

Magnetic Anomaly Detection Method with Empirical Mode Decomposition and Minimum Entropy Feature

M. Jafari Moghaddam, H. R. Khodadadi*, P. Etezadifar

* Associate Professor, Imam Hussein Comprehensive University, Tehran Iran

(Received: 12/09/2022; Accepted: 18/01/2023)

Abstract

Magnetic anomaly detection (MAD) is a passive method for airborne detection of subsurface objects. Light, radar and sound waves are unable to pass through the open air into the sea water environment and penetrate deep into the water, weaken or return to the air environment. On the other hand, the magnetic field force lines on this boundary are unchanged. MAD method is based on measuring the smallest changes or anomalies caused by the earth's magnetic field due to the passage of a ferro-magnetic object and the magnetic bipolar field generated around it, and especially in shallow waters, is one of the most efficient methods. Due to the rapid reduction of the magnetic field by increasing the distance, the magnetic disturbance generated by the magnetic target in the distance, usually buried in magnetic noise, in other words, the signal-to-noise ratio (SNR) decreases. In this paper, in order to improve the detection performance of magnetic impairment in low SNR, a hybrid method of MAD based on empirical mode decomposition (EMD) and minimal entropy method is proposed. In order to evaluate the performance of the method, an electronic measuring device has been constructed and magnetic data have been fieldly harvested from caspian sea in Anzali port area. These data impregnated with environmental magnetic noise have been investigated by entropy method. According to the entropy feature, magnetic anomaly is detected whenever entropy degrades below the defined threshold. In this way, the proposed method for detecting weak magnetic anomalies is also effective. The test results indicate a high probability of detection of the proposed method for low input SNR. Compared to the original signal SNR with -10 dB, the reconstructed signal SNR has improved to 8 dB. In addition, the total time of updating the parameters of the probability density function (PDF), of noise is about 0.075s obtained.

Keywords: Magnetic anomaly detection (MAD), Empirical mode decomposition (EMD), Intrinsic Modal Functions (IMF), Entropy.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

© Authors



* Corresponding author E-mail: Hkhdadi@ihu.ac.ir

آشکار سازی ناهنجاری مغناطیسی مبتنی بر روش تجزیه حالت تجربی و ویژگی حداقل آنتروپی

مهدی جعفری مقدم^۱، حمیدرضا خدادادی^{۲*}، پوریا اعتضادی فر^۳

۱- دانشجوی دکترا، ۲- دانشیار، ۳- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸)

چکیده

آشکار سازی ناهنجاری مغناطیسی (MAD)، یک روش غیرفعال برای آشکار سازی هوا پایه اجسام زیرسطحی است. امواج نوری، راداری و صوتی، قادر به عبور از هوای آزاد به محیط آب دریا و نفوذ به عمق آب نبوده، میرا شده و یا به محیط هوا برمی گردند. از طرف دیگر خطوط نیروی میدان مغناطیسی در این مرز بدون تغییر هستند. روش MAD بر اساس اندازه گیری کوچکترین تغییرات یا اختلال ایجاد شده در میدان مغناطیسی زمین بر اثر عبور یک شیء فرومغناطیسی و میدان دوقطبی مغناطیسی تولید شده در اطراف آن، استوار است و به ویژه در آب های کم عمق، یکی از کارآمدترین روش ها به شمار می رود. با توجه به کاهش سریع میدان مغناطیسی با افزایش فاصله، اختلال مغناطیسی تولید شده توسط هدف مغناطیسی در فاصله دور، معمولاً در نویز مغناطیسی، مدفون می شود و به عبارت دیگر نسبت سیگنال به نویز (SNR) پایین می آید. در این مقاله به منظور بهبود عملکرد آشکار سازی اختلال مغناطیسی در SNR پایین، یک روش ترکیبی از MAD مبتنی بر روش تجزیه حالت تجربی (EMD)، و حداقل آنتروپی، پیشنهاد شده است. به منظور ارزیابی عملکرد روش، یک دستگاه اندازه گیری الکترونیکی ساخته شده و داده های مغناطیسی به صورت میدانی از دریای کاسپین در محدوده بندر انزلی برداشت شده است. این داده ها که آغشته به نویز مغناطیسی محیطی است به روش آنتروپی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به ویژگی آنتروپی، ناهنجاری مغناطیسی هر زمان که آنتروپی زیر آستانه تعریف شده تنزل یابد، تشخیص داده می شود. به این ترتیب، روش پیشنهادی برای آشکار سازی ناهنجاری مغناطیسی ضعیف هم مؤثر است. نتایج آزمایش نشان دهنده احتمال آشکار سازی بالای روش پیشنهادی برای SNR ورودی پایین است. در مقایسه با SNR سیگنال اصلی که 10 dB- است، SNR سیگنال بازسازی شده به 8 dB بهبود یافته است. به علاوه، زمان کل به روزرسانی پارامترهای تابع چگالی احتمال (PDF)، نویز حدود ۰/۰۷۵ به دست آمده است.

کلیدواژه ها: آشکار ساز اختلال مغناطیسی (MAD)، روش تجزیه حالت تجربی (EMD)، توابع حالت ذاتی (IMF)، آنتروپی

توسط اهداف از راه دور، معمولاً در نویز مدفون است [۴]. بنابراین، به روش مؤثر برای بهبود عملکرد آشکار ساز اختلال مغناطیسی نیاز است.



