

**В. В. Любич, М. Г. Домненко**

## **СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ ЦІЛЕЙ В РАДІОЛОКАЦІЇ**

***Анотація:** підвищення ефективності виявлення малорозмірних цілей у радіолокації є важливим завданням, оскільки такі цілі, як дрони, птахи, або інші невеликі об'єкти, мають малу ефективну площу розсіювання (ЕПР) і можуть зливатися з фоновими перешкодами.*

***Ключові слова:** радіолокація, радар, доплерівський ефект.*

***Annotation:** Improving the detection efficiency of small-sized targets in radar is an important task, because targets such as drones, birds, or other small objects have a small effective scattering area (RCS) and can blend into background interference.*

***Keywords:** Radar, radar, Doppler effect.*

Підвищення ефективності виявлення малорозмірних цілей у радіолокації є важливим завданням, особливо в умовах загрози, яка зростає з боку малих безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА), птахів або інших невеликих об'єктів.

Для досягнення цієї мети можна використовувати кілька методів і технологій. Наприклад, **використання високочастотних радарів:** високочастотні радіолокаційні системи (наприклад, у діапазонах X, Ka, або Ku) мають меншу довжину хвилі, що дає змогу краще розрізняти дрібні цілі. Такий підхід підвищує точність і здатність виявлення малих об'єктів, оскільки дозволяє розрізняти деталі розміром у кілька сантиметрів.

Основними характеристиками цього методу є:

**Краща роздільна здатність:** оскільки високочастотні радары мають меншу довжину хвилі, що дозволяє краще виявляти дрібні деталі та об'єкти з малими розмірами. Це особливо корисно для розпізнавання дронів, птахів або інших невеликих об'єктів. Вища частота забезпечує кращу кутову роздільну здатність, що дає змогу точніше визначати місце знаходження цілі.

**Покращене відбиття від малих об'єктів:** малорозмірні об'єкти, як-от дрони різних розмірів та призначень, мають меншу ефективну площу розсіювання (RCS або ЕПР), тому їх важче виявити. Високочастотні радары можуть краще «бачити» такі об'єкти, оскільки хвилі меншої довжини краще відбиваються від невеликих поверхонь, що підвищує ймовірність виявлення цілі навіть на великій відстані.

**Можливості роботи в складних умовах:** високочастотні радары мають кращі можливості роботи у таких складних середовищах, як міська місцевість або густий ліс. Через меншу довжину хвилі вони здатні точніше відрізняти об'єкти на фоні перешкод. Здатність працювати в умовах сильної відбитості від земної поверхні або інших об'єктів допомагає зменшити вплив шуму і фонових відбиттів.

**Підходить для встановлення на мобільних платформах:** завдяки своїм невеликим розмірам і меншій масі високочастотні радары підходять для встановлення на безпілотних літальних апаратах, аеростатах, автомобілях або переносних системах. Це дає змогу швидко розгортати радарні системи в потрібних місцях. Ці радары можуть використовуватися як на стаціонарних, так і мобільних платформах для розширення зони спостереження.

**Комбінація з іншими системами радіолокації:** високочастотні радары можуть працювати в комплексі з радарями інших діапазонів (низької чи середньої частоти) для забезпечення багатопарового покриття. Це дає змогу використовувати переваги кожного діапазону частот.

**Застосування в авіації:** високочастотні радары використовуються в системах авіаційного моніторингу для виявлення птахів або інших об'єктів, що можуть становити небезпеку для літаків.

**Обмеженнями щодо використання високочастотних радарів можуть бути:**

**Чутливість до погодних умов:** високочастотні хвилі можуть бути більш чутливими до таких атмосферних явищ, як дощ, туман або сніг, що знижує їх ефективність.

**Мала дальність дії:** радары високих частот зазвичай мають меншу дальність дії порівняно з низькочастотними радарями, тому їх краще використовувати для виявлення цілей на ближніх і середніх дистанціях.

