

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.02.05

# 原子磁力仪中的检测光强噪声补偿方法研究

谢宏泰<sup>1,2</sup>, 康泽豪<sup>1</sup>

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

2. 之江实验室 量子传感研究中心, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 为解决原子磁力仪检测光强残余噪声问题, 提出了检测光强噪声数字补偿方法。首先根据原子自旋进动检测基本理论, 通过光弹调制器和锁相放大器进行线偏光的光旋角检测, 利用噪声衰减器对检测光功率进行正弦调制拟合得到补偿系数, 然后使用光弹调制器调制频率的二倍频信号对一倍频信号进行后处理修正, 实现检测光强噪声压制。得到补偿系数后可将用于幅度调制的硬件甚至前级稳光强装置移除, 仅利用数字补偿技术即可实现光强噪声抑制。搭建基于 K-Rb-<sup>21</sup>Ne 气室的磁力仪实验装置, 在无自旋交换弛豫态 (Spin-Exchange Relaxation-Free, SERF) 下开展检测光强噪声补偿实验, 结果显示光旋角检测信号的噪声被压制了 13.2 dB@3 Hz。应用此噪声补偿方法, 避免了不同光路所引入的非共模噪声, 并在前级稳光强的基础上实现了二次稳光强。此补偿方法可进行补偿系数的定期校准, 减小系统状态改变及不稳定性带来的影响, 对于提升原子磁力仪灵敏度具有重要意义。

**关键词:** 原子磁力仪; 无自旋交换弛豫; 检测噪声; 噪声补偿

**中图分类号:** TB9; O562; TP21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 02-0040-07

## Study on the noise compensation of the probe light intensity in an atomic magnetometer

XIE Hongtai<sup>1,2</sup>, KANG Zehao<sup>1</sup>

(1. Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Beijing 100095, China;

2. Quantum Sensing Center, Zhejiang Lab., Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the residual noise of the probe light intensity in atomic magnetometer, a digital compensation method is proposed. Firstly, the basic theory of Larmor process detection is adopted, and the optical rotation angle of the linearly polarized light is detected through a photoelastic modulator and a lock-in amplifier. Then, the noise eater is used to obtain the compensation coefficient by sinusoidal modulating the probe light power and fitting the curves, and then the first harmonic component is post-corrected with the second harmonic component of the modulating frequency of the photoelastic modulator to realize the noise suppression of the probe light intensity. The hardware used for the amplitude modulation and even the primary light intensity stabilization device can be removed after obtaining the compensation coefficient, and the noise suppression can be achieved by using only the digital compensation technique. An atomic magnetometer based on K-Rb-<sup>21</sup>Ne vapor is built and carried out the experiment in the spin-exchange relaxation-free

收稿日期: 2024-03-14; 修回日期: 2024-03-27

基金项目: 国家“十四五”技术基础科研项目(TC220A04Y-2)

引用格式: 谢宏泰, 康泽豪. 原子磁力仪中的检测光强噪声补偿方法研究[J]. 计测技术, 2024, 44(2): 40-46.

**Citation:** XIE H T, KANG Z H. Study on the noise compensation of the probe light intensity in an atomic magnetometer[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(2): 40-46.



(SERF) regime, in which the results shows the noise of the optical angel detection signal is suppressed by 13.2 dB@ 3Hz. By applying the noise compensation method, the non-common mode noise caused by different optical paths is avoided, and the secondary stabilization is realized on the basis of the primary stabilization of the probe light intensity. The compensation coefficient can be calibrated regularly, and the influence from the change or instability of the system is reduced. The study is important for the sensitivity improvement of atomic magnetometers.

