

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПУ РОБОТИ ІМПУЛЬСНО-ДОПЛЕРІВСЬКОГО РАДАРУ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

Проведено аналіз особливостей функціонування імпульсно-доплерівських радіолокаційних станцій, що дозволило дослідити їхні переваги у виявленні рухомих цілей та оцінити вплив вибору частоти повторення імпульсів на ефективність усунення швидкісних і просторових неоднозначностей.

Ключові слова: імпульсно-доплерівський радар, ефект Доплера, селекція рухомих цілей, частота повторення імпульсів, радіальна швидкість, просторова неоднозначність.

Abstract

An analysis of the operational characteristics of pulse-Doppler radar stations was conducted, which made it possible to investigate their advantages in detecting moving targets and to evaluate the impact of pulse repetition frequency selection on the efficiency of resolving velocity and spatial ambiguities.

Keywords: pulse-Doppler radar, Doppler effect, moving target indication, pulse repetition frequency, radial velocity, spatial ambiguity.

Вступ

Розвиток сучасної авіації та систем протиповітряної оборони тісно пов'язаний із безперервним вдосконаленням радіолокаційних технологій. Класичні імпульсні радіолокаційні станції тривалий час стикалися з критичним обмеженням — неможливістю ефективного виявлення цілей на малих висотах через потужні відбиття радіосигналу від земної поверхні (так звана підстилаюча поверхня). Революційним кроком у вирішенні цієї проблеми стало впровадження імпульсно-доплерівських радіолокаційних станцій (ІД РЛС). Завдяки поєднанню імпульсного методу вимірювання дальності з аналізом доплерівського зсуву частоти відбитого сигналу, ці системи отримали здатність виокремлювати рухомі об'єкти на тлі нерухомих перешкод. Це дозволило реалізувати критично важливий для сучасної авіації режим виявлення та супроводу цілей на тлі землі (Look-Down/Shoot-Down). Проте, практичне застосування ІД РЛС супроводжується низкою специфічних технічних викликів. Зокрема, виникає складний компроміс при виборі частоти повторення імпульсів, що безпосередньо впливає на точність визначення швидкості та дальності цілі. У зв'язку з цим, детальне дослідження особливостей роботи таких радарів та методів усунення просторових і швидкісних неоднозначностей залишається актуальним завданням сучасної радіолокації.

Доплерівська частота

Радари використовують доплерівську частоту для визначення радіальної швидкості цілі (швидкості зміни дальності), а також для розрізнення рухомих і нерухомих цілей або об'єктів, таких як пасивні завади (відбиття від місцевості). Доплерівське явище описує зсув центральної частоти хвилі, що падає на об'єкт, зумовлений рухом цілі відносно джерела випромінювання. Залежно від напрямку руху цілі, цей зсув частоти може бути позитивним або негативним.

Хвиля, що падає на ціль, має рівнофазні хвильові фронти, розділені відстанню λ (довжиною хвилі). Ціль, що наближається, змушує відбиті рівнофазні фронти ставати ближчими один до одного (менша довжина хвилі). З іншого боку, ціль, що віддаляється (рухається геть від радара), змушує відбиті рівнофазні фронти розширюватися (більша довжина хвилі), як показано на Рис. 1

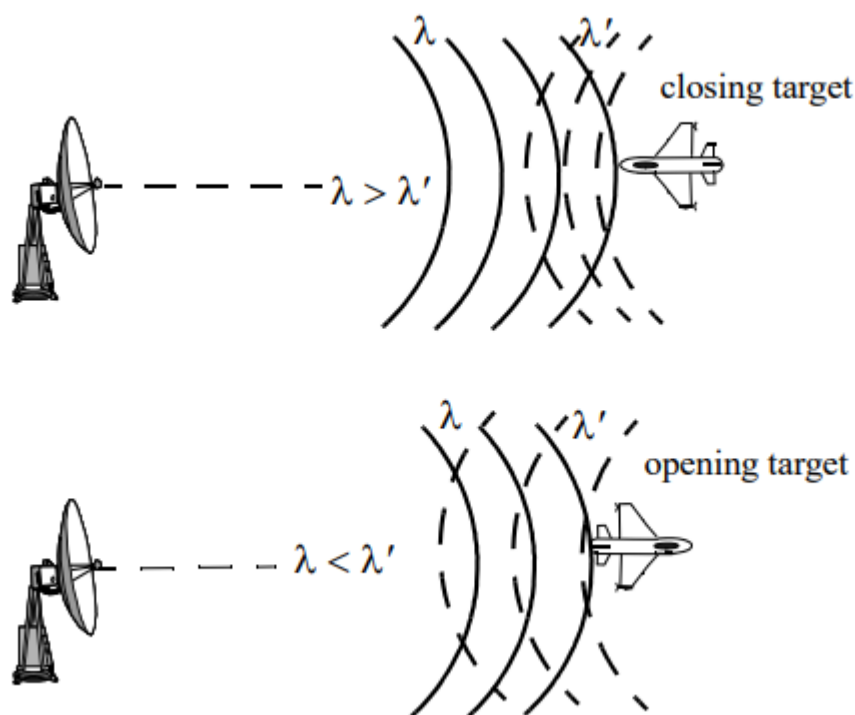


Рис. 1. Фізична зміна довжини хвилі при відбитті

Вимірювання швидкості; зміна довжини хвилі, зумовлена рухом джерела

Імпульсно-доплерівські системи вимірюють дальність до об'єкта шляхом вимірювання часу, що минув між моментом випромінювання імпульсу енергії (зондувального сигналу) і моментом прийому імпульсу, відбитого від об'єкта. Радіохвилі поширюються прямолінійно з відомою сталою швидкістю – швидкістю світла, тому відстань до об'єкта визначається шляхом вимірювання часу поширення сигналу від антени радара до об'єкта і назад, множення його на значення швидкості світла і ділення отриманого результату на два (чим враховується поширення сигналу туди і назад).