شکل (۱): مفهوم اختلال مغناطیسی

محققان، روش های متعددی برای آشکار سازی اختلال مغناطیسی پیشنهاد داده اند [۱۲-۵]. این روش ها می توانند به دو روش عمده، تقسیم بندی شوند: دسته اول مربوط به بهبود میزان SNR سیگنال اختلال توسط کاهش نویز است [۱۳]. لئو و همکاران [۴]، یک روش تطبیقی نویز چسبنده^۴ را پیشنهاد داده اند. این روش برای تشخیص ناهنجاری های مغناطیسی با $SNR < 1$ کارآمد نیست. برای این وضعیت، گینزبرگ و همکاران [۱۴]، روشی برای

میدان مغناطیسی تولید شده توسط یک هدف مغناطیسی که توزیع میدان مغناطیسی محیط اطراف خود را تغییر می دهد، اختلال یا ناهنجاری مغناطیسی^۱ نامیده می شود. این مفهوم در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است. آشکار سازی ناهنجاری مغناطیسی، یک روش غیرفعال^۲ برای تشخیص اهداف فرومغناطیسی پنهان است. از این روش برای تشخیص مهمات عمل نکرده^۳ (UXO) [۱]، تشخیص خطوط لوله زیر آب یا آشکار سازی کابل های زیرزمینی و زیر آبی [۲]، بررسی ها و کاربردهای پزشکی [۳] و مهم ترین کاربرد آن در آشکار سازی اهداف زیرسطحی به ویژه زمانی که از هواپیما یا پهپاد برای آشکار سازی بخواهیم استفاده کنیم، همچنین، تحقیقات باستان شناسی، اکتشافات زمین شناسی یا کاربردهای زیست شناسی استفاده می شود. با توجه به کاهش شدید و سریع میدان مغناطیسی با افزایش فاصله، اختلال مغناطیسی تولید شده

* رایانامه نویسنده مسئول: Hkhdadi@ihu.ac.ir

¹ Magnetic Anomaly

² Passive

³ Unexploded Ordnance

⁴ Adaptive Coherent Noise

مقیاس‌های مختلف تجزیه می‌شوند. با توجه به ویژگی‌های IMFها، پارامترهای تابع چگالی احتمال نويز مغناطیسی در زمان واقعی با استفاده از نويز مغناطیسی بازسازی شده، به‌روزرسانی می‌شوند. سپس ویژگی آنروپی از سیگنال مغناطیسی بازسازی شده در یک پنجره متحرک با به‌روزرسانی PDF نويز محاسبه می‌شود. در نهایت، ناهنجاری مغناطیسی هر زمان که ویژگی آنروپی پایین‌تر از سطح آستانه قرار گیرد، آشکارسازی می‌شود. این مقاله به‌صورت زیر و پس از بخش اول که مقدمه‌ای در این خصوص بود، سازمان‌دهی شده است:

در بخش دوم، به معرفی نظریه آشکارسازی در دو روش تجزیه حالت تجربی و ویژگی حدافل آنروپی و سپس آشکارسازی اختلال مغناطیسی با روش ترکیبی این دو شیوه پرداخته شده است. در بخش سوم، به معرفی روش پیشنهادی آزمایش و حس‌گر استفاده شده برای این منظور پرداخته شده و در نهایت در بخش چهارم و پایانی، نتیجه‌گیری از روش پیشنهادی گنجانده شده است.

۲- نظریه آشکارسازی

۲-۱- معرفی روش EMD روش تجزیه حالت تجربی (EMD) یک روش تجربی برای تجزیه یک سیگنال به مؤلفه‌های فرکانسی آن است که اولین بار توسط هوانگ^{۱۱} و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه شد. با استفاده از این روش، می‌توان یک سیگنال را که دارای چند مؤلفه فرکانسی مختلف است، به مؤلفه‌های فرکانسی آن تجزیه کرد. این روش دارای دو مزیت مهم زیر است:

استخراج ویژگی‌های سیگنال بدون پیش‌فرض مشخص کردن فرکانس لحظه‌ای که با ترکیب شدن با تبدیل هیلبرت این امر ممکن خواهد شد.

این روش سیگنال را به یک سری از IMFها با مقیاس زمانی مختلف که باید دارای دو شرط اساسی زیر باشند تجزیه می‌کند:

تعداد اکستریم‌های آن برابر نقاط صفر آن باشد یا نهایتاً به میزان یک عدد متفاوت باشد.

انتگرال آن در بازه زمانی تعریف شده برابر صفر باشد. (به عبارت دیگر، مساحت زیر منحنی این تابع باید برابر صفر باشد.) حال به بررسی مراحل الگوریتم EMD می‌پردازیم:

مرحله اول: تعیین نقاط ماکزیمم و مینیمم محلی سیگنال ورودی.

مرحله دوم: ایجاد منحنی پوش بالا از طریق برازش درجه ۳ بر نقاط ماکزیمم محلی و ایجاد منحنی پوش پایین از طریق برازش درجه ۳ بر نقاط مینیمم محلی.

MAD با استفاده از سه تابع پایه متعامد^۱ (OBF) که متکی بر فیلتر همسان است پیشنهاد دادند. آقای فان و همکاران [۱۵] یک روش بهینه با استفاده از چهار تابع پایه متعامد پیشنهاد دادند که می‌تواند علاوه بر تشخیص ناهنجاری مغناطیسی، جهت حرکت هدف را نیز تعیین می‌کند. روش‌های ذکر شده فوق برای آشکارسازی ناهنجاری‌های مغناطیسی مدفون در نويز سفید گوسی، کار آیی دارند. در برخی مواقع و در شرایطی، نويز ژئومغناطیسی در نظر گرفته شده، نويزی با چگالی طیف توان^۲ (PSD) $1/f^\alpha$ که $0 < \alpha < 2$ است، می‌باشد. برای بررسی نويز با این چگالی طیف توان، شینکر و همکاران [۱۶]، یک فیلتر سفیدکننده نويز طراحی کردند که عملکرد آشکارسازی اختلال مغناطیسی را بهبود می‌بخشد. این روش می‌تواند به‌عنوان یک روش فرایند خود بازگشتی^۳ (AR) در نظر گرفته شود و به‌طور مؤثر برای فیلترهای با مرتبه بالا کار کند.

دسته دوم در تقسیم‌بندی روش‌های MAD، آشکارسازی ناهنجاری‌های مغناطیسی توسط عمل تبدیل^۴ است. روش حدافل آنروپی^۵ (ME)، داده‌های اندازه‌گیری شده را به مقدار آنروپی برای تشخیص ناهنجاری تبدیل می‌کند [۷]. از آنجاکه نويز ژئومغناطیسی معمولی را با استفاده از سیگنال تفاضل می‌توان حذف کرد، روش‌هایی بر پایه اطلاعات آنروپی سیگنال تفاضل برای تشخیص هدف در محیط‌های پیچیده، مناسب‌تر هستند [۱۲]. روش‌های فوق، نیاز به تابع چگالی احتمال^۶ (PDF) نويز مغناطیسی دارند. روش گذر از مرتبه بالا^۷ (HOC)، یک روش جایگزین برای تجزیه تحلیل طیفی با استفاده از شمارش تعداد گذر از صفر است [۹]. مزایای این روش‌ها، پیاده‌سازی آسان و پیچیدگی محاسباتی پایین است. با این حال، عملکرد آشکارسازی این روش‌ها ممکن است با SNR پایین سیگنال ورودی، محدود گردد. علاوه بر این، برخی روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، برای آشکارسازی اختلال مغناطیسی پیشنهاد شده است [۱۹-۱۷].

به‌منظور بهبود عملکرد آشکارسازی برای موارد دارای SNR پایین و محیط مغناطیسی پیچیده، یک روش تطبیقی MAD با استفاده از روش تجزیه حالت تجربی^۸ (EMD)، و حدافل ویژگی آنروپی^۹ (ME) در این مقاله پیشنهاد شده است. در این روش، داده‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده، به توابع مود ذاتی^{۱۰} (IMF) با

¹ Ortho normal Basis Functions

² Power Spectral Density

³ Autoregressive

⁴ Transformation

⁵ Minimum Entropy Method

⁶ Probability Density Function

⁷ High-Order crossing method

⁸ Empirical Mode Decomposition

⁹ Minimum Entropy feature

¹⁰ Intrinsic Modal Functions

معیار میانگین خطای مربع پیوسته^۱ (CMSE) برای پیدا کردن نقطه تقسیم^۲ پیشنهاد شده است [۲۰] که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CMSE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (c_k(j) + c_{k+1}(j))^2 \quad (5)$$

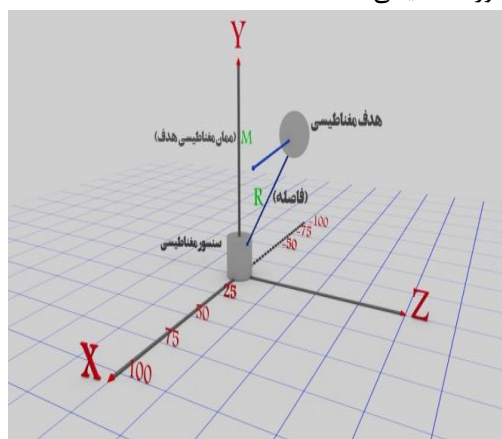
$$k = 1, 2, \dots, K - 1$$

که در این رابطه N طول هریک از اجزاء IMF و K تعداد IMF هاست.

۲-۲- ویژگی حداقل آنتروپی: ناهنجاری مغناطیسی یک هدف مغناطیسی را می‌توان به عنوان یک دوقطبی مغناطیسی در نظر گرفت هرگاه که فاصله بین هدف و مغناطیس سنج بیشتر از سه برابر بزرگ‌ترین بعد هدف مغناطیسی باشد. برای آشکارسازی یک هدف مغناطیسی، مدل MAD در شکل (۲) به نمایش درآمده است. میدان مغناطیسی تولید شده از هدف از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\mathbf{B}_t = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3(\mathbf{M} \cdot \mathbf{R})\mathbf{R}}{R^5} - \frac{\mathbf{M}}{R^3} \right) \quad (6)$$

که در آن، $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ H/m ضریب گذردهی فضای آزاد، M ممان مغناطیسی هدف، R فاصله بین هدف و مغناطیس سنج (سنسور مغناطیسی)، است.



شکل (۲). مدل آشکارساز اختلال مغناطیسی (MAD)

در عمل، میدان مغناطیسی B اندازه‌گیری شده توسط سنسور مغناطیسی، از میدان مغناطیسی محیط، \mathbf{B}_e ، و میدان مغناطیسی تولید شده توسط هدف، \mathbf{B}_t ، تشکیل شده است. زمانی که هدف از سنسور مغناطیسی دور است، $|\mathbf{B}_t|$ بسیار کمتر از $|\mathbf{B}_e|$ است. هنگامی که از مغناطیس سنج میدان کل برای آشکارسازی هدف استفاده می‌کنیم، می‌توانیم مقدار اسکالر اندازه‌گیری را از رابطه‌ی زیر به دست آوریم [۸-۱۱]:

مرحله سوم: میانگین‌گیری از منحنی‌های پوش بالا و پایین سیگنال $m(t)$

مرحله چهارم: تفریق میانگین منحنی پوش بالا و پایین از سیگنال ورودی (که در واقع با این کار، مؤلفه فرکانس پایین سیگنال را از خود سیگنال حذف می‌کنیم).

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (1)$$

مرحله پنجم: بررسی شرط IMF بودن و شرط توقف الگوریتم: در این مرحله، یک شرط قرار می‌دهیم و آن اینکه کی این روند متوقف شود:

$$D_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_1^{k-1}(t) - h_1^k(t)|^2}{|h_1^{k-1}(t)|^2} \quad (2)$$

مرحله ششم: اگر این D_k از یک مقدار مشخص کمتر باشد، در صورت عدم ارضای شرط مرحله پنجم، جاگذاری سیگنال حاصل از مرحله چهار به جای سیگنال اصلی و ادامه فرایند از مرحله اول. مرحله هفتم: اگر شرط مرحله پنجم برقرار باشد، فرایند غربال پایان یافته و $c_1 = h_1^k$ به عنوان اولین IMF در نظر گرفته می‌شود که در واقع مؤلفه فرکانس بالای سیگنال $x(t)$ است و اندیس k مشخص کننده تعداد غربال است.

مرحله هشتم: باقیمانده به صورت رابطه (۳) تعریف شده و اگر خود، شرط IMF بودن را ارضا کند، یک IMF محسوب شده و در غیر این صورت اگر شرط (۱) را داشته باشد، به عنوان سیگنال اولیه فرض شده و گام‌های یک الی چهار تکرار می‌گردد تا IMF بعدی به دست آید و اگر شرط (۱) را نداشته باشد به عنوان باقیمانده در نظر گرفته می‌شود.

$$r_1 = x(t) - c_1^k \quad (3)$$

نهایتاً سیگنال اصلی مجموع IMFها به علاوه باقیمانده است که N مشخص کننده تعداد IMFها است:

$$x(t) = r + \sum_{n=1}^N h_n \quad (4)$$

نکته: تعیین معیار توقف D_k : معیار توقف باید به گونه‌ای باشد که:

- سیگنال بیش از حد غربال نشود.
- سیگنال کمتر از حد غربال نشده و اختلاط مود به وجود نیاید.
- زمان اجرای برنامه زیاد نشود.

