

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.01.04

基于铯光泵磁力仪的地磁噪声补偿技术

谢胤, 罗方雪, 张樊, 王玲, 柳占新*

(中国船舶重工集团公司第七一〇研究所 国防科技工业弱磁一级计量站, 湖北 宜昌 443001)

摘要: 针对高灵敏度磁传感器的计量与标定, 开展了基于铯光泵磁力仪的地磁噪声补偿研究。在原子谱灯铯光泵磁力仪基础上, 用激光替换原子谱灯作为铯光泵磁力仪的光源, 设计激光光泵磁力仪, 应用于地磁噪声补偿系统, 再通过实验对基于以上两型光泵磁力仪地磁噪声补偿系统的磁场补偿能力并进行了分析, 实验研究结果表明, 基于以上两型铯光泵磁力仪的地磁噪声补偿系统均能复现功率谱密度优于 $0.5 \text{ pT/Hz}^{1/2}@1 \text{ Hz}$ 和噪声峰-峰值低于 10.8 pT (10 Hz 采样率) 的磁场, 且激光光泵磁力仪在较大磁场下补偿效果更好。该结果为设计用于磁传感器计量与标定的地磁噪声补偿系统提供了重要参考。

关键词: 电磁测量; 光泵磁力仪; 激光; 地磁噪声补偿

中图分类号: TB96; O441.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2022)01-0026-06

Geomagnetic noise compensation technology based on cesium optical-pumping magnetometer

XIE Yin, LUO Fangxue, ZHANG Fan, WANG Ling, LIU Zhanxin*

(1st Class Weak Magnetic Metering station of NDM, No.710 institute, CSSC, Yichang 443001, China)

Abstract: Focusing on the measurement and calibration of high-sensitivity magnetic sensors, a study on geomagnetic noise compensation based on cesium optical-pumping magnetometer was carried out. On the basis of the atomic spectrum lamp cesium optical-pumping magnetometer, the study replaced atomic spectrum lamp with laser as the light source of the cesium optical-pumping magnetometer, designed the laser optical-pumping magnetometer, and applied it to the geomagnetic noise compensation system. The magnetic field compensation capability of the optical-pumping magnetometers geomagnetic noise compensation system was analyzed through experiments on the two types of the optical-pumping magnetometers. Experimental results show that the geomagnetic noise compensation system based on the above two types of cesium optical-pumping magnetometers both can reproduce magnetic field with a noise power spectral density better than $0.5 \text{ pT/Hz}^{1/2}@1 \text{ Hz}$ and a noise peak-to-peak lower than 10.8 pT (10 Hz sampling rate), and the laser optical-pumping magnetometer has better compensation effect under large magnetic field. The results provide important reference for designing geomagnetic noise compensation systems for magnetic sensor metrology and calibration.

Key words: electromagnetic measurement; optical-pumping magnetometer; laser; geomagnetic noise compensation

0 引言

磁场测量一直是精密测量领域的重要研究方向。自中国古代发明指南针以来, 基于多种工作原理的磁场测量设备已被研制出来, 如霍尔传感器、磁通门、质子磁力仪、超导量子磁力仪、无自旋交换弛豫磁力仪等。其中基于光磁共振原理的光泵磁力仪是一种量子磁传感器^[1], 凭借高精

度、高灵敏度和快速响应等特点在众多磁力仪中脱颖而出。光泵磁力仪在医学诊断^[2]、地球物理^[3]、惯性导航^[4-5]等多个领域具有重要的应用。

根据工作模式的不同, 光泵磁力仪可分为自激式和跟踪式, 自激式光泵磁力仪具有更快的响应速率与更强的抗干扰能力^[6]; 根据工作元素的不同, 光泵磁力仪又可分为碱金属原子光泵磁力仪和惰性气体光泵磁力仪^[7], 碱金属光泵磁力仪

收稿日期: 2021-12-10; 修回日期: 2022-01-10

引用格式: 谢胤, 罗方雪, 张樊, 等. 基于铯光泵磁力仪的地磁噪声补偿技术[J]. 计测技术, 2022, 42(1): 26-31.

Citation: XIE Y, LUO F X, ZHANG F, et al. Geomagnetic noise compensation technology based on cesium optical-pumping magnetometer[J]. Metrology & measurement technology, 2022, 42(1): 26-31.



