

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТОРИННОГО ЕФЕКТУ ДОПЛЕРА

¹ Вінницький національний технічний університет**Анотація**

У роботі розглянуто існуючі математичні моделі доплерівських сигналів автономних пристроїв для визначення параметрів руху наземних об'єктів. Проаналізовано особливості виникнення основного і вторинного ефектів Доплера. Обґрунтовано вплив вторинного ефекту на структуру та спектр доплерівського сигналу. Визначено перспективи подальших досліджень вторинного ефекту Доплера на точність визначення навігаційних параметрів рухомих об'єктів.

Ключові слова: доплерівський сигнал, вторинний ефект Доплера.

Abstract

The paper considers the existing mathematical models of Doppler signals of autonomous devices for determining the movement parameters of objects. The peculiarities of the occurrence of the primary and secondary Doppler effect are analyzed. The influence of the secondary effect on the structure and spectrum of the Doppler signal is substantiated. Prospects for further studies of the secondary Doppler effect on the accuracy of determining the navigation parameters of moving objects have been determined.

Key words: Doppler signal, secondary Doppler effect.

Вступ

Автономні пристрої для визначення параметрів руху наземних об'єктів широко застосовуються у сучасних комплексних навігаційних системах. До таких пристроїв відносяться Доплерівські вимірювачі абсолютної швидкості та пройденого шляху рухомих об'єктів. Принцип роботи цих пристроїв полягає у тому, з рухомого об'єкту, під кутом α_0 відносно горизонту у напрямку поверхні землі або моря, антеною випромінюються радіосигнали з високочастотним заповненням (носією частотою) f_0 , після чого ці сигнали відбиваються та/або розсіюються цією поверхнею і надходить на приймальну антену. Отримані таким чином сигнали містять у своєму складі Доплерівські зсуви частоти, які зумовлені впливом первинного та вторинного ефектів Доплера. Різниця між частотами прийнятого f та випроміненого f_0 сигналів дорівнює частоті Доплера F_D , яка пропорційна швидкості V рухомого об'єкту:

$$V = \frac{F_D}{2 \frac{f_0}{c} \cos \alpha_0} \quad (1)$$

Теоретичні та експериментальні дослідження

При безмежно вузькій ширині характеристики спрямованості антени в частотній області доплерівський сигнал характеризується однією спектральною складовою, яка визначається частотою випроміненого сигналу f_0 та значенням доплерівського зсуву частоти F_D :

$$f = f_0 \frac{1 + \frac{V}{c} \cos \alpha_0}{1 - \frac{V}{c} \cos \alpha_0}, \quad (2)$$

де c – швидкість поширення електромагнітного коливання у заданому середовищі.

В дійсності ж випромінювання сигналів здійснюється в межах кінцевої ширини характеристики спрямованості антени, яка визначає певну ділянку нерухомої поверхні, яка розсіює та/або відбиває випромінений сигнал. При цьому на приймальній антені доплерівський сигнал можна представляти у вигляді суми елементарних сигналів, що надходять на антену в результаті розсіювання випроміненого радіосигналу цією ділянкою, площа якої визначається параметрами характеристики спрямованості антени:

$$s(t) = \sum_{m=1}^{M(t)} A_m \cos[\Psi_m(t)] , \quad (3)$$

де $M(t)$ – кількість елементарних сигналів, які надходять на антену протягом часу прийому; $\Psi_m(t)$ – повна фаза m -того елементарного сигналу.

Відповідно математичній моделі (3), структура доплерівського сигналу буде залежати від впливу параметрів елементарних сигналів, які відрізняються між собою миттєвими значеннями амплітуди, частоти та фази, що зумовлено розмірами та особливостями ділянки розсіювальної поверхні. Очевидно, цей вплив проявиться в першу чергу на обвідній доплерівського сигналу. З класичної теорії радіосигналів відомо, що при складанні сигналів, які відрізняються амплітудами та частотами, результуючий сигнал буде характеризуватись так званими „биттями”, тобто амплітудними змінами. У контексті структури доплерівських сигналів, такий характер зміни обвідної пов’язують з впливом вторинного ефекту Доплера, який зумовлений зміщенням рухомого об’єкта відносно розсіювальних елементів поверхні з різними радіальними швидкостями. При цьому різні частоти елементарних сигналів призводять до розширення спектру доплерівського сигналу. В результаті структура доплерівського сигналу визначається випадковим характером поведінки обвідної та високочастотного заповнення. В цілому модель (3) характеризує доплерівський сигнал як вузькосмуговий квазігармонійний випадковий процес [1].

