

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.02.03

用于原子干涉仪激光频率锁定的集成化系统

许云鹏, 赵远, 汪子楷, 鲍莹莹, 胡栋, 王宇*

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 为提升原子干涉仪的小型化程度和稳定性, 研发用于原子干涉仪激光频率锁定的集成化系统。采用集成化电路系统进行稳频光谱信号采集、调制与解调, 利用 ZYNQ 型全可编程片上系统完成数字比例微积分(Proportion Integration Differentiation, PID)功能, 实现激光频率的低噪声快速锁定。集成后的调制解调模块电路面积仅为 $77\text{ mm} \times 113\text{ mm}$, 能够满足激光器锁定在大多数碱性原子能级的使用需求。开展实验对用于原子干涉仪激光频率锁定的集成化系统的性能进行验证, 结果表明: 激光器频率锁定后频率波动为 $98.81\text{ kHz}@7\text{ h}$; 激光频率的重新锁定时间为 $600\text{ }\mu\text{s}@100\text{ MHz}$; 在 100 h 的长期测量中未产生脱锁情况。该系统为推动原子干涉仪在地质研究和资源勘探等复杂环境下的应用提供了有力支撑。

关键词: 原子干涉仪; 激光频率锁定; 集成化系统; 调制转移光谱; 小型化

中图分类号: TB96; O43

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 02-0033-07

Integrated system for atomic interferometer laser frequency locking

XU Yunpeng, ZHAO Yuan, WANG Zikai, BAO Yingying, HU Dong, WANG Yu*

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: An integrated system for laser frequency locking of atomic interferometers was developed in order to improve the miniaturization and stability of atomic interferometers. The integrated circuit system is used for frequency stabilized spectral signal acquisition, modulation and demodulation, and ZYNQ is used to complete the digital Proportional Integration Differentiation (PID) function to realize the low-noise and fast locking of the laser frequency. The integrated modem module has a circuit area of only $77\text{ mm} \times 113\text{ mm}$, which is capable of meeting the laser locking requirements for use in most alkaline atomic energy stages. Experiments were conducted to verify the performance of the integrated system for laser frequency locking in atomic interferometers, and the results show that: the frequency fluctuation after laser frequency locking is $98.81\text{ kHz}@7\text{ h}$; the re-locking time of the laser frequency is $600\text{ }\mu\text{s}@100\text{ MHz}$; and there is no de-locking in a long-term measurement of 100 h . This system provides a strong support for promoting the application of atomic interferometer in complex environments such as geological research and resource exploration.

Key words: atom interferometer; laser frequency locking; integrated system; modulation transfer spectroscopy; miniaturization

收稿日期: 2025-01-14; 修回日期: 2025-02-11

引用格式: 许云鹏, 赵远, 汪子楷, 等. 用于原子干涉仪激光频率锁定的集成化系统[J]. 计测技术, 2025, 45(2): 33-39.

Citation: XU Y P, ZHAO Y, WANG Z K, et al. Integrated system for atomic interferometer laser frequency locking[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(2): 33-39.



0 引言

地球重力场信息是研究地球内部结构和活动的重要依据,在地震研究、地下资源勘探等领域应用广泛^[1-6]。原子干涉仪是测量地球重力场信息的重要设备,具有高精度、能够实现长连续绝对重力测量等优点,已成为目前惯性传感领域的重点研究对象之一。

原子干涉仪基于原子与激光的相互作用,通过干涉将原子的相位转化为激光的相位进行测量,以原子重力仪为例,激光的频率波动直接影响重力测量结果。研究人员采用激光频率锁定技术,将激光频率锁定在原子或分子的超稳定特征跃迁谱线上,以抑制激光器自身的频率波动。常见的锁频方式有饱和吸收谱(Saturated Absorption Spectroscopy, SAS)锁频^[7]、消多普勒双色谱(Dichroic Atomic Vapour Laser Lock, DAVLL)锁频^[8]、调频光谱(Frequency Modulation Spectroscopy, FMS)锁频^[9]、调制转移光谱(Modulation Transfer Spectroscopy, MTS)锁频^[10]、电压转换(Frequency Voltage Converter, FVC)锁频^[11]等。在实验室环境中,使用上述锁频方式可满足基本的实验需求,但当频率锁定系统处于外界环境时,复杂的环境变化(温度、湿度变化等)极易使激光器脱离锁定状态,对后续的测量产生不良影响。针对此问题,国内外研究团队提出了多种自动锁频技术方案。中国科学院国家授时中心张首刚团队设计了基于饱和吸收谐波的自动稳频系统,该系统可连续运行1个月以上,脱锁后重锁的时间小于1 s,锁定后线宽为5 MHz^[12]。中国科学院上海光学精密机械研究所吉经纬等人研制了用于可搬运铷(Rb)原子钟的饱和吸收自动稳频系统,该系统的长期锁定时间在1个月以上,脱锁后重锁时间在4 s以内^[13]。德国洪堡大学的研究人员设计了激光自动锁频方案,并成功将其应用于星载实验中^[14]。