中的工作物质主要为钾、铷和铯等元素。在地磁探测、磁性目标搜索等任务中,磁力仪需要安装在飞行器运动载体上,自激式铯光泵磁力仪因具备快速响应、高灵敏度、稳定可靠等优点,得到了重点应用。

近年来,随着光泵磁力仪的发展,其国际最优水平灵敏度已达到 $0.3 \text{ pT/Hz}^{1/2}@1 \text{ Hz}$ [8]。为了给磁传感器的校准和测试提供稳定的磁场环境,常用的方法是给磁屏蔽筒内的线圈通入恒定电流 [9] 来复现恒定的磁场,因此,复现磁场的噪声水平主要取决于电流源的噪声。若仅采用精密电流源来复现地磁场量级的磁场,其噪声水平无法满足光泵磁力仪的测试需求。

为了获得噪声更低的恒定磁场,介绍了一种基于光泵磁力仪的地磁噪声补偿系统,该系统由光泵磁力仪、函数发生器、鉴相控制器、磁场复现线圈等组成的锁相闭环系统,其中光泵磁力仪的灵敏度决定了该系统的补偿效果。实验采用研制的两型自激式铯光泵磁力仪:一种是以激光为光源的激光铯光泵磁力仪(Laser Optical-Pumping Magnetometer, LOPM),另一种是以铯原子光谱灯为光源的铯光泵磁力仪(CAM-01),该两种磁力仪除了光源不同,其它组成部分完全相同。基于此两种光泵磁力仪的地磁噪声补偿系统均复现了稳定的弱磁场,本文研究为设计和建造基于高灵敏度铯原子磁力仪的地磁噪声补偿系统提供了重要参考。

1 基本原理和实验装置

LOPM和CAM-01通过光泵浦和磁共振等技术测量拉莫尔频率,该方法首次被Dehmelt提出理论 [10],由Bell和Bloom实验验证 [11]。自激式光泵磁力仪是通过光探测的方式锁定发生磁共振时射频场频率,进而推算待测磁场值。

激光器产生 894.6 nm 的线偏振光,经过光学器件后变成圆偏振光,入射到铯原子气室。铯原子与外磁场、射频场建立的三维坐标如图1所示,以外磁场 B 方向为 z 轴,射频场方向为 x 轴建立三维坐标系。

射频场表达式为

$$B_{rf} = 2B_1 \cos(\omega t) \quad (1)$$

式中: B_1 为射频场磁感应强度的大小, T ; ω 为射

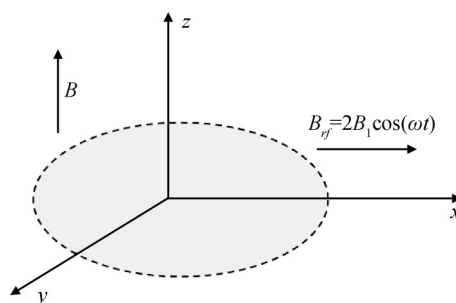


图1 三维坐标

Fig.1 Three-dimensional coordinate

频场频率, rad/s。

气室内铯原子在激光、外磁场和射频场等因素作用下,原子磁化强度发生改变, x 轴磁矩越大,透射光强越小。整个原子宏观磁性可以用磁化强度 M 表示为

$$M = \frac{\sum \mu}{V} \quad (2)$$

式中: μ 为核磁矩, $\text{A} \cdot \text{m}^2$; V 为样品体积, m^3 。其运动方程有

$$\frac{dM}{dt} = \gamma(M \times B) \quad (3)$$

式中: B 为外磁场和射频场的叠加, T ; γ 为原子的旋磁比, Hz/T 。

根据布洛赫方程,磁化强度在 x , y , z 轴分量的演化为

$$\begin{cases} \frac{dM_x}{dt} = \gamma(M_y B_z - M_z B_y) - \frac{M_x}{T_2} \\ \frac{dM_y}{dt} = \gamma(M_z B_x - M_x B_z) - \frac{M_y}{T_2} \\ \frac{dM_z}{dt} = \gamma(M_x B_y - M_y B_x) - \frac{M_z - M_0}{T_1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_1 为纵向弛豫时间, s ; T_2 为横向弛豫时间, s ; M_x 为磁化强度在 x 轴上的分量, $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$; M_y 为磁化强度在 y 轴上的分量; M_z 为磁化强度在 z 轴上的分量; M_0 为处于平衡态的原子的磁化强度。

解稳态方程,式(4)在 x 轴分量的稳态解有

$$M_x = \gamma T_2 M_0 \frac{\Delta \omega T_2 B_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t}{1 + \Delta \omega^2 T_2^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2} \quad (5)$$

式中: $\Delta \omega = \omega_0 - \omega = \gamma B - \omega$ 为频率的失谐量。

令

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{\Delta \omega T_2}{\sqrt{1 + \Delta \omega^2 T_2^2}} \\ \sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \Delta \omega^2 T_2^2}} \end{cases} \quad (6)$$

代入式(5)可得

$$M_x = \gamma T_2 M_0 B_1 \frac{\sqrt{1 + \Delta \omega^2 T_2^2}}{1 + \Delta \omega^2 T_2^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2} \cos(\omega t - \alpha) \quad (7)$$

根据式(6)可得

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{1}{\Delta \omega T_2} \quad (8)$$

当铯原子气室发生光磁共振时, $\Delta \omega$ 趋近于0, 根据式(8)可以得出 $\alpha=90^\circ$, 这时根据式(7)与式(1)可以计算出 x 轴的磁极化强度分量 M_x 滞后射频场相位 90° [12]。

若要完成磁场的探测则需要增添一个自激回路进行磁场锁定和跟踪。首先, 需要将光电信号进行一定幅度的放大, 以满足幅度条件 $|AF|=1$, A 为开环增益, F 为反馈系数; 然后, 因光信号超前射频信号 90° , 而光电转换及后续电路不会产生相移, 所以需要额外的移相电路使得光电信号与射频信号满足自激振荡的相位条件, 即 $\Delta \varphi=2n\pi$ ($n=0, 1, 2, 3, \dots$)。这样便形成了完整的自激回路, 可以进行磁场的跟踪与锁定。

CAM-01 和 LOPM 的光路分别如图2(a)、图2(b)前端所示。图2(a)为原子光谱灯光源的铯光泵磁力仪, 一定功率的射频信号激励铯原子光谱灯, 其发出的荧光经过准直透镜后变成准平行光, 然后通过窄带滤光片得到 894.6 nm 谱线的光。图2(b)为激光光源的铯光泵磁力仪, 采用 Vescient 公司的 D2-100-DBR 激光模块, 通过恒温控制和饱和吸收谱稳频之后得到 894.6 nm 波长的激光, 再通过整形和扩束得到平行光。LOPM 和 CAM-01 分别以激光和原子光谱灯作为光源, 经偏振片和 1/4 波片后变成圆偏振光, 随后进入原子气室并与铯原子相互作用, 最后由透镜汇聚于光电探测器。实验过程中, 两种光源的光斑直径均约为 12 mm, 光强约为 1 mW。

地磁噪声补偿系统是一种具备噪声抑制和磁场复现功能的装置 [13]。图2(c)展示了地磁补偿系统组成部分。为获取恒定的磁场, 首先使用磁通门测量 Y 轴, Z 轴磁场, 并通过精密恒流电源进

行补偿, 抵消地磁场在 Y , Z 轴方向的分量, 再通过精密恒流电源改变 X 轴线圈的电流来调节 X 轴方向的磁场大小。高稳定频率源输出一个参考频率, 参考频率值对应目标磁场值, 铯光泵磁力仪将 X 轴磁场值转换为频率信号, 并通过改变 X 轴恒流源的输出电流, 使铯光泵磁力仪输出频率值逼近参考频率, 当频率差足够小, 整个环路进入锁定状态。当环路进入锁定状态后, 系统则可以自动补偿 X 轴地磁场的变化, 并使铯光泵磁力仪的输出频率稳定在参考频率附近。

3 实验结果

实验中, 先采用 CAM-01 以 10 Hz 的采样率对地磁噪声补偿系统周围的环境磁场进行测量, 如图3所示。从图中可以看出, 环境磁场不但有持续漂移, 而且在一定范围内环境磁场的磁感应强度峰-峰值大于 80 pT, 磁场漂移和噪声超出了磁传感器的校准和测试的要求。引起环境磁场漂移和噪声的因素十分复杂 [14], 如地球自转、环境地质构造、周围地形环境、人造金属物体和周围电器设备等因素均会导致磁场噪声, 当这些影响因素不可避免时, 可通过地磁噪声补偿系统进行地磁噪声补偿和恒定磁场复现。

复现磁场的峰-峰值是评价地磁噪声补偿系统的重要指标。然后, 将 CAM-01 和 LOPM 分别用于地磁噪声补偿系统, 复现大小分别为 20000, 35000, 50000, 65000 和 80000 nT 的磁场, 两类铯光泵磁力仪测得的磁场如图4所示。分别以 CAM-01 和 LOPM 作为磁传感器的地磁噪声补偿系统所复现磁场的峰-峰值如表1所示。其中, 当 LOPM 所测磁场的峰-峰值处于 2.9 pT 至 7.6 pT 之间时, CAM-01 所测磁场的峰-峰值处于 3.2 pT 至 10.8 pT 之间时, 均远低于地磁环境下磁场噪声, 说明该地磁噪声补偿系统可以有效复现低噪声磁环境。如图4(a)~图4(c)所示, 当复现 50000 nT 以下磁场时, 以 LOPM 和 CAM-01 作为磁传感器的地磁噪声补偿系统复现磁场的峰-峰值相差不大; 如图4(d)和图4(e)所示, 当复现高于 50000 nT 的磁场时, 以 LOPM 作为磁传感器的地磁噪声补偿系统复现磁场的峰-峰值低于以 CAM-01 为磁传感器的补偿系统。

铯光泵磁力仪的灵敏度会对地磁噪声补偿系

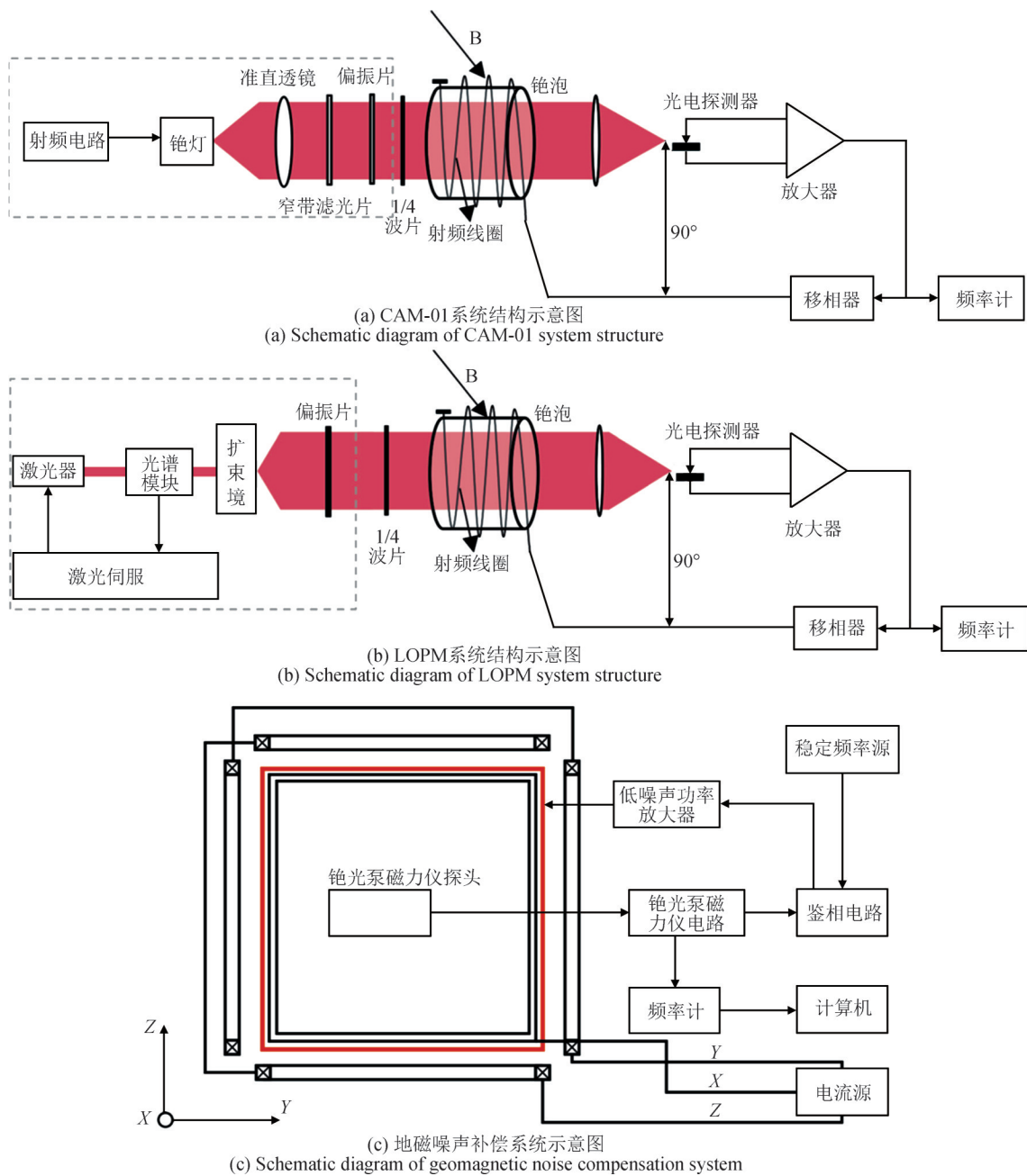


图 2 基于铯光泵磁力仪的地磁噪声补偿系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of geomagnetic noise compensation system based on cesium optical-pumping magnetometer

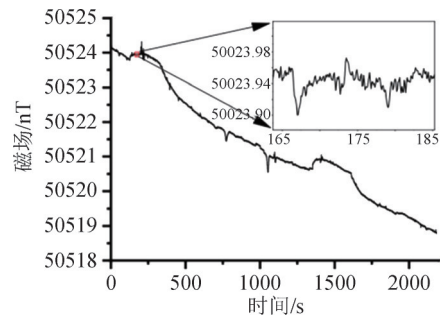


图 3 环境磁场

Fig.3 Environmental magnetic field

统复现磁场的效果产生影响，其复现磁场虽然不能直接用来进行铯光泵磁力仪噪声和灵敏度指标的评估，但能间接反映铯光泵磁力仪的性能。本文通过复现磁场的功率谱密度（Power Spectral Density，PSD）来间接分析铯光泵磁力仪灵敏度^[15]。分别以CAM-01和LOPM作为磁传感器的地磁补偿系统，所复现磁场在1 Hz处的功率谱密度如表2所示。表中数据为图5（a）~图5（e）中LOPM和CAM-01在1 Hz的功率谱密度，随着复现

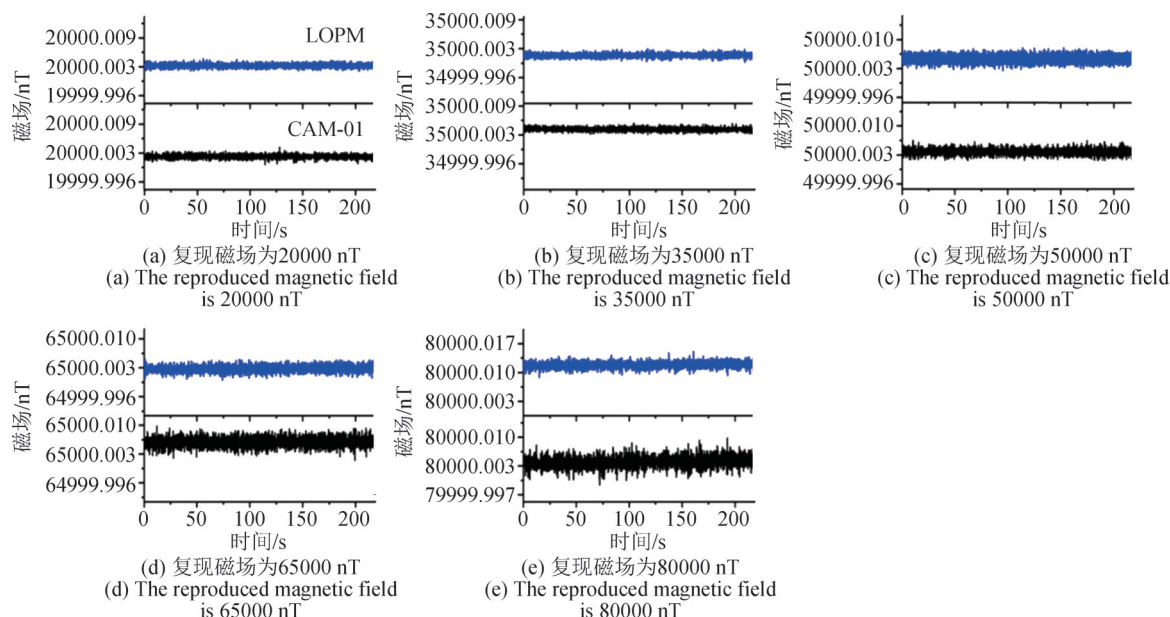


图4 不同复现磁场的补偿效果图

Fig.4 Diagram of the compensation effect of different reproduced magnetic fields

表1 不同复现磁场的峰-峰值

Table.1 Peak-to-peak value of different reproduced magnetic fields

磁力仪	峰-峰值/ pT				
	20000 nT	35000 nT	50000 nT	65000 nT	80000 nT
CAM-01	3.2	3.5	5.2	8.9	10.8
LOPM	2.9	3.1	5.8	7.6	7.6

表2 不同复现磁场的功率谱密度(1 Hz)

Table.2 PSD of different reproduced magnetic fields (1 Hz)

磁力仪	功率谱密度/(pT·Hz ^{-1/2})				
	20000 nT	35000 nT	50000 nT	65000 nT	80000 nT
CAM-01	0.15	0.16	0.37	0.42	0.50
LOPM	0.13	0.15	0.19	0.21	0.27

磁场的增大, LOPM的PSD逐渐增大, 但始终低于CAM-01, 其原因在于, 随着磁场强度的增大, 原

子气室内磁场梯度增大, 且磁共振信号的线宽增大, 导致光泵磁力仪灵敏度降低。

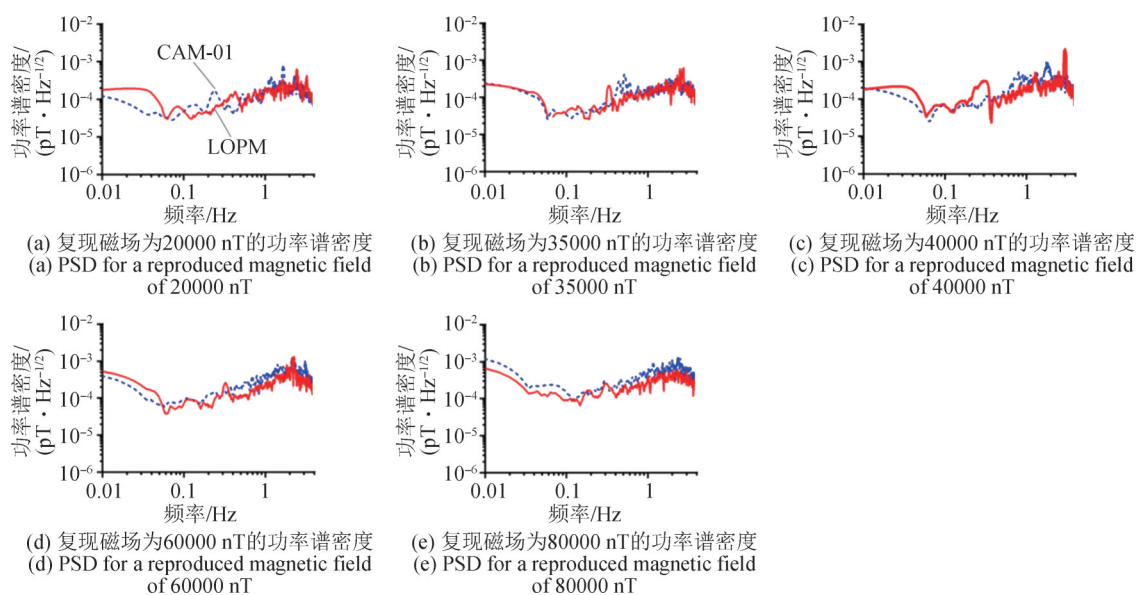


图5 不同复现磁场的功率谱密度

Fig.5 PSD of different reproduced magnetic fields

4 结论

针对光泵磁力仪在地磁补偿系统中的应用问题,本文研制了两类用于地磁噪声补偿系统的自激式铯光泵磁力仪,相对于跟踪式氦光泵、钾光泵及质子磁力仪,具有更高的频率响应带宽,实现补偿系统对更高频率磁干扰的补偿能力。复现磁场峰-峰值低于10.8 pT (10 Hz采样率),功率谱密度优于0.5 pT/Hz^{1/2}@1 Hz。基于激光光源的LOPM和基于原子光谱灯光源的CAM-01,既解决了环境磁场漂移的问题,又避免了环境磁场噪声过大的问题,复现了稳定的弱磁场,提高了校准和测试磁传感器的能力。此外,本文首次将激光铯光泵磁力仪应用于地磁噪声补偿系统,实验结果表明在较大磁场下可复现噪声更低的恒定磁场,为光泵磁力仪的灵敏度指标继续提高也提供了可参考的技术方案。

参考文献

- [1] 王劲松,迟晓珠. 特种传感器发展及趋势[J]. 计测技术, 2019, 39(4): 57-63.
WANG J S, CHI X Z. Development trend of special sensors[J]. Metrology & measurement technology, 2019, 39(4): 57-63. (in Chinese)
- [2] WYLLIE R. The development of a multichannel atomic magnetometer array for fetal magnetocardiography[D]. Madison: University of Wisconsin Madison, 2012: 1-5.
- [3] V MATHÉ, F LÉVÊQUE, PE MATHÉ, et al. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: limits in the low magnetic amplitude case[J]. Journal of applied geophysics, 2006, 58(3): 202-217.
- [4] MEYER D, LARSEN M. Nuclear magnetic resonance gyro for inertial navigation[J]. Gyroscopy and navigation, 2014, 5(2): 75-82.
- [5] HARLE P, WACKERLE G, MEHRING M. A nuclear-spin based rotation sensor using optical polarization and detection methods[J]. Applied magnetic resonance, 1993, 5(2): 207-220.
- [6] BUDKER D, ROMALIS M. Optical magnetometry[J]. Nature physics, 2007.
- [7] 张羽翀. 光泵氦磁力仪共振吸收曲线测绘系统电路设计[J]. 航空计测技术, 1998(3): 15-19.
ZHANG Y C. Circuit design of resonance absorption curve mapping system of the optical pump helium magnetometer[J]. Aviation metrology & measurement technology, 1998(3): 15-19. (in Chinese)
- [8] 汪之国,罗晖,樊振方,等. 极化检测型铷原子磁力仪的研究[J]. 物理学报, 2016.
WANG Z G, LUO H, FAN Z F, et al. Research on an pump-probe rubidium magnetometer[J]. Acta physica sinica, 2016. (in Chinese)
- [9] SHEN L, ZHANG R, WU T, et al. Suppression of current source noise with an atomic magnetometer[J]. Review of scientific instruments, 2020.
- [10] DEHMELT G. Modulation of a light beam by precessing absorbing atoms[J]. Physical review, 1957, 105(6): 1924-1925.
- [11] BELL W E, BLOOM A L. Optical detection of magnetic resonance in alkali metal vapor[J]. Physical review, 1957, 107(6): 1559-1565.
- [12] BLOOM A L. Principles of operation of the rubidium vapor magnetometer[J]. Applied optics, 1962: 61-68.
- [13] WANG X, HAN X, YANG J. Design principle of standard system for low dc magnetic field[J]. Journal of astronautic metrology and measurement, 2007, 27(5): 28-30.
- [14] 康国发,白春华,李伟,等. 地磁长期变化和日长10年尺度波动周期特征的小波分析[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理学会第22届年会论文集. 2006.
KANG G F, BAI C H, LI W, et al. Wavelet analysis of geomagnetic long-term variation and 10-year scale fluctuation period of day length[C]//China Geophysical Society. Proceedings of the 22nd annual meeting of China Geophysical Society. 2006. (in Chinese)
- [15] YAN J, CUI J, MIAO P, et al. Study on the sensitivity calibration method of atomic magnetometer[J]. Vacuum & cryogenics, 2018, 24(4): 259-265.

(本文编辑:朱俊真)



第一作者:谢胤(1997—),男,中国石油大学(华东)测控技术与仪器专业学士,中国舰船研究院检测技术与自动化装置专业硕士研究生,主要从事光泵磁力仪方面的研究。



通讯作者:柳占新(1980—),男,研究员,硕士生导师,博士,主要从事弱磁传感器、磁计量、磁探测等领域的研究,先后承担主持多项产品的研制与课题工作。