1,7 м/с) показує суттєве зменшення амплітуди на виході фільтра (рис. 1). Аналогічні результати моделювання отримано для інших зондувальних сигналів.

Експериментальна перевірка проводилася шляхом випромінювання сигналу з використанням переміщення акустичної системи або відбиваючої поверхні (відповідає умовам приймання відбитого сигналу від рухомого об'єкта) та запису й обробки сигналів на комп'ютері (рис. 2).

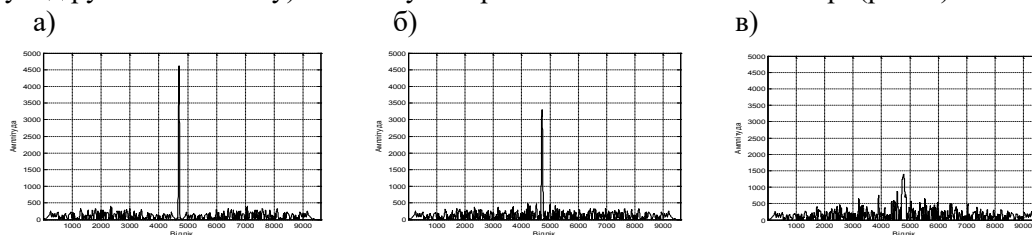


Рис. 1. Модуль сигналу на виході узгодженого фільтра при проходженні трансформованого у часі ФМ-сигналу: а —  $K_r = 1$ ; б —  $K_r = 1,01$ ; в —  $K_r = 1,03$

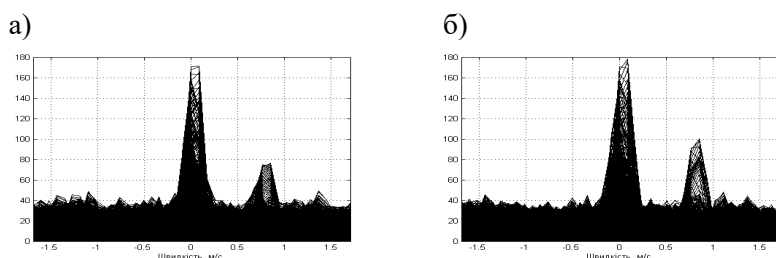


Рис. 2. Модулі ФМ-сигналів на виході узгоджених фільтрів при багатоканальному обробленні сигналу вдовж осі швидкості для випадку, коли коефіцієнти фільтрів однакові (а) та були трансформовані відповідно до значення  $K_r$  (б)

В результаті проведених досліджень показано, що при обробленні акустичних сигналів необхідно враховувати зміни тривалості імпульсу, відбитого від рухомого об'єкта. Результати експериментів підтвердили теоретичні обґрунтування та показали, що для звуколокації можна застосувати звукову та обчислювальну техніку загального призначення.

#### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Elijah J. Morgan. *HC-SR04 Ultrasonic Sensor*. 2014.
2. ISO 9613-1:1993(E). *Акустика - ослаблення звуку під час поширення на відкритому повітрі*. [Чинний від 1993.06.01]. Швейцарія, 1993.
3. Wu Hanwen. Simulation of Radar Signal Processing based on Matlab. *International Conference on Information System and Management Engineering*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2016, p. 299–304.
4. Mahafza Bassem R. *Radar Systems Analysis and design Using Matlab*, Taylor & Francis Group, LLC 2013-734 p.
5. Ширман Я. Д. *Теоретические основы радиолокации*. М: Сов. радио, 1970. 560 с.
6. Lyons R.G. *Understanding Digital Signal Processing*, Prentice-Hall, 2010, 954 p.

S. V. Yemelianov, Y. V. Derevyagin, H. V. Ulizko, D. G. Pascu

#### Signal processing for sound location of moving objects

*The authors have analyzed the peculiarities of audio frequencies of acoustic signals coming from moving objects, and proposed a solution to ensure the possibility of separating the signals under conditions of their transformation in time. The paper presents the results of modelling and experimental studies and shows the possibility of using general-purpose computers and sound equipment.*

*Keywords: acoustics, sound location, signal processing, signal detection.*