

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.06.05

用于原子干涉仪的光学锁相环系统

白金海, 胡栋, 贡昊, 王宇

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 相干激光的性能对原子干涉仪的测量精度有着重要影响。本文介绍了一种制备相干激光的外差式光学锁相环系统, 实现了两台外腔半导体激光器频率和相位的同步, 锁相后的激光拍频线宽低于 1 Hz, 10 MHz 积分带宽内的残余相位噪声为 0.002 rad^2 , 频偏 1 ~ 100 kHz 范围内的相位噪声达到 -100 dBc/Hz 。并研究了闭环相位噪声对原子干涉仪的影响, 在自由演化时间为 200 ms、拉曼 π 脉冲时间为 30 μs 、单次循环时间为 1 s 条件下, 锁相后相位噪声对重力测量灵敏度的贡献为 $10 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 完全满足高精度原子干涉仪的使用需求。

关键词: 光学锁相环; 相位噪声; 原子干涉仪; 灵敏度

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)06-0026-05

An Optical Phase-lock Loop System for Atom Interferometers

BAI Jinhai, HU Dong, GONG Hao, WANG Yu

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

Abstract: The performance of coherent laser has an important influence on the measurement accuracy of atom interferometry. We present a heterodyne optical phase-lock loop system for generating coherent laser. The frequency and phase synchronization of two external cavity semiconductor lasers are realized. The laser beat signal linewidth is less than 1 Hz, the residual phase noise within 10 MHz integral bandwidth is 0.002 rad^2 , and the phase noise reaches a flat floor of -100 dBc/Hz in the offset frequency range of 1 kHz to 100 kHz. We also researched the impact on the sensitivity of the atomic measurement. Using the 200 ms' interrogation time, the 30 μs ' π Raman pulse duration time and the 1 s' cycle time, we calculated that our system would allow us to reach a sensitivity to acceleration as low as $10 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, meet the needs of high precision atom interferometry completely.

Key words: optical phase-lock loop; phase noise; atom interferometers; sensitivity

0 引言

相位相干激光器在原子物理实验领域有着重要应用, 包括相干布居俘获原子钟^[1]、量子通信^[2]、精密光谱测量^[3-4]、原子干涉仪^[5-6]等。有多种产生相位相干激光的方法, 包括: 声光调制器 (Acousto-Optic Modulator, AOM) 布拉格衍射^[7]、电光调制器 (Electro-Optic Modulator, EOM) 相位调制^[8]、垂直腔面激光管 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) 射频电流调制、注入锁定技术^[9]、光学锁相环技术^[10-12]等, 但是这些方法均存在一些不足: AOM 产生相干激光的缺点是工作频率越大的 AOM 衍射效率越低, 3 GHz 移频 AOM 仅有约 5% 的衍射效率; EOM 产生相干激光的缺点是边带激光与载波在空间上重合, 对需要独立调节两束相干激光的功率、偏振等参数的应用非常不利, 且存在无用边带干扰问题; VCSEL 产生相干激光的缺

点是激光输出功率低、线宽大, 通常需要额外的激光放大器进行功率放大后才能使用, 且也存在无用边带干扰的问题; 注入锁定技术一般使用 EOM 或 VCSEL 边带作为种子光, 经过注入锁定后, 无用的边带或载波被抑制, 输出与载波或边带相位相干的激光, 缺点是载波抑制比较低, 一般仅有 30 dB, 且系统对温度和电流漂移敏感, 存在易失锁问题。相较上述方法, 外差光学锁相环技术 (Optical Phase-Locked Loop, OPLL) 即将两台激光器的拍频信号与超稳射频微波参考锁定以产生相位相干激光的方法, 具有锁定频率范围宽、相位噪声小、激光纯净无边带、相干光空间分离易调节等优点, 已经成为原子物理实验中制备相干激光的首选方案。

2005 年, L. Cacciapuoti 等人^[13]利用模拟、数字混合鉴频鉴相器实现了 5 Hz ~ 10 MHz 带宽内 0.01 rad^2 的残余相位噪声。2009 年, D. Höckel 等人^[14]实现了 0.02 rad^2 相位噪声的锁相环, 获得了大于 60% 透过率、

