

ЧАСТОТНО-МОДУЛЬОВАНІ БЕЗПЕРЕРВНІ РАДАРИ (FMCW) ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.

Бохан І.А. Белоусов О.Г. Лихограй В.Г.

e-mail: ivan.bokhan@nure.ua, oleksii.bielousov@nure.ua,

vasyl.lykhograi@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки,
каф. ІРТЗІ, каф. ФОЕТ, м. Харків, Україна

This paper discusses the principles and applications of frequency-modulated continuous wave (FMCW) radar for the detection of unmanned aerial vehicles (UAVs). It describes the operating principle of FMCW radar systems, including frequency modulation of the transmitted signal, generation of beat frequency, and the estimation of target range and velocity using range-Doppler signal processing. The paper highlights the advantages of FMCW radars, such as high range resolution, low power consumption, and the ability to detect slow and small targets.

Швидке поширення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у цивільній та військовій сферах створює нові виклики для систем спостереження, контролю повітряного простору та безпеки. Невеликі БПЛА широко застосовуються для розвідки, інспекції інфраструктури, логістичних і моніторингових задач. Водночас останнім часом вони дедалі частіше використовуються як баражуючі боєприпаси для ураження визначених цілей (ударні БПЛА). У зв'язку з цим розробка ефективних систем виявлення та супроводу БПЛА є актуальною задачею сучасної радіолокації.

Традиційні імпульсні радіолокаційні системи широко застосовуються для виявлення великих повітряних об'єктів, таких як літаки або ракети. Однак виявлення малорозмірних безпілотників з малою ефективною площею розсіювання (RCS) потребує використання радарів з високою чутливістю та високою роздільною здатністю на малих і середніх відстанях. Однією з перспективних технологій для таких задач є частотно-модульовані безперервні радари (FMCW).

FMCW радари випромінюють безперервний електромагнітний сигнал, частота якого змінюється з часом відповідно до заданого закону модуляції, найчастіше лінійного частотного сканування (ЛЧМ сигнал, в англійській літературі – chirp). Порівнюючи переданий сигнал з прийнятим відбитим сигналом від цілі, можна визначити часову затримку та доплерівський зсув частоти. Ці параметри дозволяють оцінити як дальність до об'єкта, так і його радіальну швидкість. [1]

На відміну від імпульсних радарів, FMCW радари працюють у безперервному режимі та характеризуються відносно низькою передавальною потужністю. Це робить їх придатними для створення компактних і енерго-ефективних радіолокаційних систем, які можуть використовуватися у мо-

більших або розподілених системах спостереження. Крім того, FMCW радари забезпечують високу роздільну здатність завдяки широкій смузі модуляції.

У FMCW radarі частота переданого сигналу змінюється лінійно в межах певної смуги протягом одного періоду chirp. Після відбиття від об'єкта сигнал повертається до приймача із затримкою, яка пропорційна відстані до цілі. Прийнятий сигнал змішується з переданим сигналом у змішувачі, в результаті чого утворюється різницева частота, яка називається beat-частотою. Ця частота безпосередньо пов'язана з дальністю до об'єкта.

Дальність до цілі може бути визначена за формулою

$$R = \frac{c \cdot f_b}{2 \cdot S} \quad (1)$$

де c – швидкість світла, f_b – beat-частота, а S – швидкість зміни частоти сигналу. Відповідно:

$$S = \frac{f_{max} - f_{min}}{T_c} \quad (2)$$

де f_{max} – максимальна частота chirp, f_{min} – мінімальна частота chirp, а T_c – тривалість одного chirp.

Для визначення швидкості цілі передається послідовність chirp-сигналів. Зміна фази сигналу між послідовними chirp містить інформацію про доплерівський зсув частоти, спричинений рухом об'єкта. За допомогою двовимірної обробки сигналів, відомої як range-Doppler обробка, можна отримати карту дальність-швидкість (Range-Doppler map), яка відображає розподіл цілей за дальністю та швидкістю. [2] Приклад такої карти зображений на рис. 1.

