

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0691

SERF 原子自旋惯性测量检测误差分析及抑制

邢力¹, 全伟^{2,3}, 宋天晓⁴, 蔡庆中^{3,*}, 叶文⁵

(1. 中国计量科学研究院 热工计量科学研究所, 北京 100029; 2. 北京航空航天大学 前沿科学技术创新研究院, 北京 100191;
3. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191; 4. 北京航天发射技术研究所, 北京 100076; 5. 中国计量科学研究院
力学与声学计量科学研究所, 北京 100029)

摘 要: 在无自旋交换弛豫 (SERF) 原子自旋惯性测量装置中, 检测系统的性能是决定输出信号灵敏度和稳定性极限的关键因素。为有效抑制 SERF 原子自旋惯性测量的低频随机噪声, 在横向电子自旋极化率稳态解和旋光角表达式的基础上, 建立检测相关的输出信号误差机理模型, 明确了检测系统影响最终测量信号噪声的主要因素。研究结果表明: 检测光入射气室时的初始光强作为信号背景直接引起刻度系数的波动而非作用于电子自旋, 而检测光的非理想线偏振导致电子自旋产生横向抽运效应和横向光频移作用, 从而引入测量误差。针对检测系统影响测量信号噪声的主要参数, 设计了参数优化路径: 先通过优化检测光频率, 提高惯性测量刻度系数, 后通过检测光功率的优化, 减小横向抽运效应、横向光频移作用及检测光背景波动。实验表明: 通过对比输出信号的 Allan 方差, 优化后 SERF 原子自旋惯性测量的零偏不稳定性减小了 1.8 倍, 速率斜坡噪声系数从 $0.124 (^{\circ})/h^2$ 减小至 $0.041 (^{\circ})/h^2$, 达到了抑制测量信号低频随机噪声的效果。

关键词: 无自旋交换弛豫; 惯性测量; 检测系统; 误差机理; 横向抽运效应; 横向光频移; 低频随机噪声

中图分类号: V249.3; TN294

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)09-2345-06

近年来为满足高分辨率对地观测、水下勘察、航空航天等领域对惯性测量器件稳定性和灵敏度需求的提升, 亟需探索兼具超高灵敏、高稳定性能的惯性测量器件^[1-2]。惯性测量器件自诞生以来经历了机电式^[3]、光电式^[4-5]两代的变革, 然而近十年来其性能的发展进入了瓶颈期, 灵敏度与稳定性的进一步提升亟待技术手段上的突破。随着量子操控与光学探测技术的发展, 利用原子效应敏感角速率信息的方法为突破惯性测量器件性能提供了新的可能, 寄希望其能实现超高灵敏与超高稳定的惯性测量^[6-7], 原子式的惯性测量方法得到了国内外学者的广泛关注。目前原子式惯性测量器件主要采用原子干涉^[8]或原子自旋两大原理, 基于原子自旋

原理的惯性测量方法主要有核磁共振^[9]和无自旋交换弛豫 (spin-exchange relaxation-free, SERF)^[10]这 2 类。其中, SERF 原子自旋惯性测量使碱金属原子的价电子在高密度、近零磁场的环境下实现了自旋交换弛豫的大幅抑制, 惰性气体核自旋与电子自旋通过自旋交换碰撞超极化后, 可以实现角速率的敏感且其自旋磁矩发生变化, 而 SERF 态下电子自旋对核自旋产生的磁矩变化具有超高灵敏的特性^[11], 从而可实现超高灵敏的惯性测量。

SERF 原子自旋惯性测量校早于 2005 年由普林斯顿大学 Romalis 等^[10]实现, 并达到灵敏度为 $3.5 \times 10^{-5} (^{\circ}) \cdot s^{-1} \cdot Hz^{-1}$ @ 0.5 Hz, 低频角速率漂移为 $0.04 (^{\circ})/h$ 的性能指标。随后通过对装置结构及真

收稿日期: 2021-11-16; 录用日期: 2021-12-27; 网络出版时间: 2022-02-15 11:01

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220214.1617.008.html

基金项目: 国家自然科学基金 (61803015); 中国博士后科学基金 (2021M703049)

*通信作者. E-mail: qingzhong_cai@buaa.edu.cn

引用格式: 邢力, 全伟, 宋天晓, 等. SERF 原子自旋惯性测量检测误差分析及抑制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (9): 2345-2350.
XING L, QUAN W, SONG T X, et al. Error analysis and suppression of probe system for SERF atomic spin co-magnetometer [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (9): 2345-2350 (in Chinese).

空系统的改进,普林斯顿大学于 2011 年将惯性测量灵敏度提升至 $8.7 \times 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{)} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ @0.2 Hz 的水平^[12],并搭建了南极实验平台,克服了地球自转对惯性测量的影响,使低频惯性测量灵敏度达到了 $2.8 \times 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{)} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ^[13]。2009 年美国 Twinleaf 公司基于惯性测量装置的理论研究,开展了小型化低漂移 SERF 原子自旋惯性测量器件的研究,并于 2018 年发布了研究进展报告,其采用直径为 10 mm 的球形气室实现了稳定性为 0.01 (°)/h 的性能指标,此外基于阳极键合技术制成直径为 2 mm 的小型化气室和垂直腔面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL),实现了 1.6 cm³ 的物理表头体积^[14-15],证明了 SERF 原子自旋惯性测量装置具备高精度、小体积的潜力,是新一代惯性测量器件的发展方向之一。

目前, SERF 原子自旋惯性测量装置主要由抽运系统、磁屏蔽及磁补偿系统、无磁电加热系统、检测系统、原子源组成。原子自旋进动的测量主要由检测系统实现,检测方法通常基于极化了的碱金属原子对线偏振检测激光的双折射原理,因此,检测系统的性能决定了最终输出信号灵敏度及稳定性的极限,同时非理想检测光中的圆偏振成分会与原子自旋相互作用,从而引入测量误差。因此,检测系统的误差机理分析与噪声抑制,对提升惯性测量的信噪比和稳定性十分关键,本文首先利用横向电子自旋极化率的稳态解与旋光角的输出方程,分析并建立检测系统的误差模型,明确检测系统探测到的电压信号的表达式,给出惯性测量输出信号的简化误差模型,并理清检测光对输出信号造成影响的主要因素及形式,最终根据理论分析提出检测系统误差的参数优化路径,实现惯性测量输出信号信噪比的提升及低频随机噪声的抑制。

1 检测系统误差机理模型

SERF 原子自旋惯性测量中通常采用存在一定频率失谐的线偏振检测光,对电子自旋极化率在检测光方向的投影进行探测。被抽运光极化了的原

子自旋具有旋光效应,因此,线偏振检测光入射碱金属气室时,会产生双折射现象^[16],即由于线偏振检测光可被视为左旋和右旋圆偏振光的合成,而极化了的原子自旋对其折射率不同。因此,检测光入射碱金属气室后,与入射前相比会产生旋光角的变化,最终通过偏振检测方法可实现对此旋光角的探测,从而得到横向电子自旋极化率 P_x^e 的信息,检测光旋光角 θ 可表示为^[17]

$$\theta = \frac{\pi}{2} \ln r_e c P_x^e f \left[\frac{-(\nu_{\text{probe}} - \nu_1)}{(\nu_{\text{probe}} - \nu_1)^2 + (\Gamma_1/2)^2} + \frac{(\nu_{\text{probe}} - \nu_2)}{(\nu_{\text{probe}} - \nu_2)^2 + (\Gamma_2/2)^2} \right] \quad (1)$$

式中: l 为检测光通过的气室有效长度; n 为饱和蒸气压下碱金属原子数密度; r_e 为电子的经典半径; c 为光速; f 为振子强度,本实验中取常数值 1/3; ν_1 和 ν_2 分别为碱金属原子 D1 线和 D2 线的跃迁频率; ν_{probe} 为检测光的频率; Γ_1 和 Γ_2 分别为 D1 线和 D2 线压力展宽的半高全宽。