**Key words:** atomic magnetometer; SERF; detection noise; noise compensation

## 0 引言

基于SERF<sup>[1-3]</sup>的原子磁力仪具有超高的灵敏度极限,正在成为洛伦兹及电荷共轭-宇称-时间反演对称性破缺验证<sup>[4-6]</sup>、异常相互作用力及暗物质<sup>[7-9]</sup>探寻等基础研究领域的重要工具。同时, SERF原子磁力仪在航磁探测<sup>[10-11]</sup>、心脑磁测量<sup>[12-14]</sup>等领域中的应用也受到了研究者的广泛关注。

在SERF原子磁力仪的敏感气室内,碱金属原子的电子自旋受外部磁场或惯性、异常作用力等效磁场的影响产生进动。这种进动将影响电子自旋极化率,当在相应方向上射出检测光时将会影响其光旋角<sup>[15-16]</sup>。为减小低频噪声的影响,在灵敏度要求较高的应用场景下,一般利用光弹调制器(Photoelastic Modulator, PEM)或法拉第调制器将检测光偏振态进行高频调制解调以解算出光旋角信息<sup>[17-18]</sup>。然而,在激光器自身功率抖动、光路器件机械振动和空气扰动等因素的影响下,检测光的强度噪声依然限制着SERF磁力仪的性能指标。为解决此问题,研究者们采用了多种稳光强方案,如将检测光路一分为二,用光电探测器实时监测其中一路的光功率,反馈给另一路或者主路额外引入的声光调制器、电光调制器、液晶波片或噪声衰减器等硬件进行功率闭环控制<sup>[19-21]</sup>。但所需的检测光分支并不在反馈回路当中,两条光路的差别会引入非共模噪声,限制光强稳定效果。此外,也有研究者提出将PEM调制信号的二次谐波成分反馈给检测光路中额外引入的液晶延迟片等硬件,以实现功率闭环控制从而抑制噪声<sup>[22]</sup>,但额外引入的硬件增加了成本和系统复杂度,噪声抑制效果及系统稳定度也受到限制。

针对原子磁力仪检测光强稳定系统中存在的非共模噪声以及残余噪声问题,本文提出了原子磁力仪检测光强噪声数字补偿方法。对检测光进

行幅度调制,同时采集检测系统中的一次谐波和二次谐波信号并分别进行拟合,将拟合的幅度比作为补偿系数代入相应公式,利用数字补偿方法消除一次谐波,实现光强噪声抑制。搭建基于K-Rb-<sup>21</sup>Ne气室的磁力仪装置并开展实验,对该方法的应用效果进行验证。

## 1 实验原理和装置

### 1.1 原子自旋进动检测原理

在SERF磁力仪中,敏感气室内的自旋系综动力学状态受外磁场、角速度、光场以及可能存在的异常自旋相互作用力共同影响。在泵浦光抽运下,自旋系综内发生碰撞和动量交换,电子自旋和核自旋的动力学过程可由布洛赫方程组描述,并可得到电子自旋极化率的稳态解<sup>[23-24]</sup>。检测光通过起偏器后获得高消光比的线偏性并穿过碱金属气室,而线偏振光可以看作左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的相位叠加。在电子自旋极化的作用下,这两种偏振光感受到的折射率不同,当电子自旋极化率变化时,会使折射率发生不同步的改变,通过探测出射光相对入射光的线偏振变化即光旋角 $\theta$ ,可以得到碱金属电子自旋极化率 $P_x^e$ ,  $\theta$ 与 $P_x^e$ 成正比,表达式为

$$\theta = \frac{1}{2} \ln r_e c P_x^e [-f_{D1} L(v_m - v_{D1}) + \frac{1}{2} f_{D2} L(v_m - v_{D2})] \quad (1)$$

式中: $l$ 为碱金属气室在检测光方向的长度, $n$ 为所检测Rb原子的密度, $r_e$ 为经典电子半径, $c$ 为光速, $f_{D1}$ 和 $f_{D2}$ 分别为所检测的Rb原子的D1线和D2线的振荡强度, $v_{D1}$ 和 $v_{D2}$ 分别为Rb原子的D1线和D2线的中心频率, $v_m$ 为检测光频率。