1.1 MHz 线宽的电磁感应透明窗口。2011 年,王萧隆等人^[15]实现了基于 FPGA 反馈控制器的数字相位锁相环,残余相位噪声为 0.03 rad^2 。2018 年, C. F. Wu 等人^[10]实现了附加光学锁相环反馈控制的注入锁定,残余相位噪声为 0.003 rad^2 ,将低频段相位噪声压制了 20~30 dB。

国内有多家单位进行原子干涉仪的研究,包括华中科技大学、武汉数物所、浙工大、中科大、航空工业计量所、中国计量院、中船 717 所等。针对不同的研究目标,各研究机构使用多种方案进行拉曼光制备,其中,使用最多的就是光学锁相环技术^[15~20]。本文介绍了本课题组研制的低噪音光学锁相环装置,其闭环后拍频信号线宽小于 1 Hz,残余相位噪声为 0.002 rad^2 。并计算其性能对原子干涉重力仪灵敏度的影响。

1 实验装置和结果

使用两台独立的商业外腔半导体激光器 (Toptica, DL pro) 进行光学锁相,激光输出波长为 780 nm,其中一台激光器作为主激光器 (Master),另一台作为从激光器 (Slave)。主激光器输出的激光经过 AOM 移频后使用塞曼外调制饱和吸收谱锁频技术^[16]锁定到⁸⁷Rb 原子 D_2 线基态 $5S_{1/2} F=2$ 至激发态 $5P_{3/2} F'=3$ 的共振跃迁峰上,主、从激光器的拍频信号通过光学锁相环与超稳微波射频参考锁定,二者的频率差为 6.834682610 GHz

(⁸⁷Rb 原子基态超精细能级分裂间距)。

实验装置示意图如图 1 所示。主激光器输出分出小部分激光作为稳频参考光,主激光器和从激光器输出激光在消偏振分束器 (BS) 处合束进行拍频,拍频信号由高速探测器 1、2 接收,分别探测环内、环外信号,探测器型号为 ET4000,光电灵敏度为 0.45 A/W @ 780 nm,输入总光强为 5 mW 时,拍频信号的幅值约为 -35 dBm。经过低噪音射频放大器 1, (兴华微通 XHLNA6.0G-7.5G, 频率范围 6~7.5 GHz, 增益 30 dB, 噪音系数 1.5 dB) 放大后的信号幅值为 -5 dB。其与信号发生器 (keysight E8257D) 输出的微波信号 S1 (频率约为 6.884 GHz, 幅值为 -10 dBm) 经混频器 (ZMX-10G) 混频后输出信号的频率在 50 MHz 附近,幅值约为 -20 dBm,经过第二个低噪音放大器 2 (ZFL-500LN+) 放大后的幅值增加到约 10 dBm。经过耦合器 1 (ZFDC-10-1+) 后,小部分射频信号 (约 0 dBm) 作为监视信号 2 连接到频谱仪 (keysight N9000A),大部分信号 (约为 10 dBm) 输入到耦合器 2,其输出的小部分作为参考信号输入到数字鉴频鉴相器 (DFPD, 由高速比较器 AD96687 和数字鉴相器 AD9910 以及配套模拟电路构成),大部分信号作为参考信号输入到模拟鉴相器 (AFD, ZRPD-1)。S2 信号由直接数字合成信号发生器产生 (Keysight DDS33600),经耦合器 3 分束

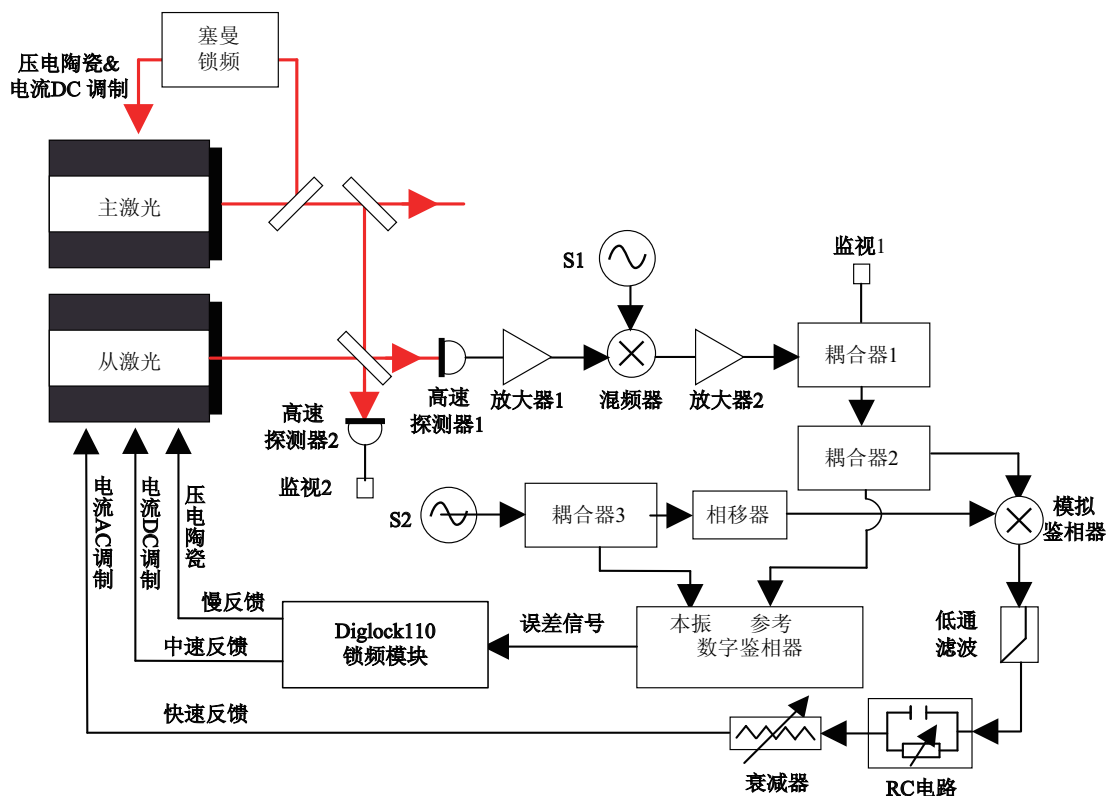


图 1 实验装置示意图

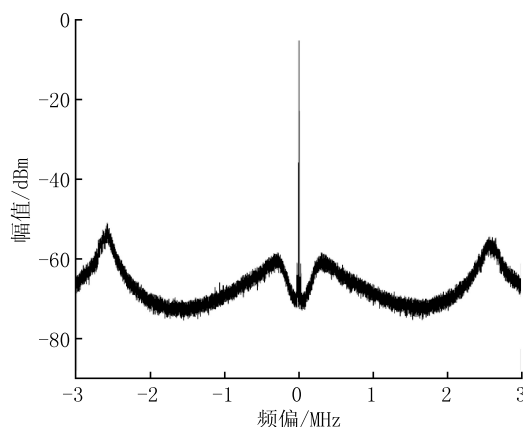
后,小部分信号作为本振信号输入到DFPD,大部分信号经过移相器对信号移相后(Phase shift)作为本振信号输入到模拟鉴相器,移项器的作用是补偿同轴电缆、射频器件等导致的相移。S1和S2信号源均使用斯坦福铷原子钟(FS725)输出的10 MHz信号作为频率外参考。DFPD输出信号作为误差信号进入反馈控制器1(PID1)和反馈控制器2(PID2),二者分别为慢反馈控制和中速反馈控制,其输出分别连接到主激光器的压电陶瓷(PZT)和电流直流调制端口,PID1和PID2由激光器自带的Diglock110锁频模块产生,其由FPGA模块组成,可以使用计算机通信方便地修改控制参数。AFD输出信号经过反馈滤波器(filter)后作为快速反馈输入到激光器电流交流调制端口。反馈滤波器由低通滤波器(BLP-30)、RC并联电路和可调衰减器等组成。