Зміна довжини хвилі при русі джерела випромінювання

Функціонування імпульсно-доплерівського радару ґрунтується на ефекті Доплера, який полягає в тому, що рух цілі викликає зсув частоти відбитого від неї сигналу. Радіальна швидкість має важливе значення для роботи імпульсно-доплерівського радару. Коли цілі переміщуються в проміжку між кожним зондувальним імпульсом, відбиті сигнали отримують різницю фаз, або зсув фази, від імпульсу до імпульсу. Це призводить до того, що цілі створює доплерівську модуляцію відбитого сигналу.

В імпульсно-доплерівських радарх цей ефект використовується для покращення функціональних характеристик. Амплітуда в послідовності відбитих імпульсів від одного і того ж сканованого об'єму дорівнює:

$$I = I_0 \sin\left(\frac{4\pi(x_0 + v\Delta t)}{\lambda}\right) = I_0 \sin(\Theta_0 + \Delta\Theta), \quad (1)$$

де: x_0 – відстань від радару до цілі; λ – довжина хвилі радару; v – швидкість; Δt – час між двома імпульсами; Θ – фаза хвилі імпульсного сигналу. Таким чином обчислюємо:

$$\Delta\Theta = \frac{4\pi v\Delta t}{\lambda} \quad (2)$$

де: $\Delta\Theta$ – фазовий зсув, викликаний зміною дальності цілі. Звідки можна знайти швидкість:

$$v = \frac{\lambda\Delta\Theta}{4\pi\Delta t} \quad (3)$$

Загалом, доплерівська частота цілі залежить від компоненти швидкості цілі в напрямку радару (радіальної швидкості). На Рис. 2 показано три цілі, кожна з яких має швидкість v .

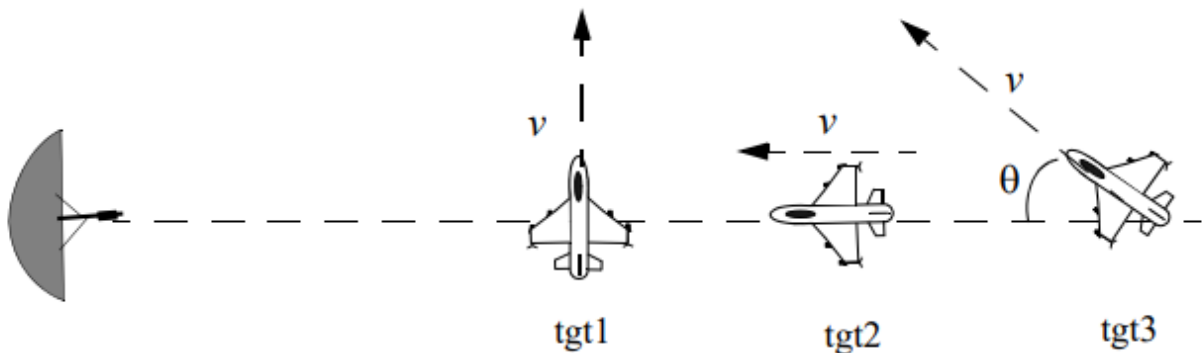


Рис. 2. Три випадки напрямку руху об'єктів.

Ціль 1 (tgt1) має нульовий доплерівський зсув (оскільки вона рухається перпендикулярно до променя радару). Ціль 2 (tgt2) має максимальну доплерівську частоту (оскільки вона рухається прямо на радар). Значення доплерівської частоти цілі 3 (tgt3) становить $f_d = \frac{(2v \cos \theta)}{\lambda}$, де:

$v \cos \theta$ – це радіальна швидкість, а θ – загальний кут між лінією візуального радару та напрямком руху цілі. Більш загальний вираз f_d , який враховує повний кут між радаром і ціллю:

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta \quad (4)$$

Наведена математична залежність є основою для алгоритмів селекції рухомих цілей. Вона дозволяє радару ігнорувати сигнали від підстильної поверхні та зосереджуватися на динамічних об'єктах з відповідними спектральними характеристиками.

Висновки:

Проведений аналіз підтверджує, що імпульсно-доплерівська технологія є визначальною для сучасної авіаційної радіолокації, оскільки вона дозволяє виявляти маловисотні цілі на тлі земної поверхні. Основна перевага таких систем полягає у здатності фільтрувати нерухомі об'єкти, проте ефективність цього процесу критично залежить від ракурсу руху цілі та обраної частоти повторення імпульсів. Попри фізичні обмеження, як-от виникнення «сліпих» зон або неоднозначність визначення дальності, використання адаптивних алгоритмів обробки сигналу робить ці радары незамінними для сучасного повітряного бою. Таким чином, імпульсно-доплерівські РЛС залишаються технологічним фундаментом, що забезпечує високу точність супроводу об'єктів у складних умовах завад.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. wikipedia.org, Pulse-Doppler radar, останнє оновлення: 2026.
2. Bassem R. Mahafza (2000). Radar Signal Analysis and Processing using Matlab. Boca Ralton: CRC Press, 500 с.
3. Modern Radar Systems by Hamish Meikle: 2001.
4. Сервіс radartutorial.eu класифікація радіолокаційних систем, імпульсний радіолокатор.

Марущак Юрій Іванович — студент групи 2КН-25б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: yurii.marushchak5572@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — к-т техн. наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Yurii Ivanovych Marushchak — student of group 2KN-25b, Faculty of Intellectual Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: yurii.marushchak5572@gmail.com

Scientific advisor: **Volodymyr Valeriyovych Martyniuk** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia