

МЕТОДОЛОГІЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИЯВЛЕННЯ НАЗЕМНИХ МІН З ВИКОРИСТАННЯМ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Дмитрієва І.С.¹ [ORCID], Бімалов Д.В.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, України

²Український державний університет науки і технологій, аспірант, України

Анотація. У представленому дослідженні розглянуто методологічні засади застосування радіолокаційних технологій для дистанційного виявлення наземних мін шляхом інтеграції георадара та техніки синтезованої апертури. Запропоновано інноваційний підхід до створення системи на основі безпілотного літального апарата, котрий забезпечує безконтактну діагностику території. Детально проаналізовано структуру вхідних даних, основні етапи обробки сигналів, а також специфіку формування радіолокаційних зображень. Доведено ефективність запропонованого методу для ідентифікації неметалевих об'єктів, одночасно окреслені ключові обмеження, що виникають у результаті впливу фізико-хімічних характеристик ґрунту та умов навколишнього середовища.

Ключові слова: георадар, синтезована апертура, безпілотний літальний апарат, дистанційне зондування, радіолокаційні зображення.

Виявлення наземних мін залишається важливим завданням у сфері дистанційного зондування. Традиційні методи, зокрема застосування металодетекторів, проявляють невисоку ефективність в умовах зростання використання сучасних вибухових пристроїв із мінімальним або зовсім відсутнім вмістом металу, що зумовлює необхідність пошуку нових підходів для ідентифікації подібних загроз.

Одним із перспективних напрямків є використання радіолокаційних технологій, таких як георадарні системи (GPR), які дозволяють аналізувати структуру ґрунту на певній глибині [1]. У межах дослідження запропонований інноваційний метод дистанційного виявлення мін, який базується на інтеграції георадара з безпілотним літальним апаратом (БПЛА). Ця система використовує технологію синтезованої апертури (SAR), що суттєво підвищує якість зібраних даних та ефективність аналізу[2]. Запропонований підхід дозволяє проводити

обстеження територій без прямого фізичного контакту, забезпечуючи значно вищий рівень безпеки під час виконання робіт.

Розроблена система призначена для отримання радарних зображень підповерхневих шарів ґрунту, що дає змогу виявляти потенційні загрози, пов'язані з присутністю вибухонебезпечних предметів. Її функціонування базується на інтеграції радіолокаційних даних із навігаційними параметрами, що забезпечує високу точність у визначенні просторового розташування об'єктів.

Георадар працює з широкосмуговими сигналами у частотному діапазоні 3,1–5,1 ГГц, які відбиваються від неоднорідних структур під поверхнею ґрунту. Основні формати обробки даних включають A-scan і B-scan. Формат A-scan представляє собою часовий сигнал, отриманий у певній точці, тоді як B-scan формується як послідовність таких сигналів, зібраних уздовж траєкторії руху, наприклад, дрона. Відбиті сигнали дозволяють аналізувати межі матеріалів із різною діелектричною проникністю, що сприяє ефективному розпізнаванню як металевих, так і неметалевих об'єктів.

Для досягнення високої ступені точності в процесі реконструкції даних використовується інтегрована навігаційна система, яка об'єднує технологію RTK-GPS з інерційними вимірювальними пристроями. Це поєднання забезпечує точне визначення географічних координат, що є критично важливим підґрунтям для успішної реалізації алгоритмів обробки, особливо тих, які базуються на методах, пов'язаних із принципами синтезованої апертури.

Процедура обробки радіолокаційних даних включає проходження кількох послідовних етапів, кожен з яких відіграє унікальну роль у досягненні максимальної точності та деталізації кінцевого результату. Перший етап передбачає виконання фільтрації отриманих сигналів. Ця стадія зосереджена на видаленні різного роду шумів, усуненні небажаних компонентів фоновому характеру та приглушенні відбиттів, які виникають на межі розділу між повітрям і ґрунтом. Відбиття такого роду зазвичай мають високу амплітуду і можуть створювати перешкоди, що здатні приховувати критично важливу

інформацію, яка походить від підповерхневих об'єктів. Подальшим етапом є процес просторової прив'язки даних сигналу. Він передбачає ретельну синхронізацію інформації, отриманої від радіолокаційних систем і навігаційних пристроїв, а також проведення інтерполяції траєкторії руху безпілотного літального апарата (БПЛА). Така інтеграція дозволяє точно локалізувати кожне отримане вимірювання в географічному просторі, що має вирішальне значення для достовірного подальшого аналізу та моделювання.

Одним із найбільш технологічно складних і важливих етапів є впровадження методів, що базуються на принципах синтезованої апертури. У цьому контексті досягається унікальна можливість багаторазового спостереження одного й того самого об'єкта з різних ракурсів під час переміщення БПЛА вздовж траєкторії польоту. Зібрані сигнали об'єднуються методами когерентного підсумовування, що дозволяє суттєво підвищити просторову роздільну здатність системи. До того ж, це забезпечує покращення співвідношення сигналу до шуму, що безпосередньо сприяє створенню більш точного й деталізованого зображення досліджуваних об'єктів під поверхнею. Таким чином, реалізація цих технологій дозволяє не лише вдосконалити якість отриманих даних, але й розширити спектр застосування методів дистанційного зондування.

Процес створення радіолокаційного зображення реалізується шляхом використання методу зворотної проекції, який забезпечує можливість формування двовимірних зображень підповерхневих структур ґрунту. У цьому підході інтенсивність сигналу, зафіксованого на отриманих зображеннях, відображає рівень відбиття радіохвиль, що дає змогу виявляти візуальні аномалії [3]. Виявлення таких аномалій є особливо важливим, оскільки вони можуть свідчити про потенційну наявність мін або інших небезпечних об'єктів у межах досліджуваного середовища.

Процес ідентифікації можливих мінних об'єктів ґрунтується на аналізі даних радіолокаційних зображень, сформованих у ході дослідження. Основними критеріями для визначення таких об'єктів є фіксування локалізованих аномалій у відбитому сигналі, характерні особливості форми

сигналів, а також стабільність результатів на основі багатократних вимірювань. Варто зазначити, що запропонована методика орієнтована переважно на візуальний аналіз отриманих даних. Вона не потребує застосування складних автоматизованих алгоритмів класифікації, що спрощує її впровадження та використання.

Результатом роботи системи є набір двовимірних радіолокаційних зображень (SAR), які детально відтворюють підповерхневу структуру досліджуваного середовища [4]. Для кожної виявленої аномалії проводиться визначення просторових координат її розташування, приблизної глибини залягання та інтенсивності відбитого сигналу. Такі детальні параметри надають можливість для подальшого аналізу і створюють умови для кращого розуміння ситуації, а також для застосування превентивних дій щодо виявлених загроз.

Запропонований підхід має низку вагомих переваг. Насамперед, він дозволяє проводити дистанційне дослідження територій, мінімізуючи ризики для оператора. Завдяки використанню технології синтезованої апертури радарів (SAR), система здатна виявляти неметалеві об'єкти та забезпечувати високий рівень деталізації отриманих даних. Більше того, її функціональність залишається стабільною навіть у важкодоступних або небезпечних для перебування зонах.

Водночас цей метод має і певні недоліки. Його ефективність значною мірою залежить від фізико-хімічних характеристик ґрунту, таких як вологість і діелектрична проникність. Зокрема, високий рівень вологи спричиняє інтенсивне поглинання радіохвиль, що суттєво знижує якість сигналу. Іншою важливою умовою є забезпечення високої точності позиціонування безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Крім того, для обробки значного обсягу зібраної інформації потрібні потужні обчислювальні ресурси, що може ускладнювати реалізацію методу.

Таким чином, інтеграція георадара із застосуванням технології синтезованої апертури радарів є дійсно дієвим рішенням для задач дистанційного виявлення наземних мін. Результати проведених досліджень

підтверджують доцільність його використання, особливо в умовах, коли рівень поглинання радіохвиль є низьким. Подальший розвиток цього напрямку повинен зосереджуватися на впровадженні алгоритмів автоматизованого аналізу даних та поєднанні з іншими передовими сенсорними технологіями.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar. — 2nd ed. — London: IET, 2004. ISBN: 0863413609
2. Cumming I.G., Wong F.H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. — Boston: Artech House, 2005.
3. Richards M.A. Fundamentals of Radar Signal Processing. — McGraw-Hill, 2014. ISBN 0070607370, 9780070607378
4. Skolnik M.I. Radar Handbook. — 3rd ed. — McGraw-Hill, 2008.

METHODOLOGY FOR THE REMOTE DETECTION OF LANDMINES USING RADAR TECHNOLOGIES

Iryna Dmytriieva, Dmitry Bimalov

Abstract. *This study examines the methodological foundations for the application of radar technologies in the remote detection of landmines through the integration of ground-penetrating radar and synthetic aperture techniques. An innovative approach is proposed for creating a system based on an unmanned aerial vehicle, which enables contactless surveying of areas. The structure of the input data, the main stages of signal processing, and the specifics of radar image formation are analysed in detail. The effectiveness of the proposed method for identifying non-metallic objects has been demonstrated, whilst the key limitations arising from the influence of the soil's physico-chemical characteristics and environmental conditions have been outlined.*

Keywords: *ground-penetrating radar, synthetic aperture, unmanned aerial vehicle, remote sensing, radar images.*