拍频的目的是将100 THz量级的光频信号转换成容易处理的1 GHz量级的微波信号,拍频信号和微波信号混频的目的是将1 GHz量级微波信号进一步降低到更容易处理、对应电子器件更多的100 MHz量级频段。快速反馈控制的带宽一般在1~10 MHz范围,带宽和增益可由衰减器倍数和RC电路参数控制,激光频率调谐灵敏度约为5 GHz/V。中速反馈控制的带宽一般在200 kHz~2 MHz范围,带宽和增益可以由PID1控制器的比例、积分和微分参数调节,激光频率调谐灵敏度约为100 MHz/V。慢速反馈控制的带宽在1 kHz量级,主要受PZT共振频率限制,带宽和增益由PID2参数调节,激光频率调谐灵敏度约为500 MHz/V。

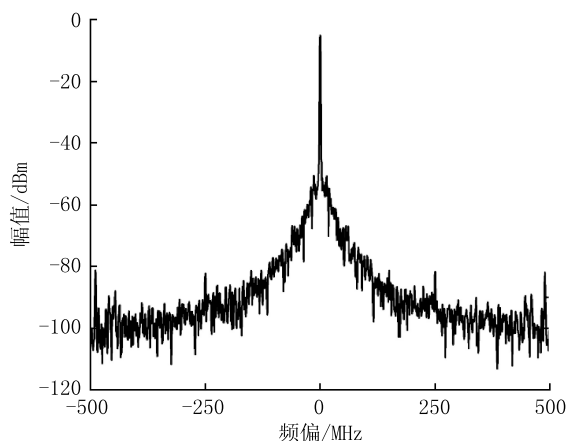
实验时,首先将主激光器频率锁定,然后以饱和吸收谱为参考(或者直接以频谱仪信号为参考)调节从激光器的电流和压电陶瓷电压,使其波长比主激光器高6.834 GHz左右,此时在频谱仪上可以看到50 MHz左右的监视信号(环内信号),依次关闭慢速反馈控制开关、中速反馈控制开关和快速反馈控制开关,反复调节反馈控制参数即可得到性能良好的光学锁相环,产生相位高度相干的激光。

OPLL闭环锁定后的环外拍频信号测量结果如图2所示。图2(a)中的频谱仪扫描范围为6 MHz,分辨力带宽(RBW)为1 kHz,视频带宽(VBW)为10 Hz,图中偏离中心位置的两个特征峰对应反馈环路带宽大小,中速反馈带宽为300 kHz,快速反馈带宽为2.75 MHz。图2(b)中的扫描范围为1 kHz,分辨力带宽和视频带宽均为1 Hz(频谱仪最高分辨力),此

