

УДК 621.317.4

В.Я. Лікаренко, студент гр. ПІ-11мп, к.т.н., Козир О.В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗАСОБИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ МАГНІТНИХ АНОМАЛІЙ

Анотація. В статті висвітлено засоби та методи локалізації феромагнітних та електропровідних об'єктів. Наведено сучасні засоби локалізації та приклади застосування. Найперспективнішими із наявних методів локалізації є пасивні методи. Перевагами пасивних методів є відсутність джерела сигналу, застосування якого неможливо у певних сферах. Серед пасивних методів найпоширенішим є метод локалізації магнітних аномалій. Перевагами цього методу є вимірювання збурення або аномалії магнітного поля Землі, яке викликано власним магнітним полем феромагнітного об'єкту.

Ключові слова: локалізація, магнітні аномалії, магнітометри

ВСТУП

В цей складний час, важливим напрямом наукових досліджень є пошук та розробка методів ефективного виявлення феромагнітних та електропровідних об'єктів для практичного застосування у геологорозвідці, у сфері безпеки, для гуманітарних цілей розмінування тощо. У якості прикладів застосування методів виявлення феромагнітних об'єктів можна навести: заходи безпеки на пунктах пропуску, портах, пошук феромагнітних об'єктів для захисту конвеєрних стрічок в вугільних розрізах, а також дослідження значних площ земної поверхні або глибин водних просторів.

Дані дослідження супроводжуються вимірюваннями електромагнітних величин на фоні значних шумів та завад. Це спонукає до застосування багатодатчикових систем [1] та складних алгоритмів обробки вимірювальної інформації. Актуальним є аналіз електромагнітних методів пошуку феромагнітних об'єктів, які набули широкого застосування у практичних та наукових завданнях. Аналіз відомих методів та засобів пошуку феромагнітних об'єктів електромагнітними методами за типами використовуваних датчиків та методів.

ОГЛЯД ЗАСОБІВ ЛОКАЛІЗАЦІЇ

Будь-який металічний об'єкт намагнічується магнітним полем Землі, створюючи збурення у цьому полі. Існує великий вибір датчиків для вимірювання зміни магнітного поля Землі. До них можна віднести:

- квантові і надпровідні магнітометри;
- магніто-оптичні перетворювачі;
- датчики Холла;
- протонні магнітометри;
- ферозондові магнітометри;
- магніторезистивні датчики.

Магніторезистивні датчики використовуються там, де потрібна висока чутливість у вузькому діапазоні вимірювання. Принцип роботи магніторезистивних датчиків полягає у зміні напрямку намагніченості внутрішніх складових кристалічної решітки (доменів) пермалоевої плівки.

Магнітні датчики на основі ефекту Холла є найбільш розповсюдженими. Вони найчастіше використовуються у системах лінійного та кутового позиціонування, вимірювання швидкості та струму.

Найбільш поширеними неконтактними електромагнітними методами пошуку малорозмірних об'єктів на глибинах до 10 м в даний час є магнітометричний, індукційний і радіолокаційний. Індукційний і радіолокаційний методи є активними. Індукційний метод дозволяє виявити об'єкти, виконані з будь-якого металу (як феромагнітного, так і діамагнітного), а також ті, що містять в конструкції металеві елементи. Радіолокаційний метод застосовується для пошуку як металевих так і неметалевих об'єктів.

Виявлення магнітних аномалій (англ. magnetic anomaly detection (MAD)) — це пасивний метод пошуку прихованих феромагнітних об'єктів шляхом виявлення аномалій у земному магнітному полі [1]. Магнітне поле феромагнітного об'єкту називають магнітною аномалією, через те, що воно змінює розподіл магнітного поля Землі. Використання цього методу базується на виділенні магнітного сигналу магнітної аномалії на фоні магнітного поля Землі та присутності завад.

Даний метод базується на вирішенні оберненої задачі вимірювання, тобто за виміряними показниками магнітного поля встановлюється положення та магнітні властивості аномалії. Для цього застосовують методи глобальної оптимізації. Ці методи застосовують для знаходження глобального мінімуму функції мінімізації похибки апроксимації виміряного магнітного поля, масивом дачів, моделлю магнітної аномалії у заданих границях за наявності значної кількості локальних мінімумів. Рішення оберненої задачі магнітометрії — один із основних методів локалізації заритих металевих об'єктів, мін, невибухнувших боєприпасів, металевої військово-морської техніки.

Метод MAD знайшов широке застосування у цивільних та військових сферах. У військовій сфері цей метод застосовують для:

- пошук нерозірваних боєприпасів [2];
- пошук підводних об'єктів тощо.

Підводні човни створюють магнітне поле за яким можна установити їх тип та просторове положення. Унікальне магнітне поле човна створюється намагніченими феромагнітними матеріалами корпусу або електричним струмом живлення корабля. Феромагнітні матеріали корабля намагнічуються магнітним полем Землі. Через значну інтенсивність цього магнітного поля та велику кількість феромагнітного матеріалу корабля, магнітне поле корабля може бути детектоване магнітними перетворювачами для локалізації корабля.

Магнітне поле постійно оточує корабель, перебуває він у русі чи не рухається. У нерухомому положенні корабель створює постійне та індуковане магнітне поле. Під час руху магнітне поле корабля має складну структуру та викликано різними джерелами:

- електрохімічні реакції корабля та води навколо;
- електромагнітна індукція корабля, яка викликана:
 - рухом магнітного корпусу корабля;
 - рухом металевого корпусу корабля;

- морськими хвилями, які створює корабель на воді;
 - електромагнітним випромінюванням та струмом витoku корабля.
- У цивільній сфері MAD застосовують для:
- виявлення підводних кабелів та трубопроводів [3];
 - спостереження за дорожнім рухом [4];
 - у медицині [5] тощо.