P_x^e 可通过描述 SERF 原子自旋惯性测量动力学过程的 Bloch 方程^[18] 稳态解获得,其与角速率 Ω 在一定动态范围内成正比,即有 $P_x^e \approx \gamma_e P_z^e R_{\text{tot}}^e (\tilde{Q}_y + b) / (R_{\text{tot}}^e + \gamma_e^2 (L_z + \delta B_z)^2)$ 。其中 $\tilde{Q}_y = (1/\gamma_n - Q/\gamma_e)\Omega$; γ_e 和 γ_n 分别为电子自旋和核自旋的旋磁比, Q 为电子的减慢因子, P_z^e 为沿抽运光的纵向电子自旋极化率, L_z 为纵向光频移, δB_z 为纵向磁补偿后的剩余磁场, R_{tot}^e 为电子自旋总弛豫率,其值为自旋交换弛豫率 R_{se}^e 、自旋破坏率 R_{sd}^e 、抽运光产生的纵向抽运率 R_p 及检测光产生的横向抽运率 R_m 之和, b 为包括横向剩余磁场 B_m 、横向光频移 L_m 、横向抽运率 R_m 等相关的误差项^[17]。通常采用法拉第调制、光弹调制和偏振平衡分束等检测方法,本文以最具普适性的偏振平衡分束方法为例建立检测系统的误差机理模型,基本光路示意图如图 1 所示,其由半波片与偏振分光棱镜 (polarization beam splitter, PBS) 组成差分模块,将透射光与反射光束进行差分作为包含旋光角的输出信号,该检测方法探测到的电压信号可描述为

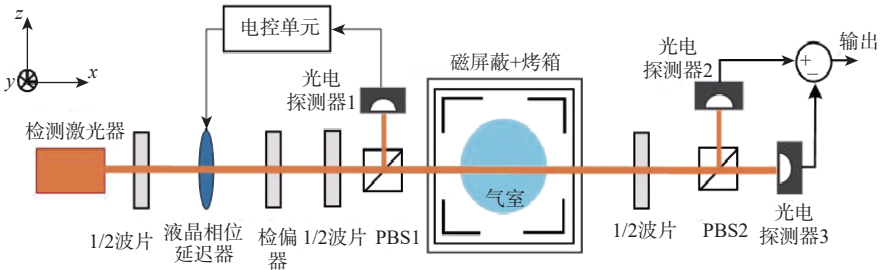


图 1 基于偏振平衡分束的检测光光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of probe beam based on polarization balance difference optical path

$$S_{\text{output}} = K_{\text{PD}} I_0 \theta =$$

$$K_{\text{PD}} \pi I_0 \ln r_e c P_x^e f \left[\frac{(\nu_{\text{probe}} - \nu_1)}{(\nu_{\text{probe}} - \nu_1)^2 + (\Gamma_1/2)^2} + \frac{(\nu_{\text{probe}} - \nu_2)}{(\nu_{\text{probe}} - \nu_2)^2 + (\Gamma_2/2)^2} \right] = K_{\text{PD}} \pi I_0 \ln r_e c f \cdot \frac{\gamma_e P_e^e R_{\text{tot}}^e}{R_{\text{tot}}^e + \gamma_e^2 (L_z + \delta B_z)^2} (\tilde{\Omega}_y + b) \cdot \left[\frac{(\nu_{\text{probe}} - \nu_1)}{(\nu_{\text{probe}} - \nu_1)^2 + (\Gamma_1/2)^2} + \frac{(\nu_{\text{probe}} - \nu_2)}{(\nu_{\text{probe}} - \nu_2)^2 + (\Gamma_2/2)^2} \right] \quad (2)$$

式中: K_{PD} 为光电二极管与前置放大器的放大倍数, 光电二极管将光强信号转换为电流信号, 然后通过前置放大器转换为电压信号, 仿真中可取 $1 \times 10^5 \text{ V/W}$; I_0 为入射气室时的检测光初始光强, 光路中通过液晶相位延迟器组成光强稳定闭环控制模块以确保 I_0 的稳定, 有效抑制检测光强波动对背景信号的影响。

通过推导出的式 (2) 可以分析出, 检测光引入惯性测量输出信号的误差主要可分为 2 类: 影响刻度系数稳定性的非直接作用于原子的误差, 以及直接作用于电子自旋而产生的电子极化率误差。由于光路光学器件及玻璃气室偏振性能的非理想性^[19], 使检测光并非理想线偏振, 而是具有一定椭圆偏振度 s_m 的偏振光, 本文的实验装置中, 入射气室前检测光的椭圆度主要取决于偏振分光棱镜的偏振性能, 使用偏振分析仪测得其椭圆度一般约为 0.02° ; 入射气室后高温下的玻璃气室对检测光有一定的退偏作用, 使其椭圆度一般约为 0.1° 。非理想线偏振检测光作用于原子自旋会引起横向抽运效果和横向光频移虚拟磁场, 从而使电子自旋极化率在横向的投影产生误差 $\delta P_{\text{probe}}^e$ 。因此, 可将检测系统相关的 SERF 原子自旋惯性测量输出信号误差模型简化为

$$S_{\text{output}} = K_g (I_0 + \delta I_0) (P_x^e + \delta P_{\text{probe}}^e) [K(\nu_{\text{probe}}) + \delta K_{\text{wave}}] \quad (3)$$

式中: $K_g = K_{\text{PD}} \pi \ln r_e c f$ 为与检测系统无关的惯性测量刻度系数项; δK_{wave} 为检测光频率波动引起的刻度系数误差。仅考虑检测系统引入的误差影响时, 导致电子自旋横向极化率误差 $\delta P_{\text{probe}}^e$ 的横向抽运率可表示为^[20]

$$R_m = \frac{I_0 \sigma(\nu_{\text{probe}})}{h \nu_{\text{probe}}} \quad (4)$$

式中: h 为普朗克常数; $\sigma(\nu_{\text{probe}})$ 为频率相关的吸收截面积, 可以看出 R_m 受检测光光强和频率的共同影响。横向电子自旋极化率的稳态解中, 与 R_m 相关项的表达式为 $P_x^e(R_m) = R_{\text{tot}}^e R_m s_m / (R_{\text{tot}}^e + \gamma_e^2 (L_z + \delta B_z)^2)$, 当

$s_m \neq 0$ 时, R_m 产生的影响则不为 0, 本文实验系统中 s_m 可近似视为不为 0 的常值, 因此, 通过减小 R_m 可以抑制该误差的影响。同时考虑检测光对碱金属原子的 D1 线和 D2 线总的能级分裂作用, 则检测光引起的横向光频移可表示为

$$L_m = \frac{\Phi(\nu_{\text{probe}}) r_e c f}{A \gamma_e} \cdot \left(\frac{-(\nu_{\text{probe}} - \nu_1)}{(\nu_{\text{probe}} - \nu_1)^2 + (\Gamma_1/2)^2} + \frac{2(\nu_{\text{probe}} - \nu_2)}{(\nu_{\text{probe}} - \nu_2)^2 + (\Gamma_2/2)^2} \right) s_m \quad (5)$$

式中: $\Phi(\nu_{\text{probe}})$ 为单模激光器的光子通量; A 为光斑面积, 光强的大小决定了 $\Phi(\nu_{\text{probe}})/A$ 的大小。当检测光椭圆偏振度 s_m 不为 0 时, 横向光频移则不为 0, 并且在光斑大小不变的情况下, 光功率和频率都对光频移产生影响。由式 (4) 和式 (5) 可知, 检测光频率对 R_m 和 L_m 的影响为非线性, 而光强对其的影响呈线性并且正相关, 因此, 合理的减小检测光功率能直接抑制 R_m 和 L_m 引起的误差。此外, 式 (3) 中 δI_0 为入射气室的检测光光强本身的波动, 其虽不作用于原子自旋, 但会直接导致惯性测量刻度系数的波动; $K(\nu_{\text{probe}}) = \frac{(\nu_{\text{probe}} - \nu_1)}{(\nu_{\text{probe}} - \nu_1)^2 + (\Gamma_1/2)^2} + \frac{(\nu_{\text{probe}} - \nu_2)}{(\nu_{\text{probe}} - \nu_2)^2 + (\Gamma_2/2)^2}$ 为与检测光频率相关的刻度系数项, 检测光频率的波动则会引入 δK_{wave} , 其影响呈洛伦兹线型。基于 3 个大气压下 K-Rb- ^{21}Ne 混合抽运系统对输出信号随检测光波长的变化进行仿真, 如图 2 所示, 可以看出通过合理优化波长可以有效增大惯性测量的刻度系数, 提高输出信号的信噪比。

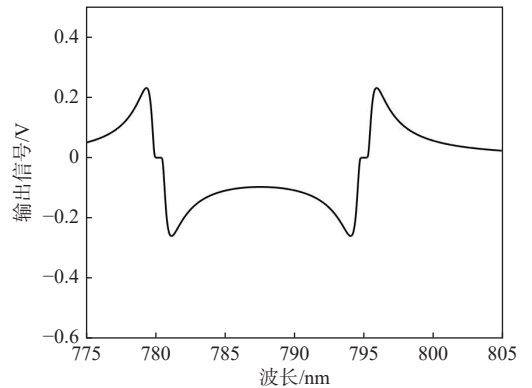


图 2 输出信号随检测光波长变化关系仿真

Fig. 2 Simulation of relationship between output signal and probe light wavelength

因此, 基于所建立的检测系统误差模型, 在保持检测光光斑大小和偏振度不变的情况下, 首先通过优化检测光频率(波长)增大 $K(\nu_{\text{probe}})$ 的值, 而后通过优化检测光功率, 抑制横向抽运效应及横向光频移的作用, 并进一步减小初始光强波动 δI_0 的影响,

最终提高惯性测量信号的信噪比。

2 实验与结果分析

2.1 检测光频率的优化

通过式 (1) 和图 2 仿真结果可知, 由于 Rb 原子的 D1 线为 $5^2S_{1/2} \sim 5^2P_{1/2}$ 的跃迁线, 其波长在 794.98 nm 附近, 当检测光波长与之对应时, 将被气室中的碱金属原子吸收, 此时检测光不能穿透气室, 导致检测灵敏度大幅降低, 惯性测量输出信号近似于 0。当检测光波长相较于碱金属原子跃迁线存在一定失谐量时, 输出信号随波长的变化反应出惯性测量刻度系数先增大后减小的趋势, 因此, 本文选取 Rb 原子 D1 线的红移部分进行检测光频率(波长)的优化。基于 2 个大气压的 K-Rb- ^{21}Ne 气室得到检测光频率优化实验结果如图 3 所示, 检测激光器采用分布反馈半导体激光管 (distributed feedback laser diode, DFB), 其波长可调范围为 794.6 ~ 796 nm。实验中检测光功率与光斑大小保持不变, 由结果可知检测光波长在 795.6 ~ 796 nm 时, SERF 惯性测量刻度系数基本不再增大, 说明其已经达到刻度系数优化的峰值, 由图 2 仿真结果可知, 若波长继续增大, 则刻度系数将呈减小趋势, 因此, 优化后选择 795.68 nm 波长点, 可得到检测激光可调频率范围内, 惯性测量最大刻度系数为 $26.13 \text{ V}/((^\circ)\cdot\text{s}^{-1})$ 。

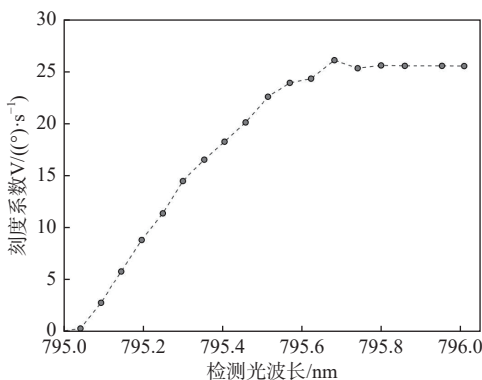


图 3 检测光波长与惯性测量刻度系数的实测关系

Fig. 3 Measurement results of relationship between probe light wavelength and scale coefficients for co-magnetometer

2.2 检测光功率的优化

通过 2.1 节对检测光频率的优化使刻度系数得到有效增大后, 保持频率不变, 对检测光功率进行优化, 抑制横向抽运效应和横向光频移的作用, 以及检测背景(即初始入射检测光强 I_0)波动, 达到提高惯性测量输出信号信噪比的效果。入射气室的检测光为直径 1 mm 的圆形光斑, 在检测激光光斑大小不变的情况下, 改变施加于 DFB 激光管的控制电流可使激光光源功率变化, 如图 4 所示, 对电流与入射气室的检测激光功率进行标定, 可以看出

两者之间为很好的线性变化关系, 通过实测点的拟合可得到关系表达式, 则能通过改变控制电流大小直接调节入射气室的检测光功率, 并且经过液晶稳光强等光路的衰减, 在控制电流允许的范围内, 入射气室的检测光功率最大为 2 mW。

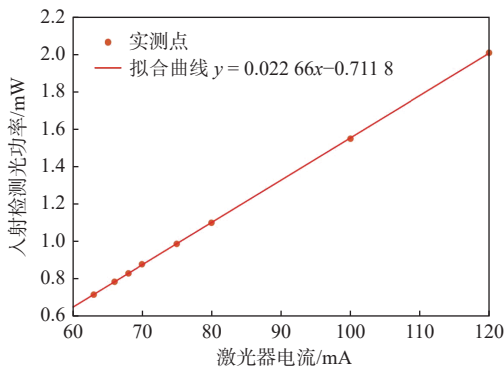


图 4 激光器控制电流与检测光功率关系标定

Fig. 4 Measurement results of relationship between laser control current and probe light power

由式 (3)~式 (5) 可知, 入射气室的检测光光强会直接影响横向抽运率 R_m 、横向光频移 L_m 和输出信号的检测背景。在光斑大小保持不变的条件下, 减小检测光功率可有效抑制 R_m 、 L_m 与检测背景 δI_0 对原子自旋的影响, 然而由于惯性测量输出信号 S_{output} 的强度与检测光初始入射光强 I_0 成正比, 减小检测光功率会导致惯性测量刻度系数线性降低, 因此, 最终输出信号信噪比的提升, 需要通过检测光功率的合理优化来实现。图 5 为检测光功率优化惯性测量输出信号 Allan 方差分析, 在不同的检测光功率下, 对长时的静态 SERF 惯性测量输出信号进行 Allan 方差分析, 对比输出信号中低频随机噪声的抑制情况, 可分析得到检测光功率优化的效果。采用 Allan 方差方法^[21]可将输出信号中的噪声按时间相关特性进行分类分析, 其可描述为

$$\sigma^2(\tau) = \frac{R^2\tau^2}{2} + \frac{K^2\tau}{2} + \frac{2}{\pi}B^2\ln 2 + \frac{N^2}{\tau} + \frac{3D^2}{\tau^2} \quad (6)$$

式中: τ 为相关时间; R 为速率斜坡系数; K 为速率随机游走系数; B 为零偏不稳定性系数; N 为角度随机游走系数; D 为量化噪声系数。以提高 SERF 原子自旋惯性测量的稳定性为目标, 则应关注信号中的低频随机噪声, 其主要表现为零偏不稳定性 and 速率斜坡噪声, 分别对应图 5 中的 A 区域和 B 区域数据段。零偏不稳定性(A 区域)斜率为 0, 该系统中其相关时间在 100 s 左右, 其值越小、相关时间越长, 代表系统信噪比水平越好; 速率斜坡(B 区域)为信号中包含的单调趋势的缓慢漂移噪声, 抑制其斜率可提升系统的长期稳定性、重复性。由图 5 的实验结果分析可知, 当入射气室的检测光功率为 2 mW

时, 信号 Allan 方差的零偏不稳定性最差, 直到光功率降低至 0.78 mW, 输出信号 Allan 方差中的零偏不稳定性最优, 并且速率斜坡噪声也得到了一定程度的抑制。当继续降低检测光功率时, Allan 方差的零偏不稳定性和速率斜坡噪声逐渐增大, 表明由于惯性测量刻度系数随 I_0 的减小, 信号的信噪比明显降低, 不利于提升系统的长期稳定性。为了更直观的对比检测光功率对信号中低频随机噪声的影响, 图 6 为不同检测光功率下 Allan 方差的零偏不稳定性和速率斜坡系数。可以看出通过检测光功率的优化, 得到最优检测光功率为 0.78 mW, 零偏不稳定性得到了 1.8 倍的抑制, 速率斜坡噪声系数从 $0.124\text{ }(^{\circ})/\text{h}^2$ 减小至 $0.041\text{ }(^{\circ})/\text{h}^2$, 得到了 3 倍的抑制效果, 因此, 证明检测光功率的优化可有效抑制横向抽运率、横向光频移和光强引起的趋势项漂移, 从而提高输出信号的信噪比及稳定性。

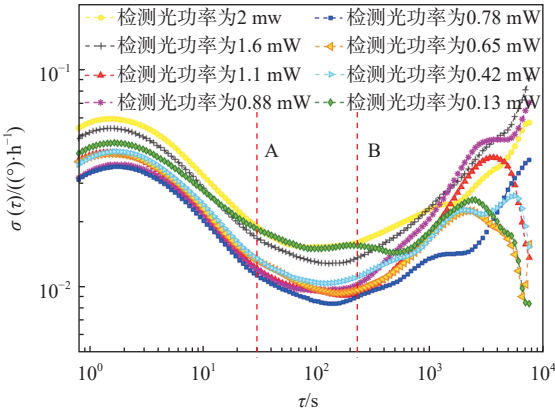


图 5 检测光功率优化惯性测量输出信号 Allan 方差分析
Fig. 5 Allan variance analysis for output signals of the co-magnetometer optimized by probe light power

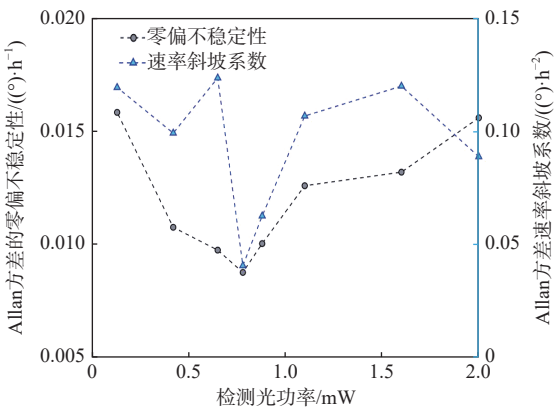


图 6 不同检测光功率下 Allan 方差的零偏不稳定性和速率斜坡系数
Fig. 6 Bias instability and rate ramp coefficient of Allan variance under different probe light power

3 结 论

1) 明确检测光引入输出信号的误差主要可分

为 2 类: 影响刻度系数稳定性的非直接作用于原子的误差, 以及直接作用于电子自旋而产生的电子极化率误差。

2) 在检测光椭圆偏振度不为 0 的情况下, 检测光功率和频率都对横向抽运效应和横向光频移产生影响, 其中检测光频率的影响为非线性, 而光功率对其的影响呈线性并且正相关。

3) 检测光频率对惯性测量的刻度系数的影响呈现洛伦兹线形, 因此, 优化检测光频率可有效增大惯性测量刻度系数, 并且存在最优失谐频率点。

4) 信号本底噪声水平主要取决于检测光功率的噪声水平, 同时由于检测光为非理想线偏振, 在检测光光斑大小不变的情况下, 光功率的增大虽然会线性增大刻度系数, 但还会导致横向抽运率和横向光频移的增大, 从而引起测量误差, 因此, 优化检测光功率可有效抑制惯性测量信号的低频随机噪声。

5) 在误差模型建立的基础上, 对关键参数进行优化, 最终输出信号中的零偏不稳定性抑制了 1.8 倍, 速率斜坡噪声系数则得到了 3 倍的抑制, 有效提高了惯性测量的信噪比及稳定性。

参考文献 (References)

[1] 郭雷, 房建成. 导航制导与传感技术研究领域若干问题的思考与展望[J]. 中国科学:信息科学, 2017, 47(9): 1198-1208.
GUO L, FANG J C. Recent prospects on some problems of navigation guidance and sensing technology[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2017, 47(9): 1198-1208(in Chinese).
[2] 薛连莉, 陈少春, 陈效真. 2017年国外惯性技术发展回顾[J]. 导航与控制, 2018, 17(2): 1-9.
XUE L L, CHEN S C, CHEN X Z. Development and review of foreign inertial technology in 2017[J]. Navigation and Control, 2018, 17(2): 1-9(in Chinese).
[3] HU Z X, GALLACHER B J. Effects of nonlinearity on the angular drift error of an electrostatic MEMS rate integrating gyroscope[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(22): 10271-10280.
[4] LEFÈVRE H C. The fiber-optic gyroscope[M]. Boston: Artech House, 1993.
[5] LEE B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57-79.
[6] KETTERLE W. Nobel lecture: When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(4): 1131-1151.
[7] CHU S. Cold atoms and quantum control[J]. Nature, 2002, 416(6877): 206-210.
[8] GUSTAVSON T L, BOUYER P, KASEVICH M A. Precision rotation measurements with an atom interferometer gyroscope[J]. Physical Review Letters, 1997, 78(11): 2046-2049.
[9] WOODMAN K F, FRANKS P W, RICHARDS M D. The nuclear magnetic resonance gyroscope: A review[J]. Journal of Navigation, 1987, 40(3): 366-384.
[10] KORNACK T W, GHOSH R K, ROMALIS M V. Nuclear spin