在动态原子干涉仪领域,由于其工作环境复杂,对激光频率的锁定点切换时间、频率锁定系统的体积和稳定性提出了更高要求。为提升原子干涉仪的小型化程度和稳定性,并实现激光频率的快速锁定,本文基于调制转移光谱技术,设计

了一款用于原子干涉仪的激光频率锁定系统。采用集成化电路设计方式,使系统体积明显减小,提升了系统便携性。自动稳频装置的光电二极管输出端同时输出铷原子饱和吸收光谱和调制转移光谱,并分别调节输入电光调制器的频率及相位,以获得更优的饱和吸收信号。利用原子干涉仪开展锁频实验,对该系统的锁定时间以及长期锁定性能进行验证。

1 调制转移光谱基本原理

调制转移光谱稳频本质上是一种基于简并四波混频效应的激光频率锁定技术,其基本原理是将泵浦光的调制信息转移到探测光后,通过光电二极管对探测光及其边带的拍频信号进行测量,经过滤波和解调后即可得到调制转移光谱信号。

激光器输出的激光经过偏振分束棱镜分成探测光和泵浦光两部分,泵浦光经电光调制器调制后,其电场矢量 E 可表示为^[15]

$$E = E_0 \left[\sum_{n=0}^{\infty} J_n(\beta) \sin(\omega_c + n\omega_m)t + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_n(\beta) \sin(\omega_c - n\omega_m)t \right] \quad (1)$$

式中: E_0 为光场电矢量振幅, ω_c 为调制前激光频率, ω_m 为调制频率, β 为调制深度, $J_n(\beta)$ 为 n 阶贝塞尔函数, t 为时间。调制后的泵浦光和探测光在Rb原子气室中相向传播。

当满足亚多普勒共振条件时,泵浦光的边带会转移至探测光上,此时光电二极管接收到的拍频信号 $S(\omega_m)$ 的计算公式如式(2)所示,吸收线性 L_n 的计算公式如式(3)所示,色散线性 D_n 的计算公式如式(4)所示。

$$S(\omega_m) = \frac{C}{\sqrt{\Gamma^2 + \omega_m^2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) J_{n-1}(\beta) \cdot [(L_{(n+1)/2} + L_{(n-2)/2}) \cos(\omega_m t + \varphi) + (D_{(n+1)/2} + D_{(n-2)/2}) \sin(\omega_m t + \varphi)] \quad (2)$$

$$L_n = \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + (\Delta\omega - n\Delta\omega_m)^2} \quad (3)$$

$$D_n = \frac{\Gamma(\Delta\omega - n\Delta\omega_m)}{\Gamma^2 + (\Delta\omega - n\Delta\omega_m)^2} \quad (4)$$

式中: Γ 为自然线宽, $\Delta\omega$ 为激光频率相对于亚多普勒谐振中心的失谐, φ 为加在饱和光上的调制相位, C 为其他因素产生影响引入的参数。

由式(2)~式(4)可知:调制相位和调制频率直接对调制转移光谱的信号线性产生影响。通过对光电二极管拍频信号进行计算可知:当 $\beta = 1.1$, $\varphi = \pi$, $\omega_m / \Gamma = 0.67$ 时,信号的斜率最大。

2 调制转移光谱稳频方案设计

基于调制转移光谱的激光自动稳频装置^[16]如图1所示,激光器输出的中心波长为1 560 nm的激光经过放大和倍频后分为两路:一路作为主输出;另一路用于激光频率锁定。频率锁定的激光一部分被电光调制器(Electro-Optic Modulator, EOM)调制产生泵浦光,另一部分作为探测光。2束光在Rb泡中形成四波混频效应后,探测光被光电二极管采集,利用解调电路解调得到误差信号,自动锁频装置判断误差峰的零点,然后反馈激光器完成激光频率的锁定。

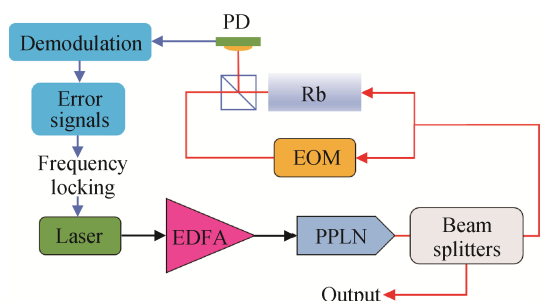


图1 基于调制转移光谱的激光自动稳频装置

Fig.1 Automatic laser frequency stabilization device based on modulation transfer spectroscopy

激光器经上述反馈控制后被锁定在 $^{87}\text{Rb } 5^2\text{S}_{1/2}$, $F = 2 \rightarrow 5^2\text{S}_{2/3}$, $F = 3$ 的跃迁峰上,当外界环境发生变化时,自动锁频装置通过实时反馈激光器实现激光频率长期稳定。

2.1 解调电路方案与设计

基于调制转移光谱的自动稳频装置的解调模块方案如图2所示,利用单片机芯片进行主控制,提升了模块通用性,除此之外还增加了ZYNQ接口,可由ZYNQ直接控制解调模块,有助于实现模块的集成化和小型化。电路主体分为3部分:①半导体制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC)温控模块:单片机芯片(STM32F1型)采集到负温度系数(Negative Temperature Coefficient, NTC)热敏电阻的值后,

反馈给半导体控制器芯片(MAX1968型)来控制Rb泡的温度,减小外界环境变化对信噪比的影响;②光电二极管(Photodiode, PD)模块:稳频探测光经过调制转移光路被光电二极管采集,由Bias-T电路分别输出交流(Alternating Current, AC)和直流(Direct current, DC)信号,AC信号经过解调输出MTS的误差信号,DC信号除了可用于输出Rb原子的饱和吸收信号外,还可以检测输入稳频光路中的激光功率变化。③调制解调电路模块:STM32F1芯片控制直接数字式频率合成器芯片(AD9958型)的两路输出信号的频率、幅度和相位——其中一路经过放大后输出给EOM,完成对稳频光路中泵浦光的调制;另一路与PD采集的信号进行混频,经过跟随-放大-滤波-跟随后,输出误差信号用来锁定激光频率。

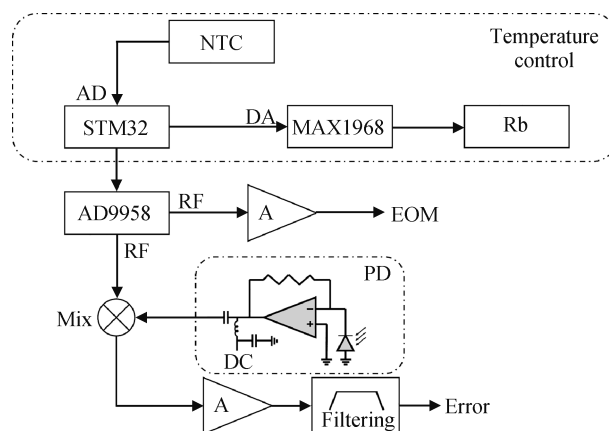


图2 调制转移光谱解调模块总体方案

Fig.2 Overall scheme of the modulation transfer spectral demodulation module

采用两路直接数字式频率合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS)芯片作为调制信号和解调信号的频率输出源。采用同一时钟作为参考,保证两路输出的相位和频率的相对一致性。后端使用九阶可调滤波电路,滤除谐波和杂波。此调制解调模块可满足激光器锁定在大多数碱性原子谱线频率的需求。调制解调模块装置如图3所示,PD放大电路如图4所示。集成化后的解调板电路面积仅为77 mm × 113 mm。

最终得到的MTS的误差信号如图5所示,图5上方为原子饱和吸收信号,下方为解调后的MTS

误差信号,解调后信号的峰峰值与噪声峰峰值之比为150:1。

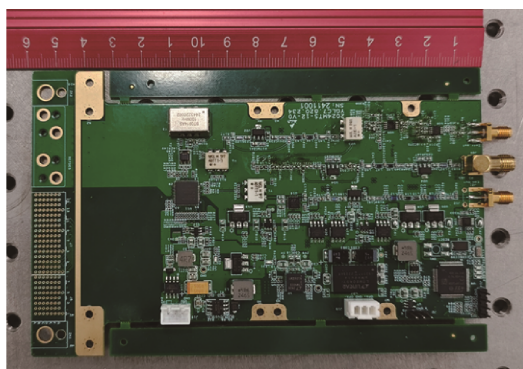
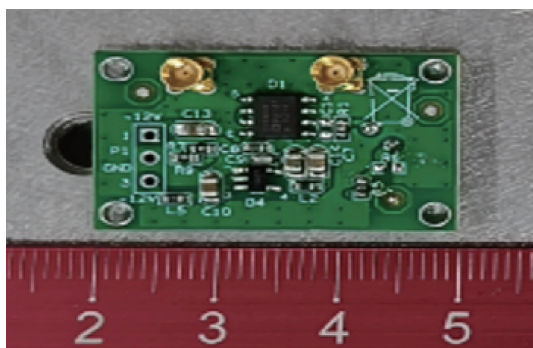


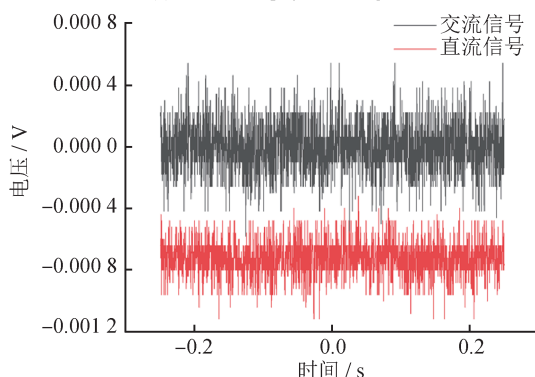
图3 调制解调模块装置实物图

Fig.3 Physical diagram of the modem module device



(a) PD电路实物图

(a) PD circuit physical diagram



(b) PD电路底噪

(b) PD circuit floor noise

图4 PD放大电路

Fig.4 PD amplification circuit

2.2 激光频率锁定功能

进行激光频率锁定时,由MTS输出的信号被模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)采集,进行寻峰算法判断。如图6所示,当扫描到的误差信号幅值大于设定PID模块的锁定阈值(紫色点)时,开始记录误差信号;当误差信号为0 mV时(红

色点),开启PID进入锁定状态,完成激光器频率的自动锁定。

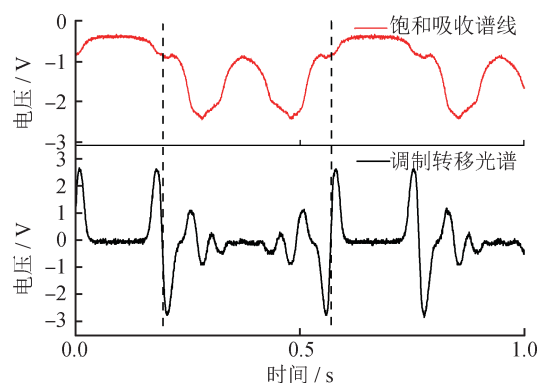


图5 MTS误差信号

Fig.5 MTS error signal

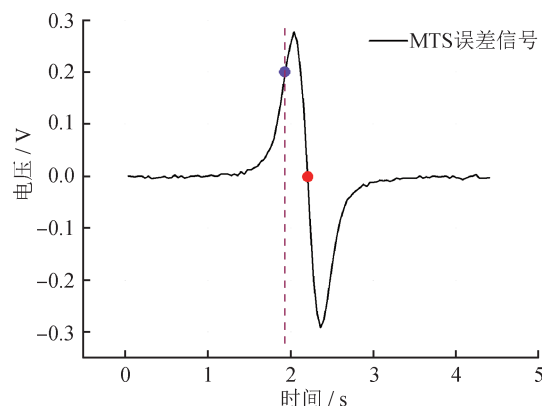


图6 激光频率锁定误差信号示意图

Fig.6 Schematic of laser frequency locking error signal

当激光器需要锁定在其他频率时,数模转换器(Digital to Analog, DA)模块根据电压与频率之间的关系,输出1个前馈电压,减小激光频率与待锁定频率之间的频差,然后开启三角波扫描,后续状态与自动锁定模式相同。当需要改变激光器输出频率时,ZYNQ控制射频驱动频率来改变EOM调制频率,最终EOM边带产生的MTS误差信号的位置发生变化。此时DA模块改变输出电压,缩小激光器与待锁定点之间的频差后,开启三角波扫描激光频率。扫描到误差信号时运行自动锁频算法,最终完成激光频率的锁定。激光频率快速锁定方案如图7所示,采用前馈电压加扫描电压锁定的方式,使激光器频率与锁定点之间的频率减小,提升了锁定速度。在算法方面,优化了寻峰扫描逻辑,只需寻得半个峰即可完成锁定,寻峰时间

明显减少,效率显著提升。

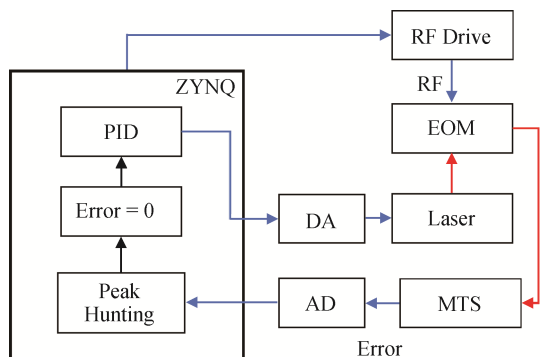


图7 激光频率快速锁定方案图

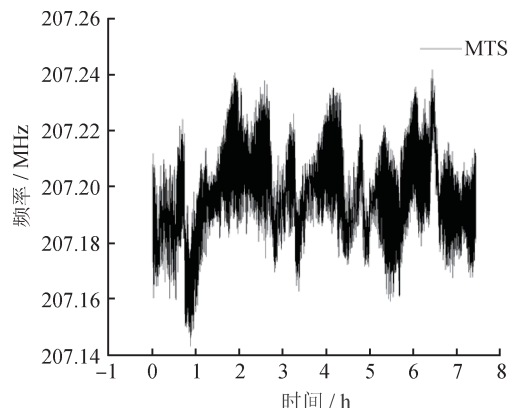
Fig.7 Diagram of laser frequency fast locking scheme

3 分析与讨论

激光器锁定后,可通过误差信号评估激光器的频率稳定性,由锁频模块对MTS误差信号进行1 MHz的数字低通滤波,优化信噪比后,进行激光频率长期锁定。实验中采用一台锁定在 $^{87}\text{Rb } F = 2 \rightarrow F' = 3$ 的参考激光器与实验装置进行拍频,由于二者频率相近,在稳频光路输入端增加声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)移动激光频率,用频率计数器(数据采样率为1 Hz)采集频差,激光频率锁定结果如图8所示。

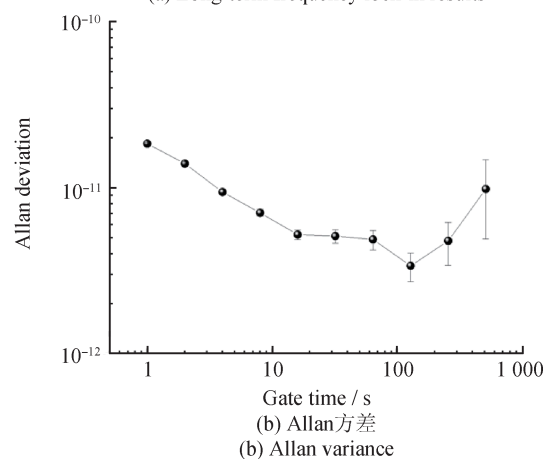
图8(a)为长期锁定频率结果,在7.5 h的监测时间内,频率波动为98.81 kHz,此频率波动下,对应引入 $\pm 0.1286 \mu\text{Gal}$ 的重力值变化。频率波动包含2台激光器的相对漂移,实际频率抖动应小于98.81 kHz。Allan方差如图8(b)所示,由于采用了2台激光器拍频,频率Allan方差应为图示的 $1/\sqrt{2}$ 倍。积分时间1 s的Allan方差为 1.31×10^{-11} ,在128 s时Allan方差为 1.46×10^{-12} 。