洛伦兹函数为

$$L(v_m - v_{D1}) = \frac{v_m - v_{D1}}{(v_m - v_{D1})^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (2)$$

式中: $\Gamma$ 为洛伦兹线型的半高全宽。

检测光穿过气室后的光功率 $I_{\text{out}}$ 计算公式为

$$I_{\text{out}} = I_0 e^{-D} \quad (3)$$

式中： $I_0$ 为检测光穿过气室前的功率； $D$ 为气室的光学深度， $D = n\sigma(v)l$ ； $\sigma(v)$ 为D1线的碱金属原子吸收截面， $\sigma(v) = r_e c f_{\text{D1}} L(v_m - v_{\text{D1}})$ 。

本实验中，使用PEM进行光旋角的调制测量。

PEM调制后，光电探测器接收的光功率信息 $I_t$ 为

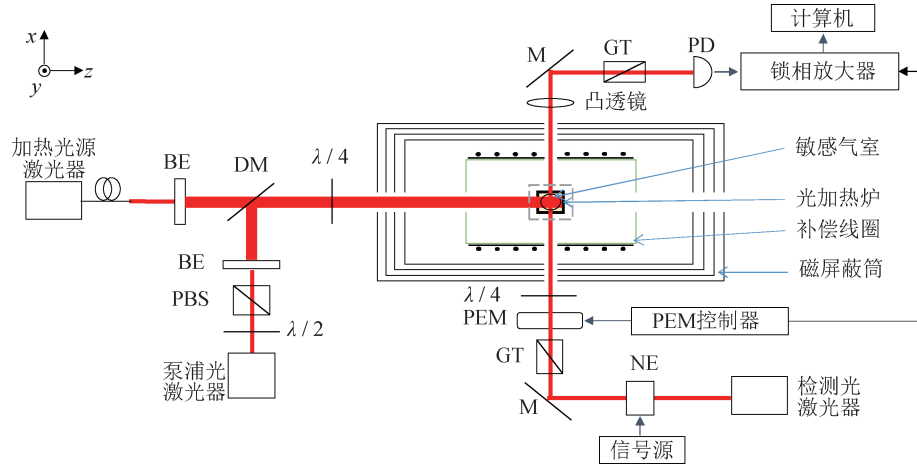
$$I_t = \frac{I_0 \delta^2}{8} + I_0 \theta \delta \sin(\omega_m t) - \frac{I_0 \delta^2}{8} \cos(2\omega_m t) + O(\delta^n) \quad (4)$$

式中： $\delta$ 为PEM调制幅度， $\omega_m$ 为调制频率， $I_0 \delta^2 / 8$

为光功率的偏置成分， $I_0 \theta \delta \sin(\omega_m t)$ 为一次谐波成分， $I_0 \delta^2 / 8 \cos(2\omega_m t)$ 为二次谐波成分， $O(\delta^n)$ 为幂级数中忽略的高次谐波成分。

## 1.2 SERF磁力仪实验装置

实验装置为基于K-Rb- $^{21}\text{Ne}$ 原子的直径为10 mm的敏感气室的共磁力仪，如图1所示。为屏蔽地磁场干扰，并提供一个极弱磁场环境以使原子进入SERF态，该装置设计有4层高磁导率铁镍合金制成的磁屏蔽结构，并通过三维磁场补偿线圈来压制剩磁。



注：BE为扩束透镜组；DM为双色镜；PBS为偏振分束器；PEM为光弹调制器；

GT为格兰泰勒棱镜；NE为噪声衰减器；PD为光电二极管。

图1 SERF原子磁力仪示意图

Fig.1 Schematic of the SERF atomic magnetometer

采用与K原子D1线共振的波长为770.108 nm的激光作为泵浦光，被抽运极化后的K原子与气室内Rb原子和惰性气体 $^{21}\text{Ne}$ 共同作用进行自旋交换碰撞光抽运。泵浦光由扩束透镜组(Beam Expender, BE)扩束准直，沿 $z$ 方向传播并覆盖气室范围，并通过 $\lambda/4$ 波片调节得到圆偏振光。

检测光为与Rb原子D1线有一定红失谐的波长为795.394 nm的线偏振激光，无需进行扩束，其光斑直径约2 mm，沿着 $x$ 方向穿过气室中心，其功率约10 mW，并由噪声衰减器(Noise Eater, NE)进行功率稳定控制。此NE模块集成了液晶延迟片、偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)、光电二极管、反馈控制单片机等硬件，不仅可以实现光功率的稳定控制，还可以外接参考电压，通过信号源提供的参考电压调制检测光功率。检

测光穿过格兰泰勒棱镜(Glan-Thompson Polarizer, GT)达到极高的偏振消光比后，由PEM以0.08 rad的幅度、50 kHz的频率进行调制，穿过气室后打入光电二极管，由锁相放大器进行解调，可得到相应的光旋角信息。

为杜绝传统电加热过程所引入的额外磁场，采用光纤激光器进行激光加热，光纤激光器的功率可由外部模拟信号进行调制控制，激光中心波长为980 nm，远离了K原子与Rb原子的原子能级，对测量无影响。激光被BE扩束至直径为14 mm，并通过双色镜与泵浦光合束，射向气室以及包裹着气室的光加热炉。光加热炉为边长14 mm的中空立方体石墨，前端开孔直径为10 mm，后端封闭，两端均吸收加热光能量并实现前后端热量平衡，以减小温度梯度。最终，光加热炉的温度可以达

到 180 °C。石墨在  $x$  方向上留有直径为 4 mm 的孔，供检测光穿过。石墨内粘贴着热电阻 PT1000，配合数字 PID、加热激光器功率控制端口形成一个温度闭环反馈系统，在 10 Hz 的采样频率下，气室温度达到稳态后波动峰峰值为 7.0 mK，波动标准差为 1.1 mK<sup>[25]</sup>。

### 1.3 光强噪声数字补偿原理和步骤

由式(4)可知，在检测系统中，检测光经过锁相放大器放大后，其解调信息可分为 PEM 调制频率的一次谐波  $V_1$  和二次谐波  $V_2$ ，即

$$V_1 = \eta M_a I_0 \theta \delta \quad (5)$$

$$V_2 = \eta M_a I_0 \frac{\delta^2}{8} \quad (6)$$

式中： $\eta$  为光电探测器的光电转换效率， $M_a$  为电流电压跨阻放大系数， $I_0$  为进入光电探测器的检测光功率， $\theta$  为包含目标磁场或者惯性信息的光旋角， $\delta$  为 PEM 调制幅度。可见一次谐波和二次谐波信号均与检测光功率线性相关。

检测光强噪声的数字补偿通过以下 3 个步骤实现：① 利用 NE 和信号源，以一定的函数对检测光进行幅度调制，调制函数可以是三角波、方波、正弦波等；② 利用锁相放大器和计算机同时采集 PEM 调制频率的一次谐波和二次谐波电压信号，分别记为  $V_1(t)$  和  $V_2(t)$ ，并根据步骤 1) 中的幅度调制函数对其进行拟合，对应的幅度拟合值分别为  $A_1$  和  $A_2$ ，幅度比(也可称为补偿系数)为  $\beta$ ， $\beta = A_1/A_2$ ；③ 一次谐波和二次谐波电压信号均与检测

光功率线性相关，可根据式(7)利用二次谐波对一次谐波进行数字补偿。

$$V_{lc}(t) = V_1(t) - \beta[V_2(t) - V_2(0)] \quad (7)$$

式中： $V_2(0)$  为初始时刻的二次谐波电压信号， $V_{lc}(t)$  为扣除了光强残余噪声的一次谐波电压信号。

基于上述步骤，原子磁力仪可工作在以下 3 种光强噪声抑制模式：① 保留 NE 和信号源，在被测物理量如惯性、磁场等达到稳态后自动定期进行光强幅度调制，并同时幅度拟合，从而定期校准补偿系数；② 得到初始的补偿系数后，保留 NE 并移除信号源，在装置的后续测量中，NE 工作在由内部参考信号提供的直流模式，并使用初始补偿系数进行数字补偿；③ 得到初始的补偿系数后，移除 NE 和信号源，在传感器的后续测量中，使用初始补偿系数进行数字补偿。

## 2 实验结果

使用偏置为 300 mV，幅度为 20 mV，频率为 2 Hz 的正弦波对 NE 进行幅度调制。在此调制条件下，测量了 100 s 的数据，分别对一次谐波和二次谐波进行拟合，然后对一次谐波进行数字补偿，以消除检测光强噪声，补偿系数  $\beta = 0.4621$ 。对 NE 进行正弦波调制时，锁相放大器的输出信号如图 2 所示，其中，黑线  $V_1$  和蓝线  $V_2$  分别对应一次谐波和二次谐波信号，绿线  $V_{1fit}$  和橘线  $V_{2fit}$  分别为相应的拟合曲线，红线  $V_{lc}$  为  $V_1$  进行光强噪声补偿修正

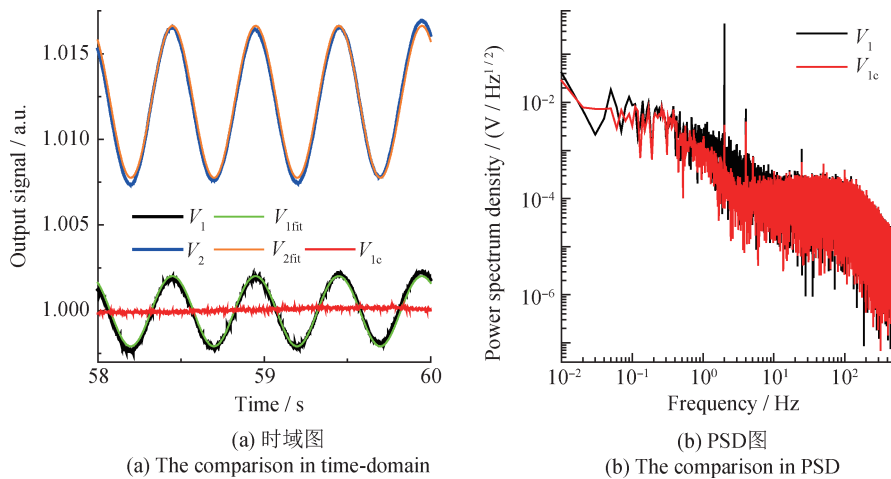


图2 对 NE 进行正弦波调制时锁相放大器的输出信号

Fig.2 The output signals of the lock-in amplifier when modulating the NE with a sinusoidal signal

后的结果。整段数据的噪声功率谱密度(Power Spectrum Density, PSD)如图2(b)所示。在NE的调制频率(2 Hz)下,补偿后噪声幅度被压制了42.1 dB,正弦调制所施加的干扰几乎被完全消除,这意味着该磁力仪可工作在保持光强幅度调制的噪声抑制模式。其他频率成分也有着不同程度的噪声压制,例如在3 Hz频率处,补偿后噪声幅度被压制了13.2 dB。

原子磁力仪也可在NE的直流模式下工作。得到补偿系数后,利用NE设置了一个与调制模式相对应的固定的偏置电压,同样测量100 s的数据并进行数字补偿。为减少高频噪声影响, $V_2(0)$ 的取值为 $V_2(t)$ 的初始5 s数据的平均值。补偿前后的结果对比如图3所示,其中,黑线 $V_1$ 和红线 $V_{1c}$ 分别