### **Шляхами поліпшення роботи подібних радарів можуть бути:**

*Поліпшення просторової роздільної здатності:* використання фазованих антенних решіток дає змогу поліпшити роздільну здатність радарів, забезпечуючи більш точне визначення положення малих цілей. Збільшення кількості елементів антени та використання цифрового формування діаграми спрямованості дає можливість ефективніше виявляти малорозмірні об'єкти.

*Фільтрація за доплерівською швидкістю:* малорозмірні цілі, такі як дрони, зазвичай мають відносно низьку швидкість руху. Використання доплерівської фільтрації допомагає відокремити малорухливі об'єкти від фонових перешкод і статичних елементів (наприклад, дерев, будівель). Цей метод дає змогу покращити сигнал від малих цілей і зменшити вплив шумів.

Фільтрація за доплерівською швидкістю є ефективним методом виявлення рухомих об'єктів у радіолокації. Вона заснована на ефекті Доплера, який полягає у зміні частоти радіохвиль, що відбиваються від рухомої цілі, залежно від її швидкості відносно радіолокатора. Цей метод має кілька важливих аспектів і застосувань, особливо для виявлення таких малорозмірних цілей, як дрони.

Коли об'єкт рухається до радіолокатора, частота відбитого сигналу збільшується, а коли об'єкт віддаляється – зменшується. Це явище відоме як Доплерівський зсув частоти.

Радіолокатор може вимірювати зміни частоти відбитого сигналу та використовувати ці дані для визначення радіальної швидкості об'єкта, тобто швидкості вздовж лінії між об'єктом і радіолокатором.

Фільтрація за доплерівською швидкістю дає змогу:

1. Відокремити рухомі цілі від статичних об'єктів (наприклад, будівель, дерев, землі). Оскільки статичні об'єкти не створюють доплерівського зсуву, їхні відбитки можна ефективно відфільтрувати.

2. Відрізнати малорозмірні цілі від фонового шуму. Деякі дрони можуть мати дуже невеликий радіолокаційний відбиток, але завдяки їхній швидкості вони створюють характерний доплерівський зсув, який можна виявити навіть при слабкому відбитому сигналі.

Переваги доплерівської фільтрації:

1. Зменшення кількості хибних тривог: фільтрація допомагає уникати помилкових виявлень, викликаних статичними об'єктами або шумом. Це підвищує точність системи виявлення.

2. Покращення виявлення малих і швидко рухомих цілей: за допомогою аналізу доплерівського зсуву можна визначити навіть невеликі дрони, які рухаються з певною швидкістю, відокремлюючи їх від повільніших об'єктів або природних перешкод (наприклад, птахів).

**Моніторинг швидкісних характеристик цілі:** доплерівська фільтрація дає змогу не тільки виявити об'єкт, але й оцінити його швидкість, що є важливим для класифікації цілі та визначення її типу.

### **Доплерівська фільтрація застосовується в різних типах радарів:**

- імпульсно-доплерівські радары: використовують комбінацію імпульсної та доплерівської обробки для виявлення цілей. Такі радары підходять для виявлення швидко рухомих об'єктів, наприклад, літаків чи ракет;

- безперервно-хвильові радары (CW радары): постійно випромінюють сигнал і вимірюють доплерівський зсув, але не можуть визначити відстань до об'єкта. Вони добре підходять для оцінки швидкості об'єктів;

- фазовані антенні решітки: можуть використовувати доплерівську фільтрацію у поєднанні з адаптивним формуванням діаграми спрямованості, що підвищує чутливість і точність системи.