激光频率重新锁定数据结果如图9所示,红色线为输入激光器电流调制端的调制信号,黑色线为MTS的误差信号。实验开始前,为了提升锁定速度,选取1 kHz的三角波扫描周期进行扫描。开始实验时,首先关闭PID锁定模块,此时激光器处于脱锁状态,使用波长计测量得出激光频率与锁定后频率间隔为100 MHz。在500 μs 时,打开PID模块,此时DA模块发出三角波进行扫描并锁定,锁定时间为600 $\mu\text{s}@100 \text{ MHz}$ 。



(a) 长期锁定频率结果

(a) Long-term frequency lock-in results



(b) Allan方差

(b) Allan variance

图8 激光频率锁定图

Fig.8 Laser frequency long-term locking diagram

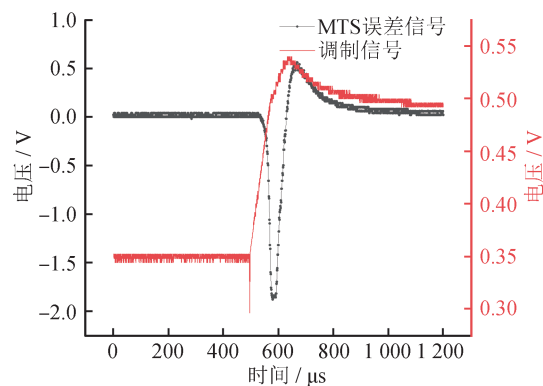


图9 激光频率重新锁定数据结果图

Fig.9 Plot of laser frequency re-locking data results

此稳频系统已经应用于动态原子干涉仪并完成国内首次机载测量实验^[17]。在静态环境中,干涉时间 $T = 20 \text{ ms}$ 的条件下,最终获得重力值与潮汐模型如图10所示,为了保护重力信息,对数据进行了去固定偏置处理。根据实验结果可知:在100 h的长期测量中,激光频率锁定装置正常工作,

未发生脱锁情况。

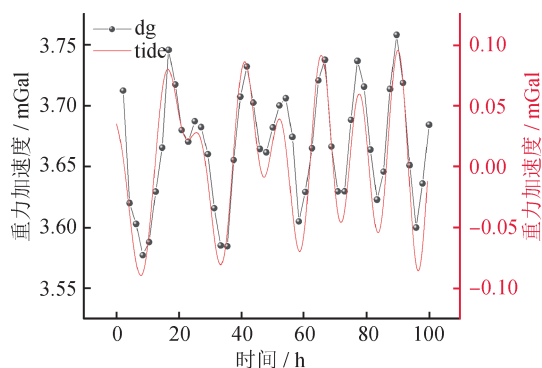


图10 重力测量潮汐图

Fig.10 Gravimetric tide map

4 结论

研制了一套用于原子干涉仪的激光频率锁定集成化系统,该系统体积较小,集成化后的解调板电路面积仅为 $77\text{ mm} \times 113\text{ mm}$,PD 面积仅为 $20\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,极大地提升了系统的便携性。开展实验对该系统的性能进行验证,结果表明:该系统重锁时间为 $600\text{ }\mu\text{s}@100\text{ MHz}$,积分时间 1 s 的 Allan 方差为 1.31×10^{-11} ,长期频率波动为 $98.81\text{ kHz}@7\text{ h}$,表现出较好的频率锁定效果。该系统为实现原子干涉仪高带宽测量的工程化应用提供了技术保障,为推动原子干涉仪在空间和深海探测等复杂环境下的应用提供了重要支撑,对于促进量子精密测量技术发展具有积极意义。后续将优化芯片布局和寻峰算法,进一步提升此集成化系统的可靠性和稳定性。