为补偿前后的输出信号, $V_1(t)$ 与 $V_{1c}(t)$ 的相对标准差分别为 $2.32 \times 10^{-4}$ 与 $1.43 \times 10^{-4}$ 。时域数据的PSD如图3(b)所示,可见低频噪声( $< 25$  Hz)被明显压制,在3 Hz处噪声被压制了12.9 dB,这与NE调制测量的模式一结果相近。需要注意的是,NE本身已经对检测光强噪声进行了压制,而利用数字补偿技术则在不使用额外硬件的条件下实现了二次噪声压制。

本实验中所使用的原子磁力仪的噪声主要来源于磁噪声而不是检测光强噪声,为了验证数字补偿技术在检测光强噪声较大情况下的效果,使用信号源对NE进行了大幅度白噪声调制,同时应用与模式二相同的数字补偿步骤,得到如图4所示的结果,其中,黑线 $V_1$ 和红线 $V_{1c}$ 分别为补偿前后

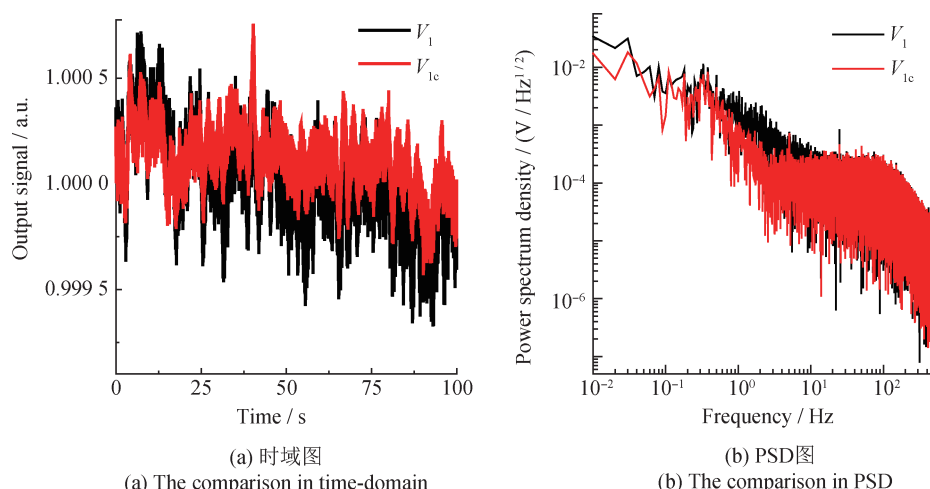


图3 当NE工作在DC模式时,数字补偿前后对比结果

Fig.3 The result when the NE was working on DC mode

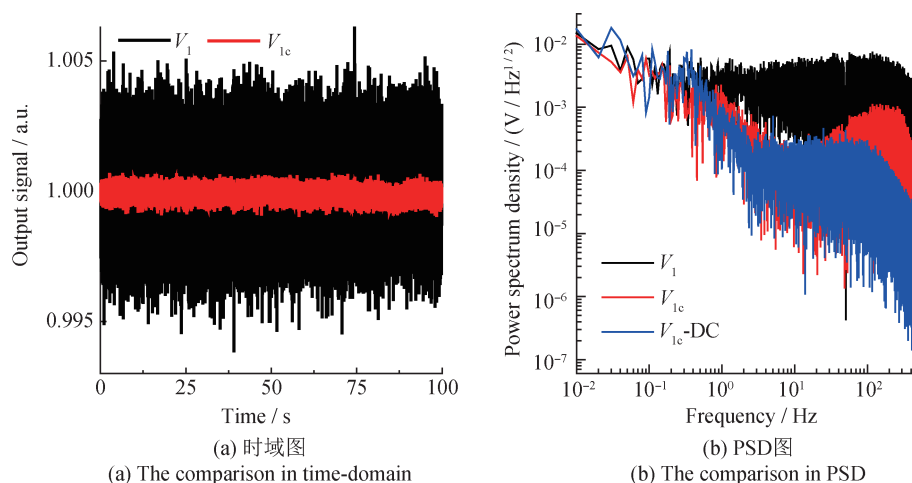


图4 当给予NE一个噪声调制时,数字补偿前后对比图

Fig.4 The result when modulate the NE with noise

的输出信号,  $V_1(t)$  与  $V_{1c}(t)$  的相对标准差分别为  $1.36 \times 10^{-3}$  与  $2.13 \times 10^{-4}$ , 这与 NE 直流模式最终补偿效果相近。时域信号对应的 PSD 如图 4(b) 所示, 可看到全频段的噪声都被显著压制, 在 3 Hz 和 10 Hz 处, 噪声分别被压制了 15.3 dB 和 27.4 dB。另外, 图 3(b) 直流模式中的补偿后结果被放进图 4(b) 中作为对比, 蓝线  $V_{1c}$ -DC 对应图 3(b) 中的  $V_{1c}$ , 可见两个模式下的补偿效果接近, 证明数字补偿技术能够高效地压制检测光强噪声。

### 3 结论

提出了原子磁力仪检测光强残余噪声数字补偿方法, 在不使用额外硬件的前提下实现了显著的稳光强效果, 并避免了传统稳光强方法中由不同光路引入的非共模噪声问题。利用信号源对检测光路上的噪声衰减器 NE 进行正弦调制并拟合得到补偿系数, 补偿后调制频率成分幅度被压制了 42.1 dB, 几乎被消除。在 3 Hz 频率上, 调制频率成分幅度则被压制了 13.2 dB。当对 NE 进行噪声调制时, 应用数字补偿方法使噪声水平明显降低, 噪声被压制了 27.4 dB@10 Hz。该方法可应用于 SERF 原子磁力仪、陀螺仪等装置, 在已有噪声衰减器的基础上进一步有效压制光强噪声, 并提升装置灵敏度, 且无需改变原有装置结构和硬件。

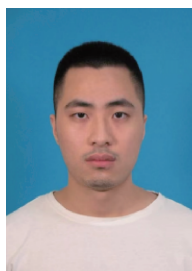
应用此检测光强数字补偿方法, 原子磁力仪可工作在 3 种光强噪声补偿模式: ① 保留 NE 和信号源, 不仅可以在 NE 对检测光旁路稳光强的基础上实现对所需检测光支路的二次稳光强, 还可减小系统状态改变或不稳定性带来的影响, 适合动态测量或者复杂环境下的测量; ② 保留 NE 并移除信号源, 同样可以实现二次稳光强, 消除残余光强噪声, 适合静态测量应用; ③ 移除 NE 和信号源, 在传感器的后续测量中, 使用初始补偿系数进行数字补偿。此模式无需使用额外硬件即可实现所需检测光支路的光强稳定, 适合小型化应用。

