

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205238

基于相似性度量的磁异信号匹配检测算法^{*}

刘一飞¹ 张 宁¹ 赵鹤达² 徐 磊¹ 林朋飞³

(1. 海军工程大学兵器工程学院 武汉 430033; 2. 中国人民解放军 91977 部队 北京 100000;
3. 海军大连舰艇学院水武与防化系 大连 116000)

摘 要:针对现有的磁异目标差值匹配检测算法在低信噪比下效果较差的问题,提出了一种基于相似性度量的匹配检测算法,通过构建衡量序列局部相似性的函数对实时磁异信号和背景场信号进行匹配处理,再利用小波包去噪进一步提高信噪比,最后将处理后的信号输入到 OBF 检测器中完成目标实时检测。研究结果表明在虚警率为 0.42% 下当输入信号信噪比为-9 dB 时,该算法的检测率仍在 90% 左右,其在低信噪比下的检测效果明显优于差值匹配检测。

关键词: 磁异信号;匹配检测;相似性度量;小波包去噪;正交基函数

中图分类号: TP274;TN911. 23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Matching detection algorithm for magnetic anomaly signal based on similarity measure

Liu Yifei¹ Zhang Ning¹ Zhao Heda² Xu Lei¹ Lin Pengfei³

(1. Academy of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. Unit 91977 of PLA, Beijing 100000, China; 3. Department of Hydropower and Chemical Defense,
Dalian Naval Academy, Dalian 116000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing difference matching detection algorithm of magnetic anomaly targets has poor effect under low SNR, a matching detection algorithm based on similarity measure is proposed. The similarity function is used to match the real-time signal and the background field signal, then the wavelet packet denoising is used to further improve the SNR. Finally, the processed signal is input into the OBF detector to complete the real-time target detection. The research indicates that when the false alarm rate is 0.42%, and the SNR of the input signal is -9 dB, the detection rate of the algorithm is still around 90%, and its detection effect under low SNR is obviously better than that of difference matching detection.

Keywords: magnetic anomaly signal; matching detection; similarity measure; wavelet packet de-noising; orthogonal basis functions

0 引 言

铁磁性物体受地磁场磁化产生附加磁场从而对周围空间磁场产生扰动,通过观测这种扰动实现目标检测与定位的技术称作磁异探测^[1]。航空磁测是磁异探测的主要形式之一,其扫描区域广,受自然干扰小,机动能力强,被广泛应用于反潜侦查、地质勘探等领域^[2]。相比背景磁场,航空磁测中目标磁异常十分微弱,磁探仪本底噪声、平台背景磁场干扰、海洋环境磁场等干扰增大了目标

检测难度。国内外专家在提高弱磁异常检测能力上做了许多尝试。Ginzbug 首次提出可以用一组标准正交基函数来准确描述磁偶极子信号^[3],但是该方法只适用于高斯白噪声背景。Miao 等^[4]提出了一种基于快速收敛小波神经网络的 OBF 检波器,改善了 OBF 检测对非高斯噪声的适应性。文献[5]设计了一种用于磁异常检测的深度学习框架,提高了复杂环境噪声下的目标检测率。

磁异信号的时频特征、磁矩特征等是现有方法检测目标的主要依据^[6]。然而,海底磁性岩石、沉船等类目标干扰表现出的特征与目标信号十分相似,在缺乏先验信

息的情况下难以区分,容易造成虚警。针对此问题,海军工程大学某研究团队提出了水下目标磁异匹配探测方法^[7-8]。目前对该技术的研究多集中在高精度地磁基准图的构建上,而对匹配检测算法的研究较少。现有研究中通常将探测获取的实时磁异信号与从地磁基准图中提取出的背景场信号(后文中提到的实时信号与背景场信号均指磁异常信号)匹配相减后再利用差值信号的时域特征进行目标检测,其在低信噪比情况下效果较差。

为了改善磁异匹配检测性能,本文提出了一种基于相似性度量的匹配检测算法。当有目标存在时,通过相似性度量算法进行匹配分析以还原目标信号,滤波后再利用正交基函数完成目标检测。

1 磁异目标匹配探测原理

匹配探测最早应用于水声领域^[9],但声学环境的随机性、时变性常导致匹配模型与实际环境失配,影响探测效果。相比之下,海洋磁环境更为稳定,多数类目标干扰的空间分布长期不变,且飞行器在海区要域频繁的训练、巡逻为地磁基准图的构建提供了数据支撑。磁异匹配探测是通过比对探测实时信号与地磁基准图上相应背景场信号之间的差异实现的。如图 1 所示为该方法的流程图。通过测量飞行获取某高度部分测点磁异数据,利用空间插值、位场延拓构建不同高度平面地磁基准图;根据惯导系统提供的实时位置信息从地磁基准图上提取相应轨迹的背景场数据,与实时信号进行匹配处理、目标检测。

该方法关键技术涉及 3 方面:1) 磁场数据的准确、实时获取;2) 高精度地磁基准图的制备;3) 匹配检测算法的开发。经过数十年的发展,航空磁探仪的性能和背景干扰补偿精度已基本可以满足水下磁异目标探测需

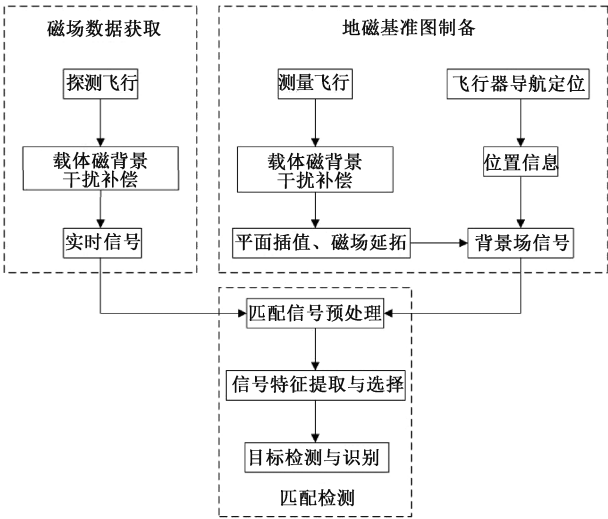


图 1 磁异匹配探测技术流程

Fig. 1 Flow chart of magnetic anomaly matching detection technology

求^[10];在地磁基准图制备方面,以 Kriging 法、反距离加权法为代表的插值算法应用较广^[11],大连舰艇学院、国防科大等单位利用微分进化等方法提高了磁场向下延拓的稳定性^[12-13];匹配检测算法包含匹配信号预处理(匹配分析、滤波等)、特征提取、目标检测,相关研究较少。本文研究了一种基于相似性度量的磁异信号匹配检测算法。

2 基于相似性度量的匹配检测算法

本文提出的磁异信号匹配检测算法分为 3 个步骤:1) 利用相似性度量算法对实时信号及相应背景场信号进行匹配处理;2) 小波包阈值去噪;3) 正交基函数检测,流程如图 2 所示。

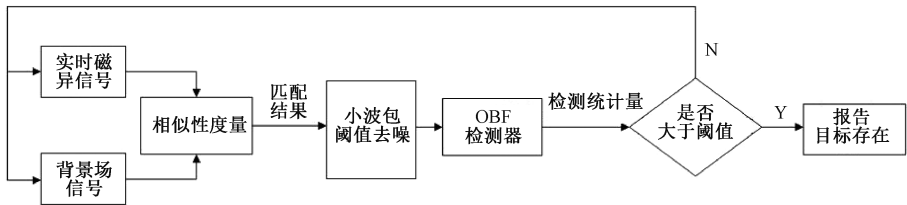


图 2 匹配检测算法流程

Fig. 2 Flow chart of matching detection algorithm

2.1 基于相似性度量的磁异信号匹配处理方法

利用相似性度量算法对实时信号及相应背景场信号进行匹配处理,结果中相似程度较差的窗口即数据不匹配区域,这一信息可以用来检测、定位目标。

实时磁异信号是一个持续时间有限的非周期含噪信

号,设航空磁探过程中,沿某一测线获取的实时磁异信号记为 $\mathbf{X}^{current}$,如式(1)所示。根据飞行轨迹从地磁基准图中提取出的背景场信号记为 $\mathbf{X}^{background}$,如式(2)所示。

$$\mathbf{X}^{current} = [x_1^{current}, x_2^{current}, \cdots, x_M^{current}]^T \tag{1}$$

$$\mathbf{X}^{background} = [x_1^{background}, x_2^{background}, \cdots, x_M^{background}]^T \tag{2}$$

若直接计算每个匹配点之间的相似度,则结果受噪声的影响较大,因此通过一个固定宽度的移动窗对信号进行平滑处理。设移动窗大小(窗口中数据点数量)为 s ,步长为1,输入信号经移动窗转化为 $M-s+1$ 个子信号,如式(3)、(4)所示:

$$\mathbf{X}_i^{\text{current-sub}} = [x_i^{\text{current}}, \dots, x_{i+s-1}^{\text{current}}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{X}_i^{\text{background-sub}} = [x_i^{\text{background}}, \dots, x_{i+s-1}^{\text{background}}]^T \quad (4)$$

式中: i 表示窗口索引。

目前常用的相似性度量算法有欧氏距离法、编辑距离法、豪斯多夫距离法等。欧氏距离是一种整体的差异和,对噪声十分敏感。豪斯多夫距离在曲线走势不同时无法较好地判断相似性^[14]。编辑距离法通过将元素之间的距离量化为0和1来消除噪声影响,但这种处理方式容易忽略细节部分,导致判断结果不准确^[15]。文献[16]利用正交基分解系数结合编辑距离度量磁异信号相似性,提高了编辑距离法的抗噪能力,但实际应用中由于无法提前获知目标信息,需要通过不断遍历搜索才可能找到与输入信号相适配的波形,计算量大,算法的实时性较差。

相对熵是信息论中用来衡量任意两个随机变量之间局部相似性的方法。基于此,本文构建了一个相似度函数作为衡量信号之间局部相似性的测度。对于每个窗口 i ,实时信号和相应背景场信号之间的相似度函数定义为:

$$\text{SIM}(i) = \sum_{n=i}^{i+s-1} x_i^{\text{current}} \ln \frac{x_i^{\text{current}}}{x_i^{\text{background}}} = \sum_{k=1}^s \mathbf{X}_i^{\text{current-sub}}(k) \cdot \ln \frac{\mathbf{X}_i^{\text{current-sub}}(k)}{\mathbf{X}_i^{\text{background-sub}}(k)} \quad (5)$$

由定义可知该函数值的绝对值越小,信号间的相似程度越高;函数绝对值较大的窗口包含目标信息的可能性较大。

2.2 小波包阈值去噪

实时信号与背景场信号经过匹配处理后转换成由相似度函数表示的时间序列,为了提取更稳定的信号特征,需要对该序列进行滤波。鉴于小波分析在处理非平稳信号方面的优势,本文采用小波包阈值去噪^[17]。

小波包阈值去噪能够较好地保留信号局部特征,是一种更精细的去噪方法^[18]。磁异目标信号的能量主要集中在低频段幅值较大的小波包系数中;而噪声能量则分布在整个小波域,系数幅值较小。通过设定阈值可将噪声小波包系数置0并保留目标信号特征。小波包阈值去噪通常包含如下步骤^[19]:

1) 根据信号特征选择合适的小波基函数及分解层次,对原始信号进行小波包分解;

2) 利用阈值函数量化小波包系数,常用的阈值计算

方法为:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N} \quad (6)$$

式中: λ 为阈值; σ 为噪声信号均方差; N 为含噪信号分解后得到小波包系数的个数。

3) 根据阈值量化后的小波包系数重构信号。

2.3 OBF 检测算法

航空磁测过程中,由于探测距离远,通常大于两倍目标尺寸,目标磁场可等效为磁偶极子产生的磁场^[20]。OBF检测是将磁偶极子模型分解为3个标准正交基底的线性组合,利用背景噪声与正交基底不相关的特性,对各基底系数进行平方求和,并将结果与门限值进行比较从而实现目标检测。

根据文献[21],对于某磁异信号序列 S ,可用3个正交基底的线性组合表示,即:

$$S = \frac{\mu_0 M}{4\pi R_0^3} \sum_{i=1}^3 a_i f_i(w) \quad (7)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, M 为目标磁矩, R_0 为目标到磁探仪运动轨迹的最短路径(CPA), $w = D/R_0$, D 为磁探仪与CPA点间的距离, a_i 为基函数系数。 $f_i(w)$ 为经过施密特标准正交化的基函数,其计算公式如式(8)所示。

$$\begin{cases} f_1(w) = \sqrt{\frac{24}{5\pi}} \frac{1 - \frac{5}{3}w^2}{(1 + w^2)^{\frac{5}{2}}} \\ f_2(w) = \sqrt{\frac{128}{3\pi}} \frac{w^2}{(1 + w^2)^{\frac{5}{2}}} \\ f_3(w) = \sqrt{\frac{128}{5\pi}} \frac{w}{(1 + w^2)^{\frac{5}{2}}} \end{cases} \quad (8)$$

由各基函数之间的正交性得:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_i(w) f_j(w) dw = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可得各基函数系数 a_i 的计算公式:

$$a_i = \left(\frac{\mu_0 M}{4\pi R_0^3} \right)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} f_i(w) S dw, i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

由于磁异信号是一段离散的时间序列,通常用一个长度为 $2k$ 的滑动窗口计算离散基函数系数 α_i ,如式(11)所示。

$$\alpha_i(m) = \sum_{j=-k}^k f_i(w_j) S(w_{m+j}) \Delta w, i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

式中: m 表示当前计算对应测量信号点的序号, $\Delta w = w_{j+1} - w_j$ 。基函数系数 α_i 一定程度上代表了磁测信号与磁异目标信号的相关程度,其数值较大的位置相关程度高,包含目标的可能性大,目标能量高。因此 α_i 的平方和可视为被测目标信号的能量,由此构建的检验统计量为:

$$E = \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 \quad (12)$$

航空磁探潜中的目标检测为双择检测,目标存在状态分别记为 H1 与 H0,其模型如下:

$$\begin{cases} H0: X = W \\ H1: X = S + W \end{cases} \quad (13)$$

式中: W 为噪声信号序列。

则 OBF 检测的判定规则为:

$$\begin{cases} E(X) \geq \beta, H1 \\ E(X) < \beta, H0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: β 为检测门限值。

OBF 检测滑动窗口的大小通常根据目标信号的有效持续时间 T_c 确定。 T_c 受载体相对速度 v , 采样时间 T_s 及最近点距离 (CPA) 影响, 一般根据经验公式 $T_c = 3 \times CPA / v$ 计算。

3 实验与结果分析

3.1 实测算例

本文利用国家海洋科学数据中心公布的编号为 j1020039M 磁测数据和磁偶极子模型仿真的潜艇信号对匹配检测算法进行验证。由于该磁测数据是测量船在海平面测得的, 为了更接近航空磁探实际情况, 把数据向上延拓 150 m 作为背景场数据。探测区域位于北纬 34. 19°, 东经 139. 40°, 当地地磁偏角约为 -7. 32°, 磁倾角约为 47. 63°。潜艇目标信号使用磁偶极子模型仿真产生, 位于沿测线方向距坐标零点 2 500 m 处。由于飞行器受气流影响会上下起伏, 设实际探测飞行高度为 $h = 150 + 5\sin(0. 005 \times 2\pi x)$ m, 将背景场数据、仿真目标信号和高斯白噪声叠加并根据高度 h 进行延拓得到实时信号。利用文献[8]中的差值匹配算法处理数据, 当目标磁异信号峰值为 0. 28 nT 时 (信噪比为 -15 dB), 其测试结果如图 3 所示。

对比图 3 (b) 与 (c) 发现, 相比于几百 nT 的背景磁异常, 目标信号十分微弱; 此外, 在测量误差及航迹起伏的影响下, 差值匹配算法极易造成目标信号削弱、干扰增强, 从而降低目标检测率, 因此采用相似性度量算法对信号进行匹配处理。

为了说明本文提出的相似性度量算法在匹配处理磁异信号方面的优越性, 将基于欧氏距离、Fréchet 距离、编辑距离的相似性度量算法与本文提出的算法进行比较分析。利用不同的相似性度量算法对同组背景场信号及实时信号进行匹配处理, 计算其相似度函数如图 4 所示。值得注意的是, 由于传统编辑距离法只能将元素之间的距离量化为 0 和 1, 在计算时往往会造成信号部分细节丢失, 因此这里利用文献[22]中方法对编辑距离进行了改进。

对比图 3 (d) 与图 4 发现, 相似性匹配处理能够在在一

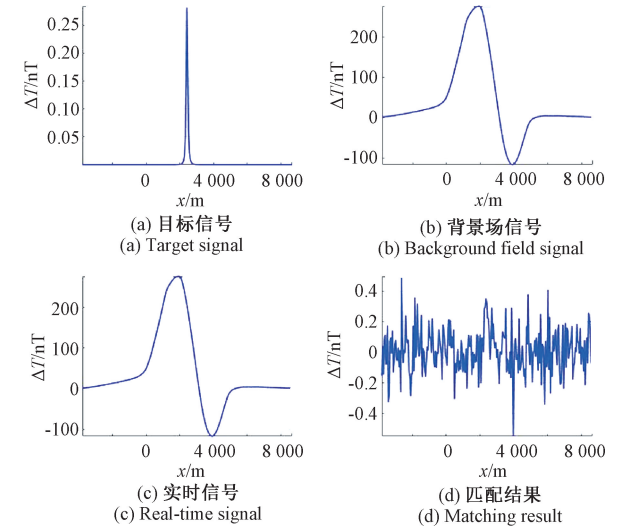


图 3 差值匹配测试结果
Fig. 3 Difference match test results

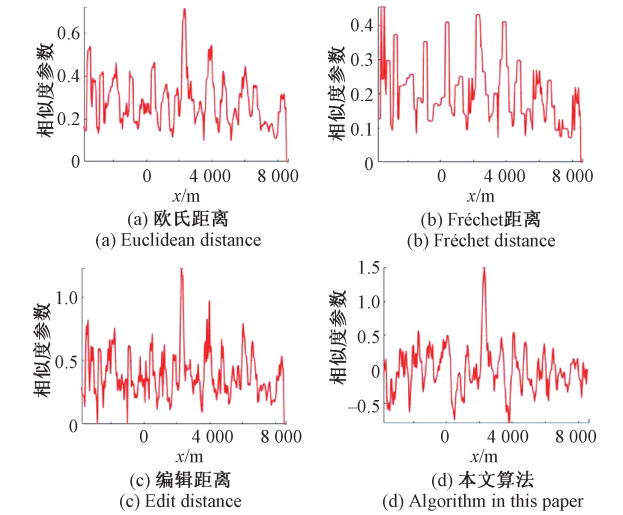


图 4 相似性度量匹配结果
Fig. 4 Similarity measure matching results

定程度上抑制噪声, 更好地还原目标信号; 从图 4 中可以看出, 4 种相似性度量算法中本文所提算法对波形的改善效果最佳, 目标位置处的信号波峰最明显。为了更直观地说明算法的有效性, 分别计算不同度量算法处理同组数据后的信噪比如表 1 所示。

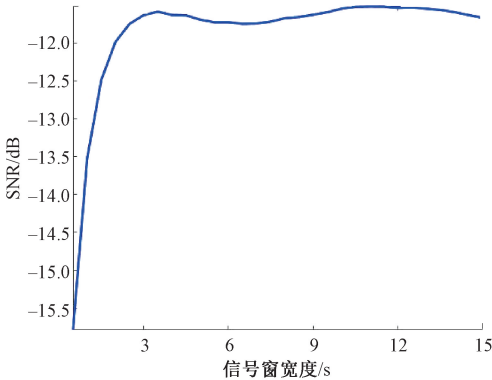
表 1 不同相似性度量算法信噪比

Table 1 SNR of different similarity measurement algorithms

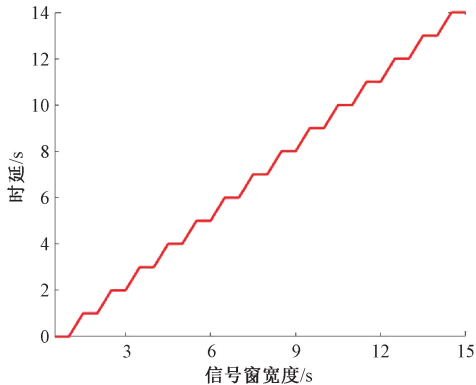
匹配算法	差值匹配	欧氏距离度量	Fréchet 距离度量	编辑距离度量	本文算法
信噪比/dB	-15	-13. 97	-14. 78	-14. 10	-9. 85
	-10	-8. 90	-9. 72	-8. 65	-3. 57
	-5	-4. 13	-4. 80	-4. 08	-0. 04

由表 1 可知,相比差值信号,利用本文所提算法进行相似性度量后信噪比提高了 5~7 dB;基于欧氏距离与编辑距离的度量算法信噪比提升约 1~2 dB,两种算法差距不大;Fréchet 距离度量算法对信噪比提升较小。欧氏距离是一种基于点的匹配度量算法,对噪声敏感;改进后的编辑距离仍是通过欧氏距离计算操作代价,且阈值的设定也会影响计算结果;Fréchet 距离通过遍历计算寻找使最大距离最小化的值,其结果易受局部变形较大点的影响。而本文提出的度量算法从熵的角度反映磁异信息,对噪声的鲁棒性较好。

在利用相似性度量算法对磁异信号匹配处理的过程中,平滑窗大小的选取对计算结果影响较大。当窗口较小时,时域分辨率较高,但对噪声敏感,结果易受瞬态干扰影响;当窗口较大时,算法的稳健性提高,但时延增大,目标定位不准确。因此最佳窗口大小的选取需综合考虑信噪比与时延变化。计算信噪比、时延与窗口沿时间轴方向宽度的对应关系如图 5 所示。



(a) 信噪比与平滑窗宽度关系
(a) The relationship between SNR and smoothing window width



(b) 时延与平滑窗宽度关系
(b) The relationship between delay and smoothing window width

图 5 平滑窗宽度的选取

Fig. 5 Selection of smoothing window width

由图 5 可知,随着窗口宽度的增大,信噪比逐渐提高,特别是在 0~3 s 的过程中,信噪比提升明显;而超过 3 s 后信噪比变化较小,但随着窗口宽度增加,时延不断

增大。综上,本文选取平滑窗时间宽度为 3 s。
利用 sym6 小波包对相似性匹配处理的输出值进行 3 层分解,通过式(6)计算阈值并选用硬阈值函数量化小波包系数,重构信号如图 6 所示。

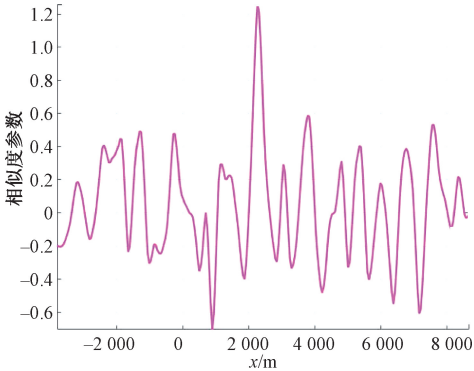


图 6 小波包去噪结果

Fig. 6 Wavelet packet denoising results

显然,小波包去噪后的信号相比图 4 结果更加平滑,目标波峰也更明显,说明该方法在抑制噪声的同时保留了目标信号特征。在航空匹配探测模型下,设定不同的信噪比条件,利用本文提出的匹配检测预处理方法处理,结果如表 2 所示。

表 2 不同信噪比数据处理结果

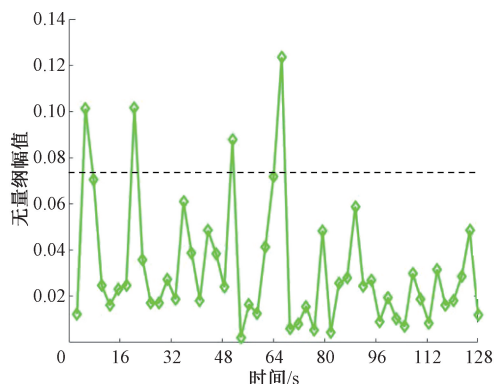
Table 2 Data processing results with different SNR (dB)

数据序列	差值信号信噪比	相似性度量 输出信噪比	小波包去噪后 信噪比
1	-15	-9.78	-5.12
2	-10	-4.15	-0.48
3	-5	-0.19	1.07
4	0	5.05	5.73
5	5	10.26	7.03

从表 2 中可以看出,基于相似性度量的匹配处理结果相比差值信号的信噪比有了明显提升,小波包去噪进一步抑制了噪声干扰;当输入信号信噪比较高时小波包去噪效果有所减弱,这是因为小波包系数阈值量化时造成了信息丢失,但这种情况基本不会对目标的检测结果产生影响。综上所述,本文提出的匹配检测预处理方法可为后续环节提供更高品质的信号,大大提高了匹配检测算法的稳健性。

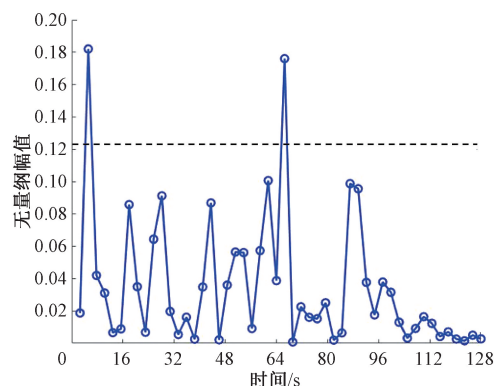
将 SNR=-15 dB 下的差值信号、小波包去噪后的差值信号及图 6 所示信号分别输入到 OBF 检测器中,得到能量信号 E 如图 7 所示。从中可以看出差值匹配-正交基函数检测下目标信号能量不明显,即使将去噪后的差值信号输入到 OBF 检测器中仍然无法准确检出目标;而相似性度量-正交基函数匹配检测下目标信号能量则更

明显且时延较小,通过门限可以准确地检测到目标,这表明了该算法抗噪能力更强,对目标的检测效果更好,证明了相似性度量相较于差值匹配的优越性。



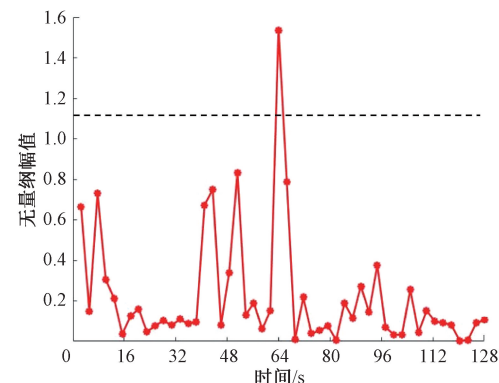
(a) 差值匹配-正交基函数检测结果

(a) Difference matching-orthogonal basis function detection results



(b) 差值匹配(滤波)-正交基函数检测结果

(b) Difference matching (filtering)-orthogonal basis function detection results



(c) 相似性度量-正交基函数检测结果

(c) Similarity measure-orthogonal basis function detection results

图 7 检测结果对比 (SNR=-15 dB)

Fig. 7 Comparison of detection results (SNR=-15 dB)

3.2 检测门限选择及性能评价

文献[23]指出,在航磁探测过程中,由于卫星、声呐等辅助手段可以有效地对虚警目标进行判别,磁探仪每小时小于等于 3 次虚警是可以接受的。根据实验条件,设定允许的虚警率为 0.42%,通过 N-P 准则计算不同信

噪比下的检测门限。采用蒙特卡洛方法对检测算法的性能进行分析,不同算法的输入信号相同,每种信噪比条件下仿真 1 000 次,得到检测算法的性能曲线如图 8 所示。

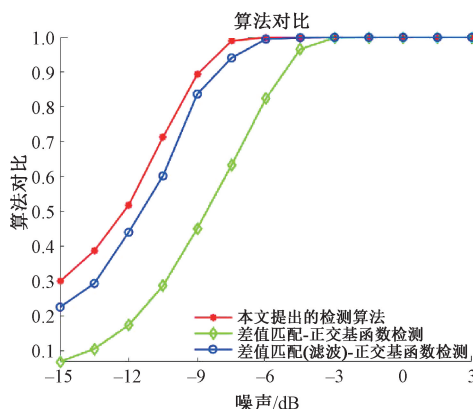


图 8 检测性能曲线

Fig. 8 Detection performance curve

可见,随着信噪比逐渐增大,3 种算法检测率均不断提高,与实际情况相符;当信噪比<-3 dB 时,差值匹配-正交基函数检测的检测率下降明显,信噪比为-9 dB 时,已基本无法区分目标和噪声,而应用本文所提算法计算的检测率仍在 90%左右;即使对差值信号进行去噪处理后再输入到 OBF 检测器中,其检测率仍然低于本文算法。

4 结 论

匹配检测是实现磁异目标匹配探测技术的关键,本文提出了一种基于相似性度量的匹配检测算法。该算法通过相似性度量对实时信号及相应背景场信号做匹配处理,再进行小波包阈值去噪,最后利用 OBF 检测器实现目标检测。实验结果表明,在虚警率为 0.42%、差值信号信噪比为-12 dB 条件下,本文提出的算法检测率仍在 50%以上,说明该算法抗噪能力较强,具有良好的弱磁检测能力;此外,该算法在低信噪比下的检测率均高于差值匹配(滤波)-正交基函数检测,说明该匹配检测算法具有更优的检测性能。

参考文献

- [1] DAMES P M, SCHWAGER M, SCHWAGER D. Active magnetic anomaly detection using multiple micro aerial vehicles[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016,1(1):153-160.
- [2] 刘继昊,李夕海,张莹,等.一种通用的地磁测量中载体干扰矢量补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11):112-118.

LIU J H, LI X H, ZHANG Y, et al. General

- components compensation method for vehicle-generated interference in geomagnetic field vector measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 112-118.
- [3] ZHAO Y, ZHANG J, LI J, et al. A brief review of magnetic anomaly detection[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(4): 042002.
- [4] MIAO C, DONG Q, HAO M, et al. Magnetic anomaly detection based on fast convergence wavelet artificial neural network in the aeromagnetic field [J]. Measurement, 2021, 176: 109097.
- [5] XU X, HUANG L, LIU X, et al. Deepmad: Deep learning for magnetic anomaly detection and denoising[J]. IEEE Access, 2020, 8: 121257-121266.
- [6] LIU S, CHEN Z, PAN M, et al. Magnetic anomaly detection based on full connected neural network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 182198-182206.
- [7] 杨振宇. 基于匹配场处理的水下目标识别技术研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2014.
- YANG ZH Y. Research on underwater target identification technique based on MFP [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2014.
- [8] 赵鹤达. 基于三维地磁基准图的磁性目标匹配探测方法关键技术研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2021.
- ZHAO H D. Key technology of magnetic target matching detection method based on 3D geomagnetic reference map[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2021.
- [9] LI K, FANG S. A new method for matched field localization based on two-hydrophone[J]. China Ocean Engineering, 2015, 29(1): 105-120.
- [10] 缪林良, 米洒洒, 王玮琳, 等. 航磁矢量测量的误差分析和补偿算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12): 15-23.
- MIAO L L, MI S S, WANG W L, et al. Error analysis and compensation algorithm research of aeromagnetic vector measure[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12): 15-23.
- [11] 李晨霖, 王仕成, 张金生, 等. 基于改进的 kriging 插值方法构建地磁基准图[J]. 计算机仿真, 2018, 35(12): 262-266.
- LI CH L, WANG SH CH, ZHANG J SH, et al. Construction of geomagnetic datum map based on improved kriging interpolation method [J]. Computer Simulation, 2018, 35(12): 262-266.
- [12] 刘强, 边刚, 殷晓冬, 等. 利用微分进化法确定海洋磁场向下延拓中的最优参数[J]. 地球物理学报, 2018, 61(8): 3278-3284.
- LIU Q, BIAN G, YIN X D, et al. Determination of optimum parameters using a differential evolution algorithm in downward continuation of the marine geomagnetic field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(8): 3278-3284.
- [13] 王泽, 陈棣湘, 刘中艳, 等. 一种改进的基于导数迭代的磁场向下延拓方法[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(1): 284-290.
- WANG Z, CHEN D X, LIU ZH Y, et al. An improved downward continuation method of magnetic field based on derivative iteration[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(1): 284-290.
- [14] 高孝杰, 简季, 戴晓爱, 等. 基于 Fréchet 距离的光谱曲线匹配应用分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(3): 408-414.
- GAO X J, JIAN J, DAI X AI, et al. Spectral curve matching application analysis analysis based on Fréchet distance [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(3): 408-414.
- [15] 周星星, 吉根林, 张书亮. 时空轨迹相似性度量方法综述[J]. 地理信息世界, 2018, 25(4): 11-18.
- ZHOU X X, JI G L, ZHANG SH L, et al. Overview of the similarity measurement methods for spatial-temporal trajectory[J]. Geomatics World, 2018, 25(4): 11-18.
- [16] 邱景, 欧津东, 谢冬, 等. 基于正交基函数-编辑距离的低信噪比下磁异常信号相似性度量方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(2): 745-753.
- QU J, OU J D, XIE D, et al. A similarity measurement method for magnetic anomaly signal under low signal-to-noise based on orthogonal basis function-edit distance[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(2): 745-753.
- [17] 余琼芳, 胡亚倩, 杨艺. 基于小波特征及深度学习的故障电弧检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 100-108.
- YU Q F, HU Y Q, YANG Y. Arc fault detection based on wavelet feature and deep learning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 100-108.
- [18] SUN J, XING H, WU J. Distributed sea clutter denoising algorithm based on variational mode decomposition[J]. Instrumentation, 2020, 7(3): 23-32.
- [19] 王志斌, 曹红伟, 刘佳佳. 基于小波包去噪与 EMD 的故障电弧检测算法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(6): 117-121.
- WANG ZH B, CAO H W, LIU J J. Research on fault arc detection algorithm based on wavelet packet de-noise and EMD decomposition[J]. Electrical Measurement &

- Instrumentation, 2019, 56(6):117-121.
- [20] 吴梦秋, 顾金良, 李建, 等. TMR 磁传感器的水下弹丸坐标测试技术研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 125-128.
- WU M Q, GU J L, LI J, et al. The realization of space coordinate test device for underwater flying object based on TMR magnetism sensor[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(24):125-128.
- [21] 杨勇. 基于正交基分解的磁性目标检测技术研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2015.
- YANG Y. The magnetic target detection based on orthonormalized functions decomposition[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2015.
- [22] 魏艳鸣, 田建立, 郭荣幸. 结合改进编辑距离与 SVM 的图像分类方法[J]. 电子技术应用, 2017, 43(8): 127-131.
- WEI Y M, TIAN J L, GUO R X. An image classification method by combining with improved edit distance and SVM[J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(8):127-131.
- [23] 万成彪. 磁异信号检测理论与方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- WANG CH B. Investigations on the theory and method of magnetic anomaly detection[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.

作者简介



刘一飞(通信作者), 2020 年于武汉理工大学获得学士学位, 现为海军工程大学硕士研究生, 主要研究方向为军用目标检测。

E-mail: Lyf1016505829@163.com

Liu Yifei (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2020. Now he is a M. Sc. candidate at Naval Engineering University. His main research interests include military target detection and recognition.