Фазовані антенні решітки (ФАР) є однією з найперспективніших технологій у сфері радіолокації, зв'язку та інших застосувань, завдяки їхнім значним перевагам, порівняно з традиційними антенними системами. ФАР дозволяє реалізувати адаптивне формування діаграми спрямованості, що покращує точність та швидкість виявлення цілей. Це особливо важливо у військових радіолокаційних системах для виявлення малих і швидко рухомих об'єктів. У системах зв'язку ФАР суттєво підвищує пропускну здатність завдяки можливості симультанної передачі даних на кілька напрямків, що є особливо цінним для 4G та 5G-мереж. Завдяки новим технологіям виробництва (наприклад, 3D-друк) забезпечується зниження вартості антенних систем, що зробить їх доступнішими та масовішими у виготовленні для широкого спектра застосувань. Крім того, ФАР можуть виконуватися більш компактними та легкими, що робить їх ідеальними для використання в переносних або компактних пристроях.

Недоліками використання методу, заснованого на доплерівському ефекті, є:

- *малорухомі об'єкти*: якщо об'єкт рухається повільно, доплерівський зсув буде незначним, що ускладнює його виявлення;
- *складні траєкторії руху*: у випадку, коли ціль рухається зі змінною швидкістю або хаотично (наприклад, деякі дрони), фільтрація може бути менш ефективною;
- *вплив перешкод*: штучні або природні перешкоди, що створюють відбиття з подібним доплерівським зсувом, можуть викликати хибні спрацьовування.

Водночас напрямками підвищення ефективності подібних систем є:

- *застосування багатопозиційних радарів*: багатопозиційні системи складаються з кількох радарів, розташованих у різних точках, що дає змогу створювати більш повну картину положення об'єктів. Завдяки цьому можна знизити ймовірність пропуску малих цілей, а також поліпшити точність визначення їхньої траєкторії;
- *використання штучного інтелекту та машинного навчання*: застосування алгоритмів машинного навчання для аналізу радіолокаційних даних допомагає автоматично розпізнавати малорозмірні цілі та відрізнити їх від шумів або природних перешкод (наприклад, птахів). Штучний інтелект може навчатися на великих наборах даних, що дозволяє покращити ефективність виявлення навіть у складних умовах;
- *збільшення частоти оновлення даних*: підвищення частоти оновлення інформації від радарів дає змогу швидше виявляти швидко рухливі малі цілі та відстежувати їх траєкторію в реальному часі. Це важливо для своєчасного реагування на потенційні загрози.

**Висновки:** підвищення ефективності виявлення малорозмірних цілей у радіолокації потребує комплексного підходу, що охоплює використання сучасних технологій, алгоритмів обробки сигналів та інтеграції з іншими методами виявлення. Такі заходи значно покращують здатність радарів виявляти навіть найменші повітряні загрози.

Список використаних джерел:

1. Основи побудови радіолокаційних засобів розвідки повітряного простору: конспект лекцій / К. С. Васюта та ін. Харків: ХУПС, 2013. 212 с.: іл. (Укр. мов.)
2. Озброєння радіотехнічних підрозділів і частин ППО. Наземний радіолокаційний запитувач НРЗ-П: навч. посіб. / О. С. Маляренко та ін. Харків: ХВУ, 2003.

**Любич Володимир Володимирович** – провідний експерт будівельний у частини забезпечення безпеки життя і здоров'я людини, захисту навколишнього природного середовища та забезпечення санітарно-епідеміологічного благополуччя населення ТОВ «Інженерно-будівельне бюро», м. Вінниця, e-mail: [mr.lyubich1988@gmail.com](mailto:mr.lyubich1988@gmail.com)

**Домненко Микола Григорович** – викладач кафедри військової підготовки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, [mikoladomnenko568@gmail.com](mailto:mikoladomnenko568@gmail.com)

*Lyubich Volodymyr Volodymyrovych* – is a leading expert in ensuring the safety of life of healthy people, protecting the excess natural environment and ensuring the sanitary and epidemiological well-being of the population of LLC “Engineering Bureau”, Vinnytsia, e-mail: [mr.lyubich1988@gmail.com](mailto:mr.lyubich1988@gmail.com)

**Domnenko Mikola Grigorovich** – speaker of the Department of Military Training, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [mikoladomnenko568@gmail.com](mailto:mikoladomnenko568@gmail.com)