Серед наявних методів опрацювання даних магнітних давачів для виявлення магнітних аномалій можна виділити метод розкладу сигналу магнітного діполя за ортонормованим базисом [6]. Даний метод широко застосовується для виявлення підводних об'єктів.

Недоліком MAD методу є затухання магнітного сигналу із збільшенням відстані. Тому на даний момент ідуть розробки методів збільшення ймовірності виявлення магнітних аномалій за слабким сигналом.

Одним із найбільш поширених застосувань MAD є пошук нерозірваних боєприпасів (англ. unexploded ordnance (UXO)). Нерозірвані боєприпаси містять небезпечні вибухові, горючі чи отруйні хімічні речовини. До нерозірваних боєприпасів відносять ті, що розроблені для тривалого знаходження у середовищі, так і ті, що не розірвались через збій у роботі. Розміри боєприпасів становлять від кількох міліметрів, для пістолетних боєприпасів, до декількох метрів, для ракет, снарядів та бомб. UXO становлять значну загрозу та повинні бути виявлені та знешкодовані із місці військових дій та полів бою.

UXO часто знаходяться на глибинах недосяжних для часто вживаних промислових активних металошукачів. Глибина занурення UXO може складати до 3 м. До таких UXO належать мінометні та артилерійські снаряди та авіаційні бомби. Відсоток нерозірваних боєприпасів може складати 15 %. Чутливість активних металодетекторів падає експоненціально за віддалення від об'єкту котушки детектора. Робочій діапазон сучасних активних міношукачів не перевищує 20 см. Для виявлення UXO на глибині застосовують методи глибокого пошуку, як активні так і пасивні. Активні методи застосовують детекторні котушки до 1 м, що збільшує глибину проникнення сигналу до 3 м. Проте використання великих котушок зменшує горизонтальну роздільну здатність та чутливість до малих об'єктів. Перевагою активних методів є можливість виявлення усіх металевих та інших провідних об'єктів. Недоліком є те, що активні методи можуть викликати детонацію UXO.

Пасивні методи виявлення боєприпасів застосовують наступні типи магнітометрів:

- скалярні магнітометри:
 - протонні;
 - на основі парів цезію;
 - Оверхаузера;
- векторні магнітометри — ферозондові (fluxgate);
- SQUID магнітометри. Найчастіше застосовуються в лабораторіях.

Залишкова намагніченість боєприпасів звичайно невелика. Так, авіаційні бомби можуть розмагнічуватись через удар об землю. Розподіл магнітного поля

(магнітна сигнатура; англ. magnetic signature) значною мірою залежить від об'єму, товщини оболонки, відносної магнітної проникності, відношення довжини до діаметру та орієнтації у геомагнітному полі. Цей розподіл мало залежить від маси металу у боєзапасі.

На практиці поріг чутливості магнітної сигнатури складає 1 нТл. Бомби довжиною в 2,4 м можна виявити з відстані 6 м, в той час, як великокаліберні набої із відстані менше 20 см.

До пасивних методів виявлення боєприпасів можна віднести:

- інверсія магнітних вимірювань скалярним магнітометром;
- використання векторних або тензорних градіометрів. Проте даний метод вимагає калібрування через нестабільність датчиків;
- використання повного градієнту магнітного поля використовуючи замкнутий математичний вираз.

ВИСНОВКИ

Методи та засоби ефективного виявлення феромагнітних та електропровідних об'єктів представлені широким набором різноманітних давачів, вимірювальних пристроїв на їх основі та методів їх використання. Перспективними методами виявлення є методи локалізації магнітних аномалій. Це пасивні методи виявлення феромагнітних об'єктів шляхом розпізнання аномалій у земному магнітному полі. Відсутність додаткових джерел сигналів робить їх ефективними для віддаленого неконтактного виявлення вибухонебезпечних об'єктів, а також у задачах таємного виявлення магнітних аномалій у земній поверхні або на глибині.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] R. J. Kozick and B. M. Sadler, "Algorithms for tracking with an array of magnetic sensors," in Proc. 5th IEEE SAM Signal Process. Workshop, 2008, pp. 423–427.
- [2] Z. Zalevsky, Y. Bregman, N. Salomonski, and H. Zafrir, "Resolution enhanced magnetic sensing system for wide coverage real time UXO detection," J. Appl. Geophys., vol. 84, pp. 70–76, Sep. 2012.
- [3] X. Xiang, C. Yu, Z. Niu, and Q. Zhang, "Subsea cable tracking by autonomous underwater vehicle with magnetic sensing guidance," Sensors, vol. 16, no. 8, p. 1335, Aug. 2016.
- [4] D. Liu et al., "Direction identification of a moving ferromagnetic object by magnetic anomaly," Sens. Actuators A, Phys., vol. 229, pp. 147–153, Jun. 2015.
- [5] J. E. McGary, "Real-time tumor tracking for four-dimensional computed tomography using squid magnetometers," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 9, pp. 3351–3361, 2009.
- [6] L. Yang et al., "Magnetic anomaly signal space analysis and its application in noise suppression," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 16, no. 1, pp. 130–134, Jan. 2019.

Наук. керівник – к.т.н., Козир О.В.