### 参考文献

- [1] ALLRED J C, LYMAN R N, KORNACK T W, et al. High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(13). DOI: 10.1103/PhysRevLett. 89.130801.
- [2] DANG H B, MALOOF A C, ROMALIS M V. Ultrahigh sensitivity magnetic field and magnetization measurements with an atomic magnetometer [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(15).
- [3] 李胜, 周超. 原子磁力仪的量子物理基础 [J]. *计测技术*, 2023, 43(4): 95-102.
- LI S, ZHOU C. Quantum fundamentals of atomic magnetometer [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(4): 95-102. (in Chinese)
- [4] GREENBERG O W. CPT violation implies violation of Lorentz invariance [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(23).
- [5] SMICIKLAS M, BROWN J M, CHEUK L W, et al. New test of local Lorentz invariance using a  $^{21}\text{Ne}$ -Rb-K comagnetometer [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107.
- [6] ALLMENDINGER F, HEIL H, KARPUK S, et al. New limit on Lorentz-invariance- and CPT-violating neutron spin interactions using a free-spin-precession  $^3\text{He}$ - $^{129}\text{Xe}$  comagnetometer [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112.
- [7] JI W, CHEN Y, FU C, et al. New experimental limits on exotic spin-spin-velocity-dependent interactions by using  $\text{SmCo}_5$  spin sources [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121.
- [8] AFACH S, BUCHLER B C, BUDKER D, et al. Search for topological defect dark matter with a global network of optical magnetometers [J/OL]. *Nature Physics*, 2021, 17(12): 1396-1401. [http://dx. doi. org/10.1038/s41567-021-01393-y](http://dx.doi.org/10.1038/s41567-021-01393-y).
- [9] 赵一心, 刘曦屿, 于东睿, 等. 原子磁力仪在异常作用力及类轴子暗物质探测中的应用 [J]. *计测技术*, 2023, 43(4): 1-14.
- ZHAO Y X, LIU X Y, YU D R, et al. Search for exotic force and axionlike dark matter with atomic magnetometry [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(4): 1-14. (in Chinese)
- [10] FORRESTER R, HUQ MS, AHMADI M, et al. Magnetic signature attenuation of an unmanned aircraft system for aeromagnetic survey [J]. *IEEE - ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(4): 1436-1446.
- [11] BENNETT JS, VYHNALEK BE, GREENALL H, et al. Precision magnetometers for aerospace applications: a review [J]. *Sensors*, 2021, 21(16).
- [12] BOTO E, HOLMES N, LEGGETT J, et al. Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system [J]. *Nature*, 2018, 555(7698): 657

- 661.
- [13] ZHANG R, XIAO W, DING Y D, et al. Recording brain activities in unshielded Earth's field with optically pumped atomic magnetometers [J]. *Science Advances*, 2020, 6(24).
- [14] JAZBINŠEK V, MARHL U, SANDER T. SERF-OPM usability for MEG in two-layer-shielded rooms [M]// *Flexible High Performance Magnetic Field Sensors: on-Scalp Magnetoencephalography and Other Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2022: 179–193.
- [15] WU Z, KITANO M, HAPPER W, et al. Optical determination of alkali metal vapor number density using faraday rotation [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(23): 4483–4492.
- [16] SMULLIN S J, SAVUKOV I M, VASILAKIS G, et al. Low-noise high-density alkali-metal scalar magnetometer [J]. *Physical Review A*, 2009, 80(3).
- [17] BROWN J M, SMULLIN S J, KORNACK T W, et al. New limit on Lorentz-and CPT-violating neutron spin interactions [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(15).
- [18] SELTZER S J. *Developments in alkali-metal atomic magnetometry* [M]. Princeton: Princeton University, 2008.
- [19] SHAH V, ROMALIS M V. Spin-exchange relaxation-free magnetometry using elliptically polarized light [J]. *Physical Review A*, 2009, 80(1).
- [20] KIM D I, RHEE H G, SONG J B, et al. Laser output power stabilization for direct laser writing system by using an acousto-optic modulator [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(10).
- [21] LIU F, WANG C, LI L, et al. Long-term and wideband laser intensity stabilization with an electro-optic amplitude modulator [J]. *Optics Laser Technology*, 2013, 45: 775–781.
- [22] DUAN L, FANG J, LI R, et al. Light intensity stabilization based on the second harmonic of the photoelastic modulator detection in the atomic magnetometer [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32481–32489.
- [23] KORNACK T W. *A test of CPT and Lorentz symmetry using a potassium - helium - 3 comagnetometer* [M]. Princeton: Princeton University, 2005.
- [24] VASILAKIS G. *Precision measurements of spin interactions with high density atomic* [M]. Princeton: Princeton University, 2011.
- [25] ZHAO T, LIU Y, WEI K, et al. Ultra-sensitive all-optical comagnetometer with laser heating [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55(16).

(本文编辑: 刘圣晨, 孟薇)



第一作者: 谢宏泰(1991—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为量子精密测量。