ترتیب استخراج مودها (IMFها) به این صورت است که ابتدا مؤلفه‌های فرکانس بالا استخراج خواهند شد. بنابراین یک جزء نمایه شده توسط h وجود خواهد داشت که می‌توان آن را به عنوان توزیع انرژی SNR در نظر گرفت. پس از h امین جزء IMF، انرژی غالب سیگنال اختلال مغناطیسی، بین اجزاء IMF توزیع می‌شود.

¹ Continuous Mean Square Error

² Dividing Point

- گام اول: تجزیه سیگنال اصلی به یک سری اجزای IMF و باقیمانده.
- گام دوم: بازسازی سیگنال و نویز مغناطیسی با توجه به نقطه تقسیم.
- گام سوم: به روزرسانی پارامترهای PDF نویز بر اساس نویز بازسازی شده.
- گام چهارم: محاسبه ویژگی آنالوژی سیگنال بازسازی شده با PDF.
- گام پنجم: مشخص کردن زمان آشکارسازی بر اساس آستانه تعریف شده.

۳- آزمایش روش پیشنهادی

۳-۱- طراحی آزمایش: به منظور انجام آزمایش و بررسی نتایج حاصل از آن، یک دستگاه مغناطیس سنج طراحی و ساخته شده است. سنسور مغناطیسی استفاده شده برای این مغناطیس سنج، یک سنسور مغناطیسی FLC-100 ساخت شرکت استفان مایر آلمان نمایش داده شده در شکل (۳)، با حساسیت بالا و نویز ذاتی حدود 0.6 nT (نانوتسلا) در هر هرتز به کار برده شد [۲۲]. این حسگر بسیار حساس، قادر است میدان مغناطیسی و تغییرات آن را در محدوده $\pm 100 \mu\text{T}$ احساس نموده و خروجی ولتاژ آنالوژی متناسب با آن، تولید نماید. تغذیه این حسگر ۵ ولت و مصرف جریان آن تنها ۲ میلی آمپر است. مدار این حسگر در شکل (۴) به تصویر کشیده شده است. حسگر مغناطیسی FLC100 که با ولتاژ تغذیه ۵ ولتی کار می کند، در صورت قرارگرفتن در یک میدان مغناطیسی، یک خروجی آنالوگ که ولتاژی بسیار ضعیف و در حد چند میلی ولت است، میان دوپایه خروجی ظاهر می کند. بنابراین، در مدار راه انداز طراحی شده، می بایست طبقه اول، یک طبقه تقویت کننده ولتاژ باشد که از آپامپ LM2576 استفاده شد. طبقه بعدی که در این مدار لحاظ شده است، میدل آنالوگ به دیجیتال است که خروجی ولتاژ آنالوگ ما را به سیگنال دیجیتال قابل بهره برداری در مدار تبدیل نماید که در این مدار از میدل AD620 ۱۲ بیتی (با رزولوشن 2^{12})، ساخت شرکت Analog Devices بهره برده ایم. میکروکنترلر مورد استفاده در این مدار، ATXMEGA سری A4 که یک میکرو کاملاً نظامی و حساس با مصرف توان کم، با قابلیت و توانایی بالاست، می باشد. خروجی حسگر پس از تقویت و دیجیتال سازی، با یک مقدار مرجع مقایسه می شود. در صورتی که میدان احساس شده از مقدار مرجع بیشتر باشد، سیگنالی تولید می گردد و برای اعلام حضور میدان و در واقع اعلام حضور یک هدف فرومغناطیسی که باعث اختلال و به وجود آمدن این میدان شده است، چراغ LED سبزرنگ روشن شده و آلام به صدا درمی آید.

$$B_m = B_e \left(1 + \frac{B_e \cdot B_t}{B_e^2} \right) = B_e + u \cdot B_t \quad (7)$$

که در آن، u بردار یک میدان محیط است.

در اندازه گیری ها، ناهنجاری مغناطیسی تولید شده توسط هدف در میدان مغناطیسی زمین، می تواند الگوی نویز را تغییر دهد. در تئوری اطلاعات، آنتروپی به عنوان اندازه گیری اطلاعات، به کار می رود. در مرجع [۷]، آنتروپی برای تشخیص تغییرات در الگوی نویز مغناطیسی استفاده شده است. این بدین معنی است که ویژگی آنروپی میدان مغناطیسی، به طور چشمگیری تغییر خواهد کرد هنگامی که میدان مغناطیسی محیط، حاوی اختلال مغناطیسی باشد. به این ترتیب، می توان میزان آنروپی را به عنوان یکی از ویژگی های ناهنجاری مغناطیسی در نظر گرفت. اندازه آنروپی را می توان در یک پنجره متحرک L نمونه ای به صورت زیر محاسبه کرد:

$$F_{en}(x_i) = - \sum_{n=i-L+1}^i p(x_n) \log p(x_n) \quad (8)$$

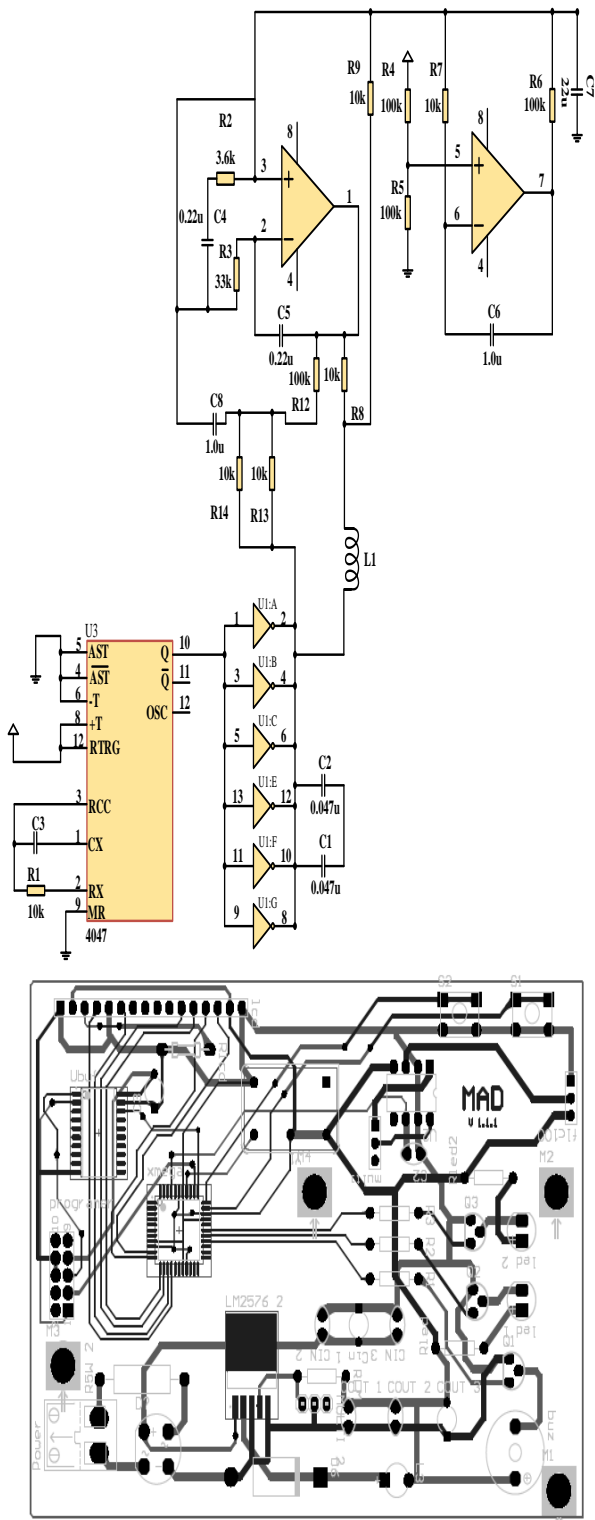
که در آن، $p(x_n)$ تابع چگالی احتمال میدان مغناطیسی محیط است. آشکارسازی زمانی رخ می دهد که میزان آنروپی به زیر یک مقدار آستانه مشخص افت پیدا کند.

در روش ME، یک وضعیت قبلی از PDF نویز مغناطیسی زمانی که از ویژگی آنروپی برای آشکارسازی هدف استفاده می شود، نیاز است. PDF با یک روش آماری مبتنی بر نویز مغناطیسی اندازه گیری شده به دست می آید. اما زمانی که شرایط و ویژگی های محیطی تغییر می کند، به روزرسانی PDF توسط داده های جدید، ضروری است [۷]. به دست آوردن نویز پس زمینه مغناطیسی در زمان واقعی، در صورتی که مغناطیس سنج روی یک سکوی متحرک نصب شده است، کار دشواری است. بنابراین، عملکرد آشکارساز ME در این وضعیت، تحت تأثیر قرار خواهد گرفت.

۳-۲ آشکارسازی اختلال مغناطیسی با استفاده از

EMD و حداقل آنروپی: برای غلبه بر مشکلات روش ME که در مرجع [۷] آمده است، یک روش ترکیبی MAD مبتنی بر روش تجزیه حالت تجربی و ویژگی حداقل آنروپی در این مقاله پیشنهاد شده است. بر اساس EMD، SNR سیگنال بازسازی شده را می توان بر اساس نقطه تقسیم بهبود بخشید. در همین حال، نویز بازسازی شده را می توان به عنوان نویز پس زمینه مغناطیسی که تقریباً دارای توزیع نویز گوسی است، در نظر گرفت [۷]. نویز بازسازی شده می تواند برای به روزرسانی پارامترهای PDF نویز در زمان واقعی به کار برده شود. بنابراین، روش پیشنهادی نه تنها مشکل به روزرسانی PDF نویز مغناطیسی محیط در روش ME را حل می کند، بلکه احتمال آشکارسازی اختلال مغناطیسی ضعیف را نیز بهبود می بخشد.

مراحل روش پیشنهادی به قرار زیر است:

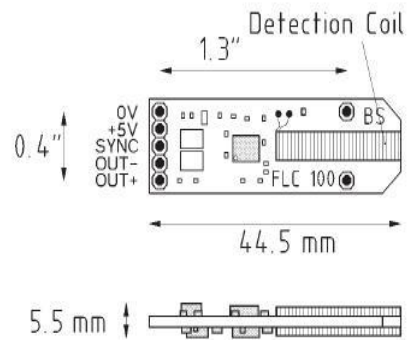
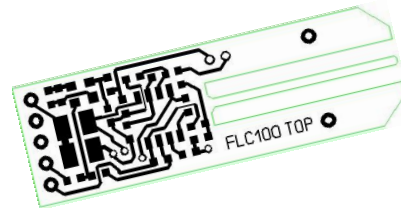
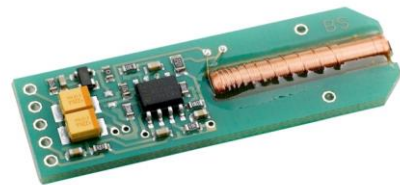


شکل (۴). مدار شماتیک و چاپی حسگر FLC-100

۲-۳- نتایج آزمایش: سیگنال مغناطیسی مصنوعی در شکل (۵) به نمایش درآمده است. همان‌طور که دیده می‌شود، سیگنال اختلال مغناطیسی به طور کامل در نویز مغناطیسی مدفون شده است.

نمونه واقعی نویز مغناطیسی در تالاب و حوضچه اسکله بندر انزلی که نویز مغناطیسی محیطی پایینی دارد، به دست آمده است. دامنه میدان مغناطیسی تقریباً 56000 nT محاسبه گردید. سیگنال اختلال مغناطیسی توسط یک هدف مغناطیسی زیرسطحی شبیه‌سازی شده، تولید گردید. هدف در موازات محور x با سرعت 8Km/h از نقطه‌ای به مختصات (-200,-35,-3) شروع به حرکت کرده و در نقطه (-200,-35,-3) به حرکت خود خاتمه می‌دهد. ممان مغناطیسی هدف در طول حرکت بدون تغییر فرض شده است.

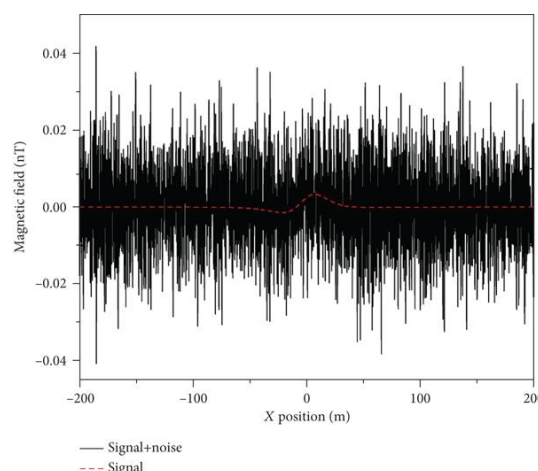
بزرگی ممان لحظه‌ای هدف فرضی، $30Am^2$ و بردار یکه در امتداد محور x ، (-0/65,-0/75,-0/25) است. اختلال مغناطیسی می‌تواند توسط شبیه‌سازی به دست آید.



شکل (۳): مغناطیس سنج FLC100 طراحی و ساخته شده مورد استفاده برای آزمایش

(۲) SNR ورودی را می‌توان توسط IMF‌های سیگنال بازسازی شده، بهبود بخشید. در مقایسه با SNR سیگنال اصلی با -10 dB، SNR سیگنال بازسازی شده به 8 dB بهبود یافته است. علاوه، زمان کل به‌روزرسانی پارامترهای PDF نویز حدود 0.75 ثانیه به‌دست آمده است.

به‌منظور ارزیابی اثربخشی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی مونت کارلو انجام شد. در این شبیه‌سازی، هدف شبیه‌سازی شده مشابه آزمایش انجام‌گرفته، به موازات محور X و با سرعت ثابت 8 Km/h و در مختصات $(-200, 200)$ m در حال حرکت است. اندازه ممان مغناطیسی هدف 30 Am² و جهت حرکت هدف به‌طور تصادفی و متغیر است.



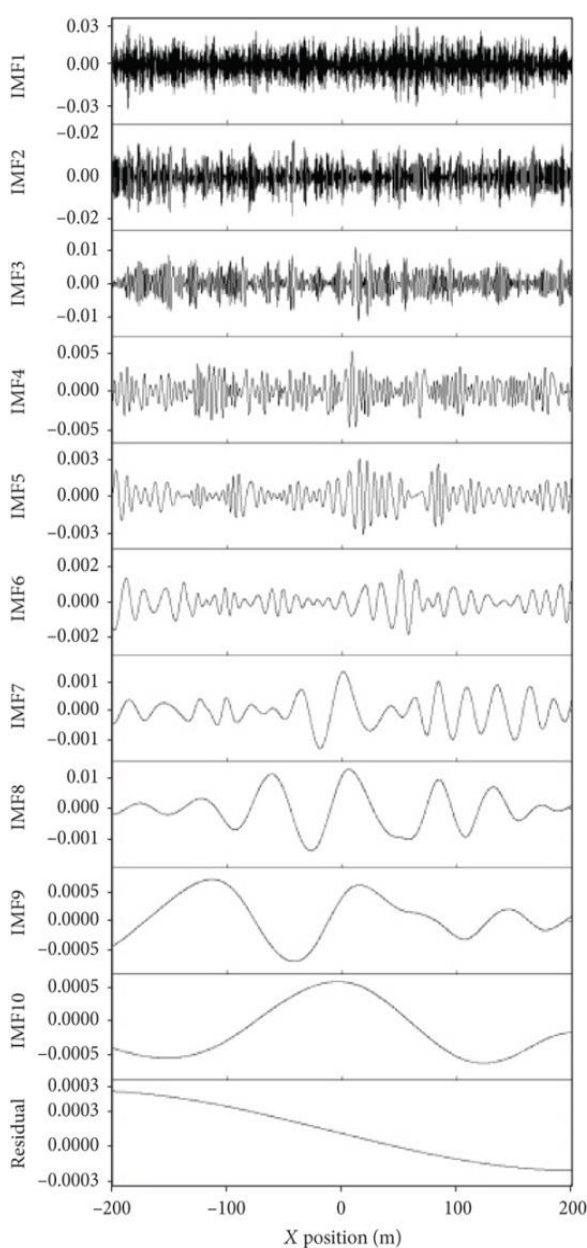
شکل (۵). سیگنال مصنوعی میدان مغناطیسی مدفون در نویز مغناطیسی

SNR سیگنال مصنوعی تقریباً -10 dB است. روش EMD-ME به سیگنال مصنوعی اعمال شده است و توسط EMD به مجموعه‌ای از IMFها که در شکل (۶) نشان داده شده است، تجزیه شده است. از شکل (۶) می‌توانیم ببینیم که IMFهای متفاوت، مقیاس‌های زمانی متفاوتی از سیگنال میدان مغناطیسی نشان می‌دهند. با توجه به فرمول (۲)، نقطه تقسیم $h=5$ است. بنابراین، IMF1 الی 5 نشان‌دهنده اجزای فرکانس بالا هستند که در آن انرژی اصلی نویز نهفته است. IMF6 تا باقیمانده، نشان‌دهنده اجزای فرکانس پایین است که در آن انرژی اصلی سیگنال قرار دارد. بر اساس IMFها، سیگنال اختلال مغناطیسی بازسازی شده و نویز مغناطیسی بازسازی شده در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است.

پس از بازسازی، یک PDF تقریبی از نویز مغناطیسی توسط نویز مغناطیسی بازسازی شده به‌دست آمده است. پارامترهای PDF نویز توسط نویز بازسازی شده به‌روزرسانی شده است. ویژگی آنتروپی سیگنال بازسازی شده را می‌توان توسط PDF نویز محاسبه کرد. خروجی مدل‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. دیده می‌شود که ناهنجاری مغناطیسی به‌طور آشکار با روش پیشنهادی آشکار شده است. علاوه بر این، روش سنتی ME به سیگنال مصنوعی اعمال شد. خروجی روش ME در شکل (8a) نشان داده شده است. با استفاده از این نتایج، عملکرد آشکارسازی روش پیشنهادی در SNRهای پایین، بهبود قابل توجهی نسبت به روش ME سنتی دارد.

در مقایسه با روش سنتی ME، دو مزیت عمده برای روش پیشنهادی در آشکارسازی ناهنجاری‌های ضعیف مغناطیسی وجود دارد:

(۱) PDF تقریبی نویز می‌تواند در زمان واقعی توسط نویز مغناطیسی بازسازی شده، به‌روزرسانی شود. که این کار مشکل به‌روزرسانی PDF نویز مغناطیسی در مورد تغییرات هدف متحرک و سکوی متحرک مغناطیسی‌سنج را حل می‌کند.



شکل (۶). IMFهای حاصل از سیگنال مصنوعی

در جدول (۱)، عملکرد روش برای CPAهای مختلف آورده شده است. همان طور که از جدول مشخص است، دقت آشکارسازی برای CPAهای کمتر از ۲۵ متر، ۱۰٪ است. به محض افزایش CPA، دقت آشکارسازی به ترتیبی که در جدول آمده است، کاهش می یابد.

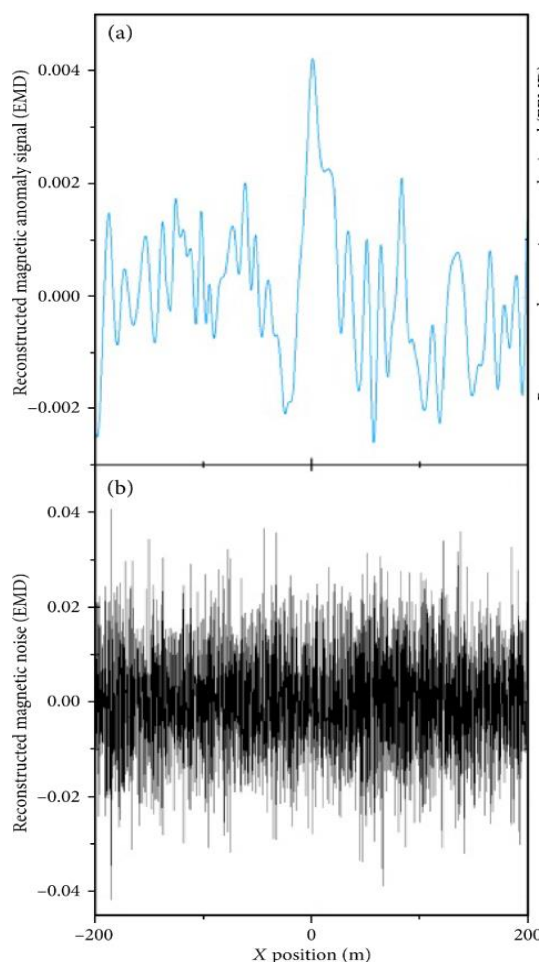
جدول (۱): کار آبی روش آشکارسازی پیشنهادی

| CPA (نزدیک ترین فاصله همسایگی) | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----|------|------|------|
| * | $P_y = 20m$ | $P_y = 25m$ | $P_y = 30m$ | $P_y = 35m$ | | | | |
| کار آبی روش MED-ME | ACC%-Time | ACC%-Time | ACC%-Time | ACC%-Time | | | | |
| | ۱۰۰ | ۰/۱۷ | ۱۰۰ | ۰/۱۳ | ۹۱ | ۰/۱۲ | ۷۵/۴ | ۰/۱۱ |

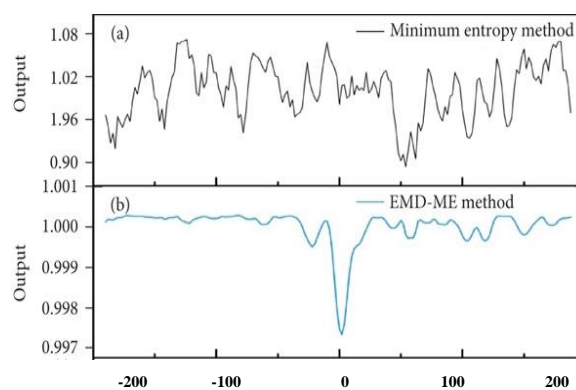
۴- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش ترکیبی EMD و ویژگی حداقل آنتروپی پیشنهاد شد تا بتواند عملکرد آشکارسازی اختلال مغناطیسی با SNR پایین را بهبود بخشد. در این روش داده های خام مغناطیسی توسط EMD پردازش می شوند و IMFها به دست می آیند. با توجه به خواص IMF، نویز مغناطیسی بازسازی شده برای به روزرسانی پارامترهای PDF نویز استفاده می شود. سیگنال مغناطیسی بازسازی شده برای استخراج ویژگی های آنتروپی ناهنجاری مغناطیسی با استفاده از PDF به روزرسانی شده، استفاده می شود. هر زمان که ویژگی آنتروپی به زیر حد آستانه سقوط کند، ناهنجاری مغناطیسی تشخیص داده شده و آشکار می گردد. در مقایسه با روش سنتی ME، ویژگی آنتروپی استخراج شده توسط روش پیشنهادی، واضح تر و مفیدتر برای آشکارسازی اختلال های مغناطیسی ضعیف است و زمان اجرای این روش هم پایین و حدود ۰/۱۵ ثانیه است. برای CPAهای کمتر از ۲۵ متر، دقت آشکارسازی ۱۰٪ بوده و با افزایش CPA، احتمال آشکارسازی کمتر می شود.

مزیت مهم روش تجزیه حالت تجربی که در این مقاله از آن استفاده شده است نسبت به روش های دیگر مانند فیلتر کردن، تجزیه و تحلیل مؤلفه های مستقل و وابسته، شبکه های عصبی و فیلترهای تطبیقی، این است که برای هر نوع سیگنال قابل اعمال است. از آنجایی که این روش فقط بر اساس خواص ذاتی محیط عمل جداسازی را انجام می دهد و مفسر هیچ گونه نقشی در آن ندارد، و همچنین، محاسبات مربوط به آن، نیاز به هیچ گونه آشنایی قبلی از مقادیر سیگنال ندارد و پردازش داده ها کاملاً به صورت خودکار صورت می پذیرد، از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است.



شکل (۷). مقایسه روش پیشنهادی با روش حداقل آنتروپی سنتی خروجی مدل، (a) روش حداقل آنتروپی، (b) روش EMD و حداقل آنتروپی



شکل (۸). سیگنال اختلال مغناطیسی بازسازی شده (شکل بالا) و نویز مغناطیسی بازسازی شده (شکل پایین) بر مبنای IMFهای روش EMD بر اساس معیار نیمین-پیرسون [۲۱]، مقدار آستانه ۰/۹۹ و نرخ هشدار کاذب، ۳/۴٪ و بر مبنای نویز واقعی تنظیم شد. نزدیک ترین فاصله همسایگی^۱ (CPA)، از سنسور مغناطیسی و مسیر حرکت هدف به منظور ارزیابی عملکرد روش، تغییر کرد که

^۱ Closest Proximity Approach

۵- مراجع

- [12] Y. Tang, Z. Liu, M. Pan et al., "Detection of magnetic anomaly signal based on information entropy of differential signal," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 15, no. 4, pp. 512–516, 2018.
- [13] H. Zhou, Z. Pan, and Z. Zhang, "Magnetic anomaly detection with empirical mode decomposition trend filtering," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E100.A, no. 11, pp. 2503–2506, 2017.
- [14] B. Ginzburg, L. Frumkis, and B. Z. Kaplan, "Processing of magnetic scalar gradiometer signals using orthonormalized functions," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 102, no. 1-2, pp. 67–75, 2002.
- [15] L. Fan, C. Kang, H. Hu et al., "Gradient signals analysis of scalar magnetic anomaly using orthonormal basis functions," *Measurement Science and Technology*, 2020.
- [16] A. Sheinker, A. Shkalim, N. Salomonski, B. Ginzburg, L. Frumkis, and B.-Z. Kaplan, "Processing of a scalar magnetometer signal contaminated by $1/f$ α noise," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 138, no. 1, pp. 105–111, 2007.
- [17] S. Liu, J. Hu, P. Li et al., "Magnetic anomaly detection based on full connected neural network," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 198–206, 2019.
- [18] H. Zhao, J. Zheng, W. Deng, and Y. Song, "Semi-supervised broad learning system based on manifold regularization and broad network," *IEEE Transactions on Circuits and Systems, Regular Papers*, vol. 67, no. 3, pp. 983–994, 2020.
- [19] W. Deng, H. Liu, J. Xu, H. Zhao, and Y. Song, "An improved quantum-inspired differential evolution algorithm for deep belief network," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020.
- [20] S. Nalband, A. Prince, and A. Agrawal, "Entropy-based feature extraction and classification of vibroarthrographic signal using complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise," *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 350–359, 2018.
- [21] C. Wan, M. Pan, Q. Zhang, D. Chen, H. Pang, and X. Zhu, "Performance improvement of magnetic anomaly detector using Karhunen-Loeve expansion," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 11, no. 5, pp. 600–606, 2017.
- [22] M. Jafari Moghadam, M. Aghababaei, "Design and Construction Laboratory Sample of a Magnetic Anomaly Detector (MAD)," Master's thesis, Faculty of Electrical and Electronics, Imam Khomeini University of Marine Sciences, Nowshahr, summer 2015 (in Persian).
- [1] S. L. Tantum, Y. Yu, and L. M. Collins, "Bayesian mitigation of sensor position errors to improve unexploded ordnance detection," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 103–107, 2008.
- [2] Z. Guo, D. Liu, Q. Pan, Y. Zhang, Y. Li, and Z. Wang, "Vertical magnetic field and its analytic signal applicability in oil field underground pipeline detection," *Journal of Geophysics and Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 340–350, 2015.
- [3] J. A. Baldoni and B. B. Yellen, "Magnetic tracking system: monitoring heart valve prostheses," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 6, pp. 2430–2432, 2007.
- [4] D. Liu, X. Xu, C. Huang et al., "Adaptive cancellation of geomagnetic background noise for magnetic anomaly detection using coherence," *Measurement Science and Technology*, vol. 26, no. 1, 2015.
- [5] J. Ge, S. Wang, H. Dong et al., "Real-time detection of moving magnetic target using distributed scalar sensor based on hybrid algorithm of particle swarm optimization and gauss-newton method," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 18, pp. 10717–10723, 2020.
- [6] C. Wan, M. Pan, Q. Zhang, D. Chen, H. Pang, and X. Zhu, "Performance improvement of magnetic anomaly detector using karhunen-loeve expansion," *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 11, no. 5, pp. 600–606, 2017.
- [7] A. Sheinker, N. Salomonski, B. Ginzburg, L. Frumkis, and B.-Z. Kaplan, "Magnetic anomaly detection using entropy filter," *Measurement science and technology*, vol. 19, no. 4, 2008.
- [8] A. Sheinker, A. Shkalim, N. Salomonski, B. Ginzburg, L. Frumkis, and B.-Z. Kaplan, "Processing of a scalar magnetometer signal contaminated by $1/f$ noise," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 138, no. 1, pp. 105–111, 2007.
- [9] A. Sheinker, B. Ginzburg, N. Salomonski, P. A. Dickstein, L. Frumkis, and B.-Z. Kaplan, "Magnetic anomaly detection using high-order crossing method," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 4, pp. 1095–1103, 2012.
- [10] C. Wan, M. Pan, Q. Zhang, F. Wu, L. Pan, and X. Sun, "Magnetic anomaly detection based on stochastic resonance," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 278, pp. 11–17, 2018.
- [11] L. Fan, X. Kang, Q. Zheng et al., "A fast linear algorithm for magnetic dipole localization using total magnetic field gradient," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 1–1038, 2017.