参考文献

- [1] ANTONI-MICOLIER L, CARBONE D, MÉNORET V, et al. Detecting volcano-related underground mass changes with a quantum gravimeter[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(13). DOI: 10.1029/2022GL097814.
- [2] WU X, PAGEL Z, MALEK B S, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer [J]. *Science Advances*, 2019, 5(9). DOI: 10.1126/sciadv.aax0800.
- [3] BIDEL Y, ZAHZAM N, BLANCHARD C, et al. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1). DOI: 10.1038/s41467-018-03040-2.
- [4] BIDEL Y, ZAHZAM N, BRESSON A, et al. Absolute airborne gravimetry with a cold atom sensor[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(2). DOI: 10.1007/s00190-020-01350-2.
- [5] CANNAVÒ F, SCIOTTO M, CANNATA A, et al. An integrated geophysical approach to track magma intrusion: the 2018 christmas eve eruption at mount etna[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(14). DOI: 10.1029/2019GL083120.
- [6] CARBONE D, POLAND M P. Gravity fluctuations induced by magma convection at Kilauea Volcano, Hawai'i [J]. *Geology*, 2012, 40(9): 803-806.
- [7] LIU X, BOUDOT R. A distributed-feedback diode laser frequency stabilized on doppler-free Cs line [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(10): 2852-2855.
- [8] MILLETT-SIKKING A, HUGHES I G, TIERNEY P, et al. DAVLL lineshapes in atomic rubidium[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2006, 40(1): 187-198.
- [9] BJORKLUND G C. Frequency-modulation spectroscopy: a new method for measuring weak absorptions and dispersions[J]. *Optics Letters*, 1980, 5(1): 15-17.
- [10] MCCARRON D J, KING S A, CORNISH S L. Modulation transfer spectroscopy in atomic rubidium [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(10). DOI: 10.1088/0957-0233/19/10/105601.
- [11] 韩顺利. 拉曼脉冲型原子干涉仪的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
HAN S L. Research on Raman-pulse-assisted atom interferometer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- [12] 鱼志健, 薛文祥, 赵文宇, 等. 用于 POP 铷原子钟的 DFB 激光器自动稳频技术研究[J]. *时间频率学报*, 2015, 38(3): 129-138.
YU Z J, XUE W X, ZHAO W Y, et al. Automatic frequency stabilization system of DFB diode laser for POP Rb atomic clock[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2015, 38(3): 129-138. (in Chinese)
- [13] 吉经纬, 程鹤楠, 张镇, 等. 可搬运铷喷泉原子钟全自动激光稳频系统[J]. *光学学报*, 2020, 40(22): 157-163.
JI J W, CHENG H N, ZHANG Z, et al. Automatic laser frequency stabilization system for transportable ^{87}Rb fountain

- tain clock[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 157-163. (in Chinese)
- [14] MALTE S. A mobile high-precision gravimeter based on atom interferometry[D]. Berlin: Humboldt Universität zu Berlin, 2011.
- [15] 洪毅, 侯霞, 陈迪俊, 等. 基于 Rb^{87} 调制转移光谱稳频技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 21-28.
HONG Y, HOU X, CHEN D J, et al. Research on frequency stabilization technology of modulation transfer spectroscopy based on Rb^{87} [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 21-28. (in Chinese)
- [16] 贾钧洁, 赵远, 汪子楷, 等. 用于铷原子干涉仪的小型化光路设计[J]. 计测技术, 2024, 44(6): 50-58.
JIA J J, ZHAO Y, WANG Z K, et al. Design of miniaturized optical system for ^{87}Rb atom interferometer [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(6): 50-58. (in Chinese)
- [17] 赵远, 郭梅影, 许云鹏, 等. 基于冷原子干涉原理的机载绝对重力测量[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 115-117.
ZHAO Y, GUO M Y, XU Y P, et al. Airborne absolute-gravity measurement based on cold atom interferometry

principle [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 115-117. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 许云鹏(1996—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事动态原子干涉仪等研究。



通信作者: 王宇(1978—), 男, 研究员, 博士, 中国航空工业集团首席技术专家, 中国振动工程学会振噪控制专业委员会副秘书长、常务理事, 全国量子计算与测量标准化技术委员会委员。主要研究方向为量子精密测量。