У роботі [2] представлені аналітичні залежності для частот первинного і вторинного ефекту Доплера, що формуються на виході приймально-передавального модуля радіолокаційного вимірювача параметрів руху. Знайдені теоретичні співвідношення між цими частотами, а також результати експериментів, засвідчили наявність вторинного ефекту Доплера за рахунок кінцевої ширини діаграми спрямованості приймально-передавальних антен. Отримані результати обґрунтували перспективи підвищення точності і завадозахищеності автономних систем навігації шляхом структурно-алгоритмічної оптимізації радіолокаційного вимірювача параметрів руху наземних рухомих об’єктів, а саме: зменшення впливу фазових флуктуацій сигналів, що відбиваються від земної поверхні, на точність вимірювання; розробка алгоритмів обробки сигналів і на її підставі визначення параметрів рухомого об’єкту.

Математична модель доплерівського сигналу, представлена у роботі [3], враховує первинний та вторинний ефект Доплера, при цьому важливим є те, що відображає зв’язок у характері зміни обвідної з іншими параметрами цього сигналу. яким у відповідність ставляться два види компонент:

$$f = f_o \frac{1 + \frac{V}{c} \cos \alpha_0}{1 - \frac{V}{c} \cos \alpha_0} - f_o \frac{\frac{2V}{c} \sin \alpha_0 \sin \frac{\gamma}{2}}{1 - \frac{V}{c} \cos \alpha_0} \left[\frac{A_{m-1}^2 - A_{m+1}^2}{A^2(t)} \right], \quad (4)$$

Зауважимо, що перша компонента у виразі (4), за значенням доплерівських зсувів частоти, точно відповідає осі характеристики спрямованості антени і найбільш адекватно відповідає швидкості рухомого об’єкту, а друга компоненти, яка є функцією не тільки швидкості, але і ширини характеристики спрямованості антени та амплітуд елементарних сигналів. Саме друга компонента обумовлена впливом вторинного ефекту Доплера на структуру сигналу.

Висновки

Отже, з точки зору подальших досліджень, особливий інтерес представляють математичні моделі доплерівського сигналу, які враховують вплив вторинного ефекту Доплера на структуру цього сигналу. Особливу увагу слід приділити дослідженням цих сигналів в умовах наближених до реальних, тобто за наявності нерівномірного руху об’єкту, впливу шумів середовища, особливостей процесу їх обробки в приймально-передавальних модулях та т. ін. Для цього може бути застосоване комп’ютерне моделювання з використання сучасного інструментарію та методів статистичного аналізу. Результати таких досліджень сприятимуть покращенню тактико-технічних характеристики Доплерівських автономних вимірювачів зокрема та комплексних навігаційних систем в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Колчинский В. Е. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов / В. Е. Колчинский, И. А. Мандуровский, М. И. Константиновский. – М. : Сов. Радио, 1975. – 430 с.
2. Торетичні та експериментальні дослідження спектру доплерівського сигналу на виході приймально-передавального модулю радіолокаційного вимірювача параметрів руху / М.В. Бахмат, Ю.І. Бударецький, Т.В. Лаврут, В.В. Бондарев // Системи управління, навігації та зв’язку. Збірник наукових праць – Х.: 2019. - Вип. 5 (57). - С. 108-112.

3. Узагальнена модель доплерівського сигналу гідроакустичного лага [Електронний ресурс] / О.В. Онищук, С.Т. Барась // Електронне науково-спеціалізоване видання „Наукові праці Вінницького національного технічного університету” англ., рос. та укр. мовами. – 2008.

Онищук Олег Володимирович - к.т.н., доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: onyschuk@vntu.edu.ua

Семенов Андрій Олександрович - д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

Onyshchuk Oleh Volodymyrovych - Ph.D., Associate Professor of the Department information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: onyschuk@vntu.edu.ua

Semenov Andriy Oleksandrovysh - Dr. Sc. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua