

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306507

# 基于卡亨南-洛维展开的修正 OBF 磁目标检测方法\*

邱伟成 张欣苗

(国防科技大学智能科学学院 长沙 410073)

**摘要:**针对磁异信号的检测通常会受到地磁噪声干扰的问题,在磁干扰补偿研究的基础上,提出一种基于卡亨南-洛维展开的修正 OBF 磁目标检测方法。首先构建磁干扰的椭球拟合模型,通过求解拟合模型的系数实现对干扰的总体补偿,补偿精度约 30 nT;再利用卡亨南-洛维展开对 OBF 检测算法进行修正,提升有色背景噪声下的信号检测能力;最后开展无人机探测磁目标的实验研究,实验结果表明,修正的 OBF 检测算法具有更佳的效果,尤其是针对低信噪比目标的检测优势明显,信噪比增益提升约 2 dB。

**关键词:**磁干扰补偿;磁异目标探测;OBF 算法;目标检测

**中图分类号:** TP274; TN911.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Modified OBF method based on Karhuen-Loeve expansion for magnetic target detection

Qiu Weicheng Zhang Xinmiao

(College of Intelligent Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the detection of the magnetic anomaly signal is usually interfered by the geomagnetic noise, a modified OBF magnetic target detection method based on the Karhuen-Loeve expansion is proposed, after the research of the magnetic interference compensation. Firstly, the ellipsoid fitting model of the magnetic interference is built, and the compensation of the interference is realized by solving the coefficients of the fitting model. The compensation ability is about 30 nT. Then, the OBF detection algorithm is modified by the Karhuen-Loeve expansion to improve the detectivity under the colored background noise. Finally, the experimental research on the detection of magnetic targets by an unmanned aerial vehicle is carried out. The experimental results show that the modified OBF detection algorithm presents better detectivity, especially for the detection of low SNR targets, and the SNR gain is improved by about 2 dB.

**Keywords:** magnetic interference compensation; magnetic target detection; OBF algorithm; object detection

## 0 引言

磁异目标探测技术采用磁传感器对固定或者移动目标产生的磁异信号进行非接触式测量,测量信号经过数据处理,精准获取目标信息,该技术具有无源被动探测、隐蔽性能好、抗干扰能力强和保密性高等优点。磁异目标的准确探测主要需要解决两个方面的问题:磁场干扰补偿<sup>[1-2]</sup>和微弱磁异信号检测技术<sup>[3-5]</sup>。

基于匹配滤波原理发展的正交基函数(orthonormal

basis function, OBF)算法是目前微弱磁异信号检测的有效手段<sup>[6-8]</sup>。2002年, Boris 等<sup>[9]</sup>将磁目标产生的磁异信号等效为磁偶极子模型,然后将磁异信号分解成3个标准正交基函数的线性组合,通过求解基函数的系数得到磁异信号在基函数空间上的能量函数,显著地提高了信噪比。但该方法只能处理高斯白噪声,难以处理有色噪声。针对 OBF 方法在有色噪声下检测性能下降的问题, Sheinker 等<sup>[10]</sup>提出首先对信号进行白化滤波,然后再进行 OBF 检测,提升了对有色噪声下信号的检测效果,但白化滤波器的阶数要求较高。海军工程大学的张坚

等<sup>[3-5]</sup>通过构建 FIR 滤波器高斯化非高斯噪声、利用小波分解算法分离高频噪声、利用 BP 神经网络滤除噪声等方法处理环境噪声,再通过 OBF 检测算法对磁异信号进行检测。反映出目前 OBF 检测大都是在降噪处理的基础上<sup>[6-8,11-12]</sup>,采用 3 个标准正交基函数进行信号拟合,难以适用存在地磁脉动等低频干扰磁噪声下的信号检测。本文围绕这个问题,利用卡亨南-洛维展开对 OBF 检测算法进行修正,有效提升了在这一情况下磁目标检测的效果。

## 1 椭球拟合磁干扰补偿

将无人机的磁场干扰和传感器的制造误差统称为测量过程中的转向误差。设磁场的理论值为  $h_t$ , 传感器测量后的输出值为  $h_s$ 。由于转向误差的存在,无人机在地磁场波动较小的区域内运动时,磁场理论值基本不变的情况下,测量的输出值仍会有波动。椭球拟合模型认为保持传感器位置不变,随着传感器姿态的旋转,理想的磁场矢量  $h_t$  的顶点应构成一个球体;但转向误差会使  $h_s$  的顶点变形为椭球体。从理论上将椭球模型表示如下<sup>[13]</sup>:

$$h_s = K_d K_p K_s h_t + B_e = K_e h_t + B_e \quad (1)$$

式中:  $K_d$  表示传感器 3 个测量轴的刻度因子误差,为三阶对角矩阵;  $K_p$  表示测量轴两两之间并不严格正交所引起的非正交误差;  $K_s$  是无人机上软磁材料产生磁场干扰的综合;  $B_e$  是传感器的零漂误差和硬磁材料产生的磁场偏差的合并误差。从输出值推导的磁场理论值如下:

$$h_t = K_c (h_s - B_e) \quad K_c = K_e^{-1} \quad (2)$$

保持传感器位置不变,可以认为在测量过程中,该位置磁场强度的大小和方向都不发生变化。传感器做姿态变换时,测得的磁场矢量应该位于一个已知球体上,即满足等式:

$$\|h_t\|^2 = H^2 \quad (3)$$

其中,  $H$  是传感器所在位置处的磁场强度。整理可得:

$$h_s^T A h_s - 2b^T A h_s + b^T A b = H^2 \quad (4)$$

式中:  $A = K_c^T K_c$ ,  $b = B_e$ 。椭球拟合假设传感器输出值的数据轨迹为椭球体,即式(4)表示关于向量  $h_s$  的椭球方程。求解椭球的拟合参数,并反推出理论上的球体模型,即可实现对转向误差的补偿,即传感器的误差补偿问题转变为椭球拟合问题。

## 2 基于 OBF 的磁目标检测

假设铁磁性目标以恒定速度  $v$  沿直线轨迹运动,同时假设目标磁矩的大小和方向在传感器附近是不变的。构造笛卡尔坐标系,如图 1 所示,以传感器所在位置为原

点,  $\hat{x}$  是以原点为起点,与磁异目标移动轨迹平行的单位向量,  $\hat{y}$  是以原点为起点,与目标移动轨迹垂直的单位向量,  $\hat{z}$  是根据右手坐标系确定的单位向量。  $v_M, v_T$  是磁异目标的磁矩  $M$  和地磁场  $T$  分别与  $z$  轴正方向形成的夹角,称为磁倾角;在与目标距离远大于三倍目标最大尺寸的位置,通常可以将目标产生的磁场等效为磁偶极子产生的磁场<sup>[14-16]</sup>。磁异常信号实为目标产生的感应磁场在地磁场方向上的投影:

$$B_m \cong \frac{\mu_0}{4\pi T} \left[ \frac{3(M \cdot r)(r \cdot T)}{r^5} - \frac{(M \cdot T)}{r^3} \right] \quad (5)$$

式中:  $r$  为目标与传感器之间的距离,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$  为真空磁导率。

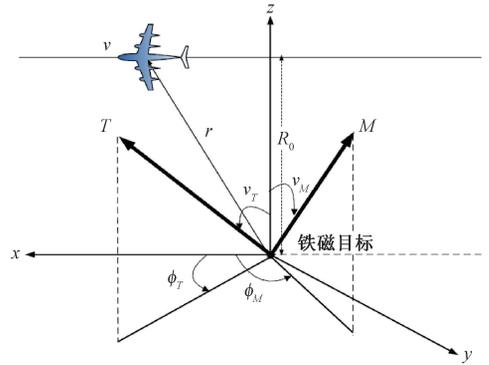


图 1 磁异信号的磁偶极子模型

Fig. 1 Magnetic dipole model of magnetic anomaly signal

### 2.1 目标信号的标准 OBF 分解

根据图 1 磁偶极子模型,可以得到:

$$M = |M| (\sin v_M \cos \phi_M \hat{x} + \sin v_M \sin \phi_M \hat{y} + \cos v_M \hat{z}) \quad (6)$$

$$T = |T| (\sin v_T \cos \phi_T \hat{x} + \sin v_T \sin \phi_T \hat{y} + \cos v_T \hat{z}) \quad (7)$$

目标以恒定速度沿直线运动时,运动轨迹可以表示为时间  $t$  的函数:

$$r(t) = v \cdot t \cdot \hat{x} + R_0 \cdot \hat{z} \quad (8)$$

在  $t=0$  时,磁力仪经过与目标距离最近的位置,该距离为  $R_0$ 。在这种情况下,可以用一个简单的无量纲量  $w$  来描述目标的位置。从式(9)可以看出,  $w$  的定义为目标在直线轨迹上所处的位置:

$$w = \frac{vt}{R_0} \quad (9)$$

将式(6)~(9)分别代入式(5),可以将磁异常信号表示为:

$$S = \frac{\mu_0 M}{4\pi R_0^3} \sum_{n=1}^4 b_n \varphi_n(w) \quad (10)$$

式(10)中的基函数分别为:

$$\varphi_1(w) = \frac{w^2}{(w^2 + 1)^{5/2}}, \varphi_2(w) = \frac{w}{(w^2 + 1)^{5/2}} \quad (11)$$

$$\varphi_3(w) = \frac{1}{(w^2 + 1)^{5/2}}, \varphi_4(w) = \frac{1}{(w^2 + 1)^{3/2}}$$

相应的系数分别为:

$$\begin{cases} b_1 = 3\sin v_M \cos \phi_M \sin v_T \cos \phi_T \\ b_2 = 3(\cos v_M \sin v_T \cos \phi_T + \sin v_M \cos \phi_M \cos v_T) \\ b_3 = 3\cos v_M \cos v_T \\ b_4 = -\sin v_M \sin v_T \cos(\phi_M - \phi_T) - \cos \phi_M \cos v_T \end{cases} \quad (12)$$

而由  $\varphi_4(w) = \varphi_1(w) + \varphi_3(w)$  知, 原来的 4 个基函数可以化简为 3 个, 分别为  $\varphi_1(w), \varphi_2(w), \varphi_3(w)$ 。由 Wronskian 矩阵行列式非零可知上述基函数是线性无关的。信号分解的目标是构造一组正交的基函数, 它们应该满足正交性的基本条件如下:

$$\int f_i(u)f_j(u) du = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}, \quad (13)$$

通过 Gram-Schmidt 正交法, 得到一组正交基函数为<sup>[17]</sup>:

$$\begin{cases} f_1(w) = \sqrt{\frac{24}{5\pi}} \frac{1 - \frac{5}{3}w^2}{(1 + w^2)^{5/2}} \\ f_2(w) = \sqrt{\frac{128}{5\pi}} \frac{w^2}{(1 + w^2)^{5/2}} \\ f_3(w) = \sqrt{\frac{128}{3\pi}} \frac{w}{(1 + w^2)^{5/2}} \end{cases} \quad (14)$$

得到的标准正交基函数如图 2 所示。进一步地, 磁异常信号可表达为:

$$S = \frac{\mu_0 M}{4\pi R_0^3} \sum_{j=1}^3 a_j f_j(w) \quad (15)$$

$$a_1 = \sqrt{\frac{5\pi}{24}} (b_3 + b_4), a_2 =$$

$$\sqrt{\frac{3\pi}{128}} \left( b_1 + \frac{5}{3}b_3 + \frac{8}{3}b_4 \right), a_3 = \sqrt{\frac{5\pi}{128}} b_2$$

### 2.2 基于卡亨南-洛维展开的 OBF 修正算法

传统的 OBF 分解算法在高斯白噪声背景下检测性能优异; 基于卡亨南-洛维展开的 OBF 分解算法考虑到地磁噪声接近于  $1/f$  噪声, 对算法做出了修正。设连续随机信号  $x(t) = s(t) + n(t)$  ( $0 \leq t \leq T$ ),  $s(t)$  是确知信号,  $n(t)$  是噪声干扰。当干扰为有色噪声时, 它的相关函数不再是特定的  $\delta$  函数, 而是一般的时间相关函数  $r_n(t-u)$ 。把连续随机信号  $x(t)$  按一组正交基函数  $f_k(t)$  展开如下:

$$\begin{cases} x(t) = \sum_k x_k f_k(t) \\ x_k = \int_0^T x(t) f_k(t) dt \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots \quad (16)$$

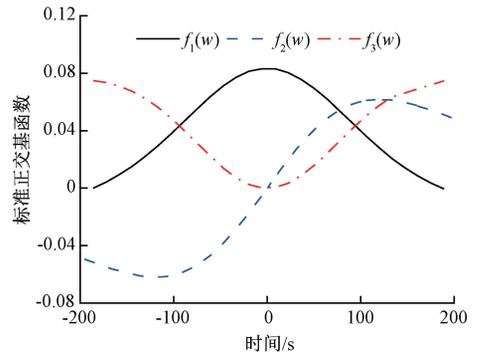


图 2 标准正交基函数

Fig. 2 Standard OBFs

要使  $x(t)$  的展开系数  $x_k$  互不相关, 对于任意的  $k$ ,  $f_k(t)$  必须满足如下关系式:

$$\int_0^T r_n(t-u) f_k(u) du = \lambda_k f_k(t), 0 \leq t \leq T, k = 1, 2, \dots \quad (17)$$

式中:  $\lambda_k$  是积分方程的特征值,  $f_k(t)$  是积分方程的特征函数。在满足上述积分方程的前提下, 利用展开系数  $x_k$ , 基于 NP 准则可构成似然比检验判决式:

$$\Lambda(x) = \frac{\exp(-\frac{1}{2}(x_k - s_k)^T \lambda_k^{-1} (x_k - s_k))}{\exp(-\frac{1}{2} x_k^T \lambda_k^{-1} x_k)} \underset{H_0}{>} \underset{H_1}{\eta} \quad (18)$$

$$s_k = \int_0^T s(t) f_k(t) dt, k = 1, 2, \dots \quad (19)$$

其中,  $H_1$  表示随机信号是信号和噪声的叠加,  $H_0$  则表示只有噪声,  $\eta$  是根据虚警概率确定的门限值。上述判决式经过化简, 最终可表示为:

$$\int_0^T x(t) g(t) dt \underset{H_0}{>} \underset{H_1}{\gamma} \quad (20)$$

其中,  $g(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{s_k}{\lambda_k} f_k(t)$  和  $\gamma = \ln \eta + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{s_k^2}{\lambda_k}$  是等效门限, 化简后的形式就是高斯色噪声背景下确定信号的最佳二元判决式<sup>[18]</sup>。由式(14)可知, 正交基函数的卡亨南-洛维展开系数为  $h_{ik} = \int_0^T h_i(t) w_k(t) dt$ , 其中  $w_k(t)$  构成空间  $L^2[0,1]$  中的正交集。 $\tau_k$  是方程  $\int_0^T r_\varepsilon(t-u) w_k(u) du = \tau_k w_k(t)$  的特征值,  $r_\varepsilon(t-u)$  是地磁噪声的自相关函数, 由于地磁噪声序列  $\varepsilon(t)$  是可以测量的,  $\tau_k$  可求解。根据以上信息, 修正传统的基函数可以得到新的基函数为:

$$g_i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{h_{ik}}{\tau_k} w_k(t) \quad i = 1, 2, 3 \quad (21)$$

图 3 给出了基于卡亨南-洛维展开修正的正交基函

数。基于新的正交基函数设计目标检测算法,即可完成对正交基分解算法的修正。

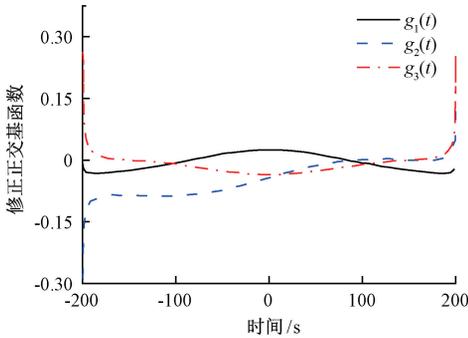


图 3 基于卡亨南-洛维展开修正的正交基函数

Fig. 3 Modified OBFs based on Karhuen-Loeve expansion

### 3 结果与讨论

#### 3.1 实验设置

磁目标探测系统由西安华舜磁通门三轴磁传感器、机载嵌入式系统、无人机、通信系统和地面控制站等组成。控制无人机进行姿态变换,以获得不同姿态下的磁场数据,再利用椭球拟合补偿算法对数据进行校正补偿。如图 4 所示,传感器测量的初始数据能够表征出旋转的过程,而经过算法处理后,数据近似成一条直线,不再显示姿态变化信息。从算法处理结果可以看出,补偿前传感器转向误差的峰峰值约为 300 nT,经过补偿算法处理后,峰峰值降至 32.6 nT,平均值为  $-3.23 \times 10^{-4}$  nT,标准差为 3.9 nT,补偿效果十分优秀。

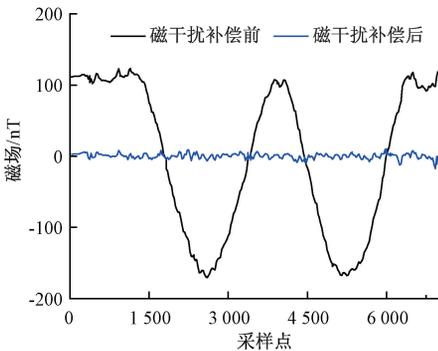


图 4 磁干扰补偿前后结果对比

Fig. 4 Comparison of results with and without magnetic interference compensation

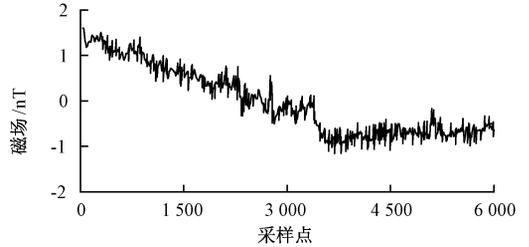
#### 3.2 传统 OBF 算法与修正 OBF 算法检测实验对比

##### 1) 地磁噪声测量与分析

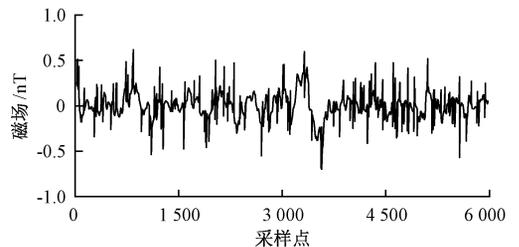
实验利用三轴磁通门传感器在磁场波动较小,受到干扰较少的区域内测量地磁噪声,对地磁噪声进行特征分析,掌握其频域特性和统计特征。在实际测量中,由于

地磁脉动等干扰成分的存在,背景噪声的功率谱服从  $1/f^\alpha$  分布,其中  $0 < \alpha < 2$ <sup>[19]</sup>。

图 5(a) 是实验测得的地磁噪声。经过去趋势、零均值预处理后的噪声如图 5(b) 所示。对处理后噪声进行分析,图 6 分别给出了噪声的功率谱密度曲线。从图可以看出地磁噪声功率谱密度呈  $1/f^\alpha$  递减,这主要是由于地磁脉动以及其他的干扰造成的。从实测数据中可知,地磁噪声中确实有分形噪声的存在,因此基于卡亨南-洛维展开对传统的 OBF 分解算法做出修正是十分必要的。



(a) 原始测量地磁背景噪声  
(a) Geomagnetic background noise without processing



(b) 去趋势、零均值预处理后的背景噪声  
(b) Background noise after detrending and zero mean preprocessing

图 5 地磁背景噪声处理前后结果对比

Fig. 5 Comparison of background noise with and without processing

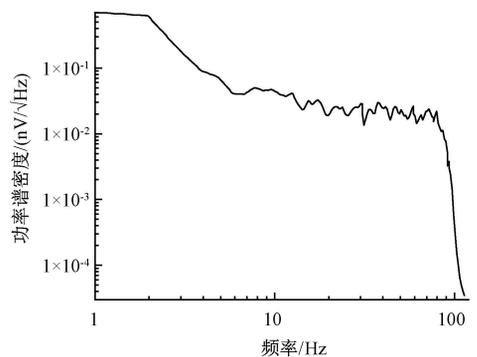


图 6 噪声功率谱密度

Fig. 6 The noise power spectral density

##### 2) 检测结果分析

为了系统研究磁目标检测性能与磁异信号信噪比之间的关系,在地磁噪声背景下进行探测实验<sup>[20]</sup>。实验中,保持磁异常目标的位置不变,通过控制无人机距离地

面的高度,获取不同信噪比的磁异信号。无人机携带磁传感器从从端点 A 垂直起飞,悬停在地面 6 m 高度处,平飞至 B 点后降落,途中 C 点放置一块磁矩为  $3 \text{ A} \cdot \text{m}^2$  的磁铁作为磁目标,如图 7 所示。同时,改变飞行高度至 7 和 8 m,保持磁铁的大小和方向不发生变化,获得不同飞行高度下的测量数据。

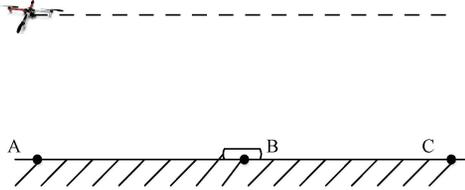


图 7 无人机探测磁目标飞行示意图

Fig. 7 The schematic diagram of UAV detecting magnetic target

图 8 给出了不同飞行高度下测量数据的传统 OBF 算法和修正 OBF 算法的检测结果对比。当飞行高度为 6 m 时,磁异信号信噪比较高,为 2.67 dB,磁异信息较为明显。当高度升至 7 m,磁异信息被噪声淹没,信噪比降至  $-0.62 \text{ dB}$ ,但经过两种算法处理后,均能有效检测出磁异目标的存在。最后当高度变为 8 m,信噪比进一步降低,仅有  $-3.51 \text{ dB}$ ,相比于修改 OBF 算法,传统 OBF 算法处理数据的效果较差,检测目标时如果阈值设置不当,极易引起虚警,而使用修正 OBF 算法处理后,目标的信息仍然较为明确,检测效果良好。

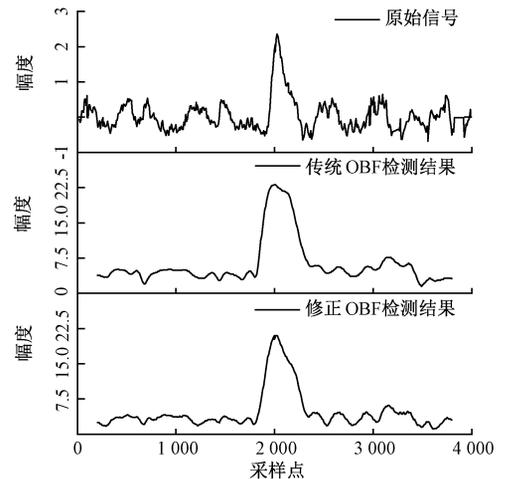
根据检测结果,对两种算法处理后的信噪比增益进行了比较,表 1 给出了两种算法的比较结果。从表中可以归纳出如下规律:

- 1) 磁异目标产生的感应磁场强度随着探测高度的增加而逐渐衰减。因而,原始测量信号的信噪比随着探测高度的增加而显著降低;
- 2) 不管在哪种原始信噪比下,修正 OBF 算法检测的信噪比增益总是高于传统 OBF 算法检测,检测性能更加优越;
- 3) 随着原始测量信号信噪比的降低,修正 OBF 算法与传统 OBF 算法之间信噪比增益的差值逐渐增大,说明修正 OBF 在低信噪比的情况下,具有更强的鲁棒性,更适用于在实际低频磁噪声背景下目标的检测。

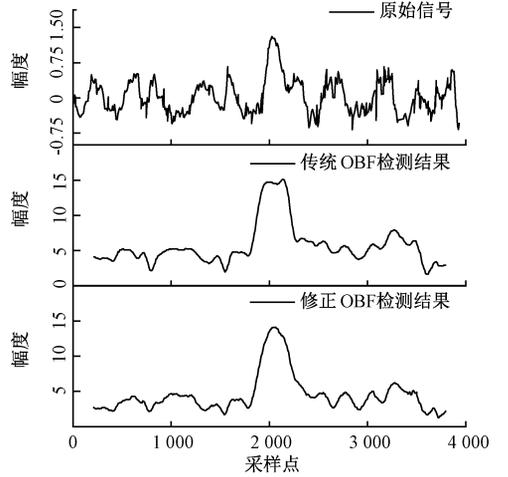
表 1 探测实验信噪比结果

Table 1 SNR results of detection experiments

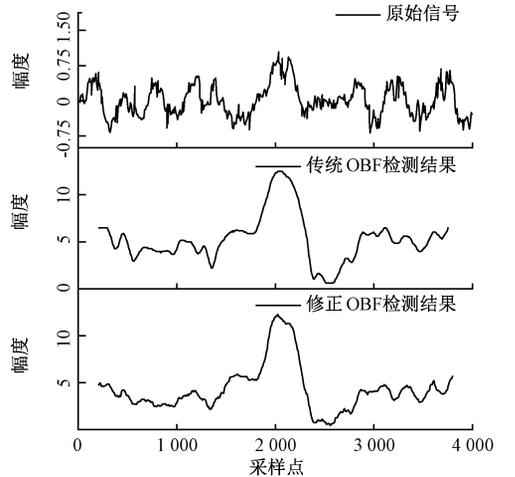
高度/m	初始信噪比/dB	传统 OBF 信噪比增益/dB	修正算法信噪比增益/dB	增益差/dB
6	2.71	18.39	19.89	1.50
7	-0.62	18.43	20.23	1.79
8	-3.52	18.55	20.62	2.07



(a) 飞行高度为 6 m  
(a) Flight height at 6 m



(b) 飞行高度为 7 m  
(b) Flight height at 7 m



(c) 飞行高度为 8 m  
(c) Flight height at 8 m

图 8 不同飞行高度下传统和修正 OBF 算法的磁目标检测结果对比

Fig. 8 Detection results of traditional and modified OBF algorithms for magnetic targets at different flight heights

## 4 结 论

OBF 检测是白噪声背景下磁异信号检测的有效方法,本文基于卡亨南-洛维展开修正 OBF 算法使其适用于有色噪声背景下的磁异信号检测。首先通过椭球拟合磁干扰补偿方法,实现精度约为 30 nT 的磁场干扰补偿。在磁干扰补偿的基础上,通过不同飞行高度实验获取不同信噪比的磁异信号,再利用传统和修正 OBF 算法分别进行目标检测。相比于传统 OBF 检测方法,修正的 OBF 方法具有更佳的检测效果,尤其是针对低信噪比目标的检测优势明显,信噪比增益提升了约 2 dB。结果表明,基于卡亨南-洛维展开对传统 OBF 基函数的修正,使其更加适用于真实地磁脉动等低频干扰磁噪声下的目标检测。

## 参考文献

- [ 1 ] 韩磊. 航空磁异常探测关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
HAN L. Key technology research on airborne magnetic anomaly detection [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] 张坚, 林春生, 邓鹏, 等. 非高斯背景噪声下的微弱磁异常信号检测算法[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(4): 22-26.  
ZHANG J, LIN CH SH, DENG P, et al. Detection of weak magnetic anomaly signal in non-Gaussian noise background [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2011, 23(4): 22-26.
- [ 4 ] 张坚, 林春生, 邓鹏, 等. 基于小波域 OBF 分解的磁异常信号检测算法[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(6): 187-189.  
ZHANG J, LIN CH SH, DENG P, et al. Detection of magnetic anomaly signal based on OBF decomposition in wavelet domain [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(6): 187-189.
- [ 5 ] 张坚, 林春生, 黄凡. OBF 分解与 BP 网络在船舶磁场信号检测中的应用[J]. 船电技术, 2011, 31(7): 13-16.  
ZHANG J, LIN CH SH, HUANG F. Application of OBF decomposition and BP neural network to magnetic signal detection of a ship [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2011, 31(7): 13-16.
- [ 6 ] 王珺琳, 陈博. 基于运动目标的 OBF 方法检测性能分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017, 12(1): 47-51.  
WANG J L, CHEN B. The analysis of OBF detection performance based on moving object [J]. Journal of CAEIT, 2017, 12(1): 47-51.
- [ 7 ] MIAO C X, 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(1): 109097.
- [ 8 ] 徐磊, 张志强, 林朋飞, 等. 磁异常检测方法研究现状及发展趋势[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(1): 66-72.  
XU L, ZHANG ZH Q, LIN P F, et al. Research status and development trend of detection method for magnetic anomaly [J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2022, 5(1): 66-72.
- [ 9 ] BORIS G, LEV F, BEN-ZION K. Processing of magnetic scalar gradiometer signals using orthonormalized functions [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2002, 102(1-2): 67-75.
- [ 10 ] SHEINKER A, SHKALIM A, SALOMONSKI N, et al. Processing of a scalar magnetometer signal contaminated by  $1/f\alpha$  noise [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2007, 138(1): 105-111.
- [ 11 ] 杨勇, 陈正想. 基于正交基分解算法的航空磁探方法[J]. 电子科技, 2014, 27(7): 36-39.  
YANG Y, CHEN ZH X. Orthogonal basis decomposition algorithm based on aeromagnetic exploration [J]. Electronic Science & Technology, 2014, 27(7): 36-39.
- [ 12 ] 张珂瑜. 微弱磁异常信号特征分析与检测方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.  
ZHANG K Y. Research on characteristic analysis and detection method of weak magnetic anomaly signal [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [ 13 ] 张晓明, 赵剡. 基于椭圆约束的新型载体磁场标定及补偿技术[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2438-2443.  
ZHANG X M, ZHAO Y. New auto-calibration and compensation method for vehicle magnetic field based on ellipse restriction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2438-2443.
- [ 14 ] MCFEE J E, DAS Y, ELLINGSON R O. Locating and identifying compact ferrous objects [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1990, 28(2): 182-193.

- [15] BALDONI J A, YELLEN B B. Magnetic tracking system: Monitoring heart valve prostheses [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2430-2432.
- [16] 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.  
WAN CH B. Investigations on the theory and method of magnetic anomaly detection [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [17] 马运超. 背景噪声自适应对消在磁异常信号检测中的应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.  
MA Y CH. Application of background noise adaptive cancellation in magnetic anomaly detection [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [18] WAN C B, PAN M C, ZHANG Q, et al. Performance improvement of magnetic anomaly detector using Karhunen-Loeve expansion [J]. Iet Science Measurement & Technology, 2017, 11(5): 600-606.
- [19] 陈路昭, 朱万华, 吴佩霖, 等. 地磁背景环境中基于分形特征的磁异常信号检测算法 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41(2): 332-340.  
CHEN L ZH, ZHU W H, WU P L, et al. Magnetic anomaly detection algorithm based on fractal features in geomagnetic background [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(2): 332-340.
- [20] 李婷, 张金生, 王仕成, 等. 地磁测量误差矢量补偿方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2682-2690.

LI T, ZHANG J SH, WANG SH CH, et al. Component compensation method for distortion magnetic field measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2682-2690.

### 作者简介



邱伟成(通信作者), 2010年于国防科技大学获得学士学位, 2012年于国防科技大学获得硕士学位, 2016年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学讲师, 主要研究方向为智能传感与探测。

E-mail: 2008qiuweicheng@sina.com

**Qiu Weicheng** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2010, M. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2012 and Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2016, respectively. Now he is a lecturer in National University of Defense Technology. His main research interests include intelligent sensing and detection.



张欣苗, 2018年于国防科技大学获得学士学位, 现为国防科技大学博士研究生, 主要研究方向为智能传感与探测。

E-mail: zxinmiao2020@163.com

**Zhang Xinmiao** received her B. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2018. Now she is a Ph. D. candidate in National University of Defense Technology. Her main research interests include intelligent sensing and detection.