- gyroscope based on an atomic comagnetometer[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(23): 230801.
- [11] 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): 130801.
- [12] SMICKLAS M A, BROWN J M, CHEUK L W, et al. New test of local Lorentz invariance using a ^{21}Ne -Rb-K Comagnetometer[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(17): 171604.
- [13] SMICKLAS M A, ROMALIS M V. Test of Lorentz invariance with Rb- ^{21}Ne co-magnetometer at the south pole[C]//*Proceedings of the Sixth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry*. Bloomington: World Scientific Publishing House, 2014: 95-98.
- [14] ROMALIS M V, KORNACK T. Chip-scale combinatorial atomic navigator (C-SCAN) low drift nuclear spin gyroscope: 125560431[R]. Princeton: Princeton University, 2018.
- [15] LIMES M E, SHENG D, ROMALIS M V. ^3He - ^{129}Xe comagnetometry using ^{87}Rb detection and decoupling[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(3): 033401.
- [16] BUDKER D, GAWLIK W, KIMBALL D F, et al. Resonant nonlinear magneto-optical effects in atoms[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74(4): 1153-1201.
- [17] XING L, ZHAI Y Y, FAN W F, et al. Miniaturized optical rotation detection system based on liquid crystal variable retarder in a K-Rb- ^{21}Ne gyroscope[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38061.
- [18] VASILAKIS G. Precision measurements of spin interactions with high density atomic vapors[D]. Princeton: Princeton University, 2011.
- [19] CHOUDHURI A R. Classical electrodynamics[J]. *Current Science*, 2015, 109(3): 632-633.
- [20] KORNACK T W. A test of CPT and Lorentz symmetry using a K- ^3He co-magnetometer[D]. Princeton: Princeton University, 2005.
- [21] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- ZHANG G C. The principles and technologies of fiber-optic gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008 (in Chinese).

Error analysis and suppression of probe system for SERF atomic spin co-magnetometer

XING Li¹, QUAN Wei^{2,3}, SONG Tianxiao⁴, CAI Qingzhong^{3,*}, YE Wen⁵

(1. Division of Thermophysics and Process Measurements, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

2. Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

4. Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China;

5. Division of Mechanics and Acoustic Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: The performance of the probe system is the key factor to determine the sensitivity and stability limit of the spin-exchange relaxation-free (SERF) atomic spin co-magnetometer for inertial measurement. In order to suppress the low-frequency random noise in SERF auto spin co-magnetometer, the error mechanism model for the probe system is established based on the steady-state solution of transverse electron spin polarization and optical rotation angle. The main factors affecting the output signal of the probe system are clarified. According to model analysis, the initial probe light intensity incident on the vapor cell as the signal background directly causes the fluctuation of the scale coefficient rather than the electron spins. In addition, the non-ideal linear polarization of probe light affects the electron spins in a transverse pumping manner and causes a light shift, both of which can cause measurement error. Aiming at the main parameters affecting the noise, the optimization path has been proposed. The probe light frequency has been first optimized to increase the scale coefficient of inertial measurement. Then the transverse pumping rate, light shift, and background fluctuation have been reduced by optimizing the probe light intensity. According to the analysis of Allan variance, the bias instability of SERF auto spin co-magnetometer is suppressed by 1.8 times, and the coefficients of rate ramp are reduced from $0.124\text{ }(^{\circ})/\text{h}^2$ to $0.041\text{ }(^{\circ})/\text{h}^2$. Therefore, the effect of reducing the low-frequency random noise in the output signal is achieved.

Keywords: spin-exchange relaxation-free; inertial measurement; probe system; error mechanism; transverse pumping effect; transverse light-shift; low-frequency random noise

Received: 2021-11-16; **Accepted:** 2021-12-27; **Published Online:** 2022-02-15 11:01

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220214.1617.008.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61803015); China Postdoctoral Science Foundation (2021M703049)

* **Corresponding author.** E-mail: qingzhong_cai@buaa.edu.cn