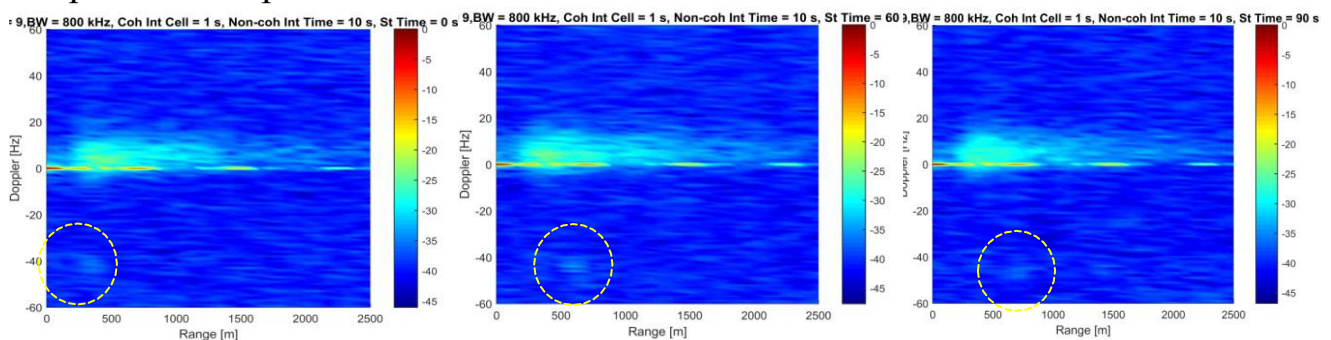


Рисунок 1. Приклад карти дальність-швидкість (Range-Doppler map), на фреймах можна побачити, що об'єкт в колі рухається.

Карта Range-Doppler зазвичай формується за допомогою двовимірного швидкого перетворення Фур'є (2D FFT). Спочатку виконується перетворення Фур'є по відліках всередині кожного chirp для визначення дальності. Потім виконується перетворення Фур'є по послідовності chirp для визначення доплерівських частот. Отримана матриця утворює карту дальність-швидкість, де максимуми відповідають наявності об'єктів.

Однією з головних переваг FMCW радарів є висока роздільна здатність за дальністю, яка залежить від ширини смуги модуляції сигналу. Теоретична роздільна здатність визначається як

$$\Delta R = \frac{c}{2 \cdot B} \quad (3)$$

де B – ширина смуги частот.

Ще однією важливою перевагою FMCW радарів є можливість виявлення малорухомих і низьковисотних цілей. Безпілотники часто рухаються з невеликою швидкістю та на низьких висотах, що ускладнює їх виявлення традиційними радіолокаційними системами. FMCW радари забезпечують точне вимірювання як дальності, так і швидкості навіть для повільно рухомих об'єктів.

Крім того, сучасні FMCW радари можуть визначати напрямок на ціль за допомогою антенних решіток та цифрового формування діаграми спрямованості. Це дозволяє визначати координати безпілотника у просторі.

Виявлення БПЛА за допомогою FMCW радарів також може базуватися на аналізі мікродоплерівських ефектів. Обертання пропелерів дрона створює характерні частотні модуляції відбитого сигналу. Такі мікродоплерівські ознаки можуть використовуватися для відрізнення дронів від інших об'єктів, наприклад птахів.

Завдяки своїм характеристикам FMCW радари активно застосовуються у системах протидії безпілотникам, системах охорони периметра та системах контролю повітряного простору. Вони можуть працювати як автономні сенсори або як частина мультисенсорних систем, що поєднують радарні, радіочастотні, оптичні та акустичні засоби виявлення.

Таким чином, технологія FMCW радарів має значні переваги для задач виявлення БПЛА, включаючи високу роздільну здатність за дальністю, низьке енергоспоживання, компактність апаратної реалізації та можливість одночасного визначення дальності та швидкості об'єктів. Подальші дослідження у цій сфері можуть бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів обробки сигналів, зменшення впливу завад та інтеграцію радарних даних з іншими сенсорними системами для підвищення надійності виявлення безпілотних літальних апаратів.

Список використаних джерел:

1. Griffiths, H. D. and Baker, C. J. An Introduction to Passive Radar, Artech House, 2017.
2. Mikhail Cherniakov, Andrew G. Stove, Marina S. Gashinova, Stanislav Hristov. Passive Maritime Surveillance Using Satellite Communication Signals, 2017.