时仍然无法分辨载波线宽,意味着OPLL后激光拍频线宽远小于1 Hz。



(a) 频谱仪span为6 MHz, RBW为1 kHz, VBW为10 Hz



(b) 频谱仪span为1 kHz, RBW和VBW为1 Hz

图2 OPLL闭环后的激光拍频信号

拍频信号的相位噪声大小可以用频谱仪的相噪测试功能测量,结果如图3所示,其中黑色曲线为OPLL

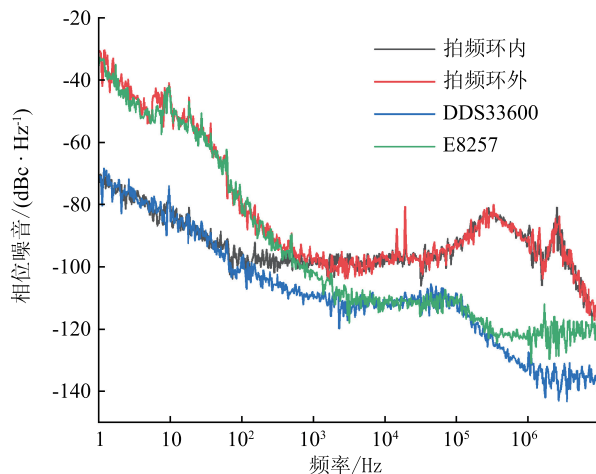


图3 相位噪声测量结果

闭环后的环内信号相位噪声,红色曲线为环外信号相位噪声,蓝色曲线和绿色曲线分别为信号源 DDS33600 和 E8257 的相位噪声。由实验测量结果可知,在频偏 1 ~ 500 Hz 范围内,锁相环闭环后的环外相位噪声结果基本与微波信号源 E8257 相同,远差于射频信号源 DDS33600,与之对比,环内相位噪声与 DDS33600 相同,远好于 E8257D,这说明 OPLL 系统在低频段内的性能主要受限于信号源指标,可通过采用具有超低相位噪声的信号源进行改善。在频偏 500 Hz ~ 10 MHz 范围内,锁相环闭环的环外、环内信号相位噪声基本一致,均比信号源相噪大,这主要是 OPLL 系统在高频段内的增益较低,且反馈带宽有限导致的,此频段内的两个特征信号峰对应于反馈环带宽。在频偏 1 ~ 100 kHz 范围内锁相环闭环的环外拍频信号相位噪声在 -100 dBc/Hz 左右。

残余相位噪声可以由环外拍频信号频谱测量结果得到。因为绝大部分功率都集中在载波频率上,可以根据公式(1)计算残余相位噪声 $\langle \varphi^2 \rangle$ 的大小。

$$\frac{P_{\text{carrier}}}{P_{\text{full}}} = \exp[-\langle \varphi^2 \rangle] \quad (1)$$

式中: P_{carrier} 为载波功率; $P_{\text{full}} = \int_{-\infty}^{\infty} P(f) df$ 为积分带宽内的总功率。由拍频信号频谱测量结果可计算得出 10 MHz 积分带宽内的残余相位噪声大小为 0.002 rad², 优于参考文献[10], [13-15] 中报道的结果。

2 对原子干涉仪的影响

拉曼激光相位噪声对光脉冲原子干涉仪的影响可以用如下表达式计算^[21]。

$$\sigma_{\phi}^2(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{n=1}^{\infty} |H(2\pi n f_c)|^2 S_{\phi}(2\pi n f_c) \quad (2)$$

式中: τ 为平均时间; H 为灵敏度传递函数; $f_c = 1/T_c$ 为循环频率(T_c 为完成一次干涉测量的循环时间); n 为倍数因子,因为只有循环频率倍数的相位噪声对最终结果有贡献; S_{ϕ} 为拉曼光相位噪声。传递函数与 $\pi/2$ 脉冲持续时间 τ_R 、自由演化时间 $2T$ 和循环时间 T_c 有关,具有带通性质,截止频率分别为 $1/2\tau_R$ 和 $1/2T$,带通范围一般为 1 Hz ~ 100 kHz,所以通常只关心偏频 1 MHz 内的相位噪声。传递函数随频率的变化为

$$H_{\varphi}(\omega)^2 = \frac{16}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2\right]^2} \sin^2\left(\frac{\omega T}{2}\right) \left[\sin \frac{1}{2}\omega(T - 2\tau) + \frac{\omega}{\Omega} \cos \frac{\omega T}{2}\right]^2 \quad (3)$$

式中: ω 为频偏角频率, $\Omega = \frac{1}{\tau} \frac{\pi}{2}$ 为拉曼光拉比频率。

假设原子干涉仪实验的死区时间为 0.2 s(主要由装载冷却原子的时间决定),脉冲时间 τ_R 为 15 μ s,根据环外拍频信号的相位噪声测量结果可以计算不同自由演化时间 T 条件下的原子干涉仪灵敏度,如表 1 所示。

表 1 不同 T 条件下的原子干涉仪灵敏度

T_c/ms	$2T/\text{ms}$	$\sigma_{\varphi}/(\text{mrad@ 单次测量})$	$\sigma_g/(\mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2})$
220	20	46	1350
300	100	97	132
600	400	86	10.3
800	600	90	5.6

当前拉曼脉冲型原子干涉重力仪的最高灵敏度^[18]为 4.2 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$,实验条件为 $\tau_R = 6 \mu\text{s}$, $2T = 600 \text{ ms}$, $T_c = 1 \text{ s}$ 。同实验条件下,代入本文研制的 OPLL 系统环外相位噪声测量结果,可以得到对应的灵敏度贡献仅为 5.6 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

3 总结

在原子干涉测量实验中,相干拉曼激光的性能对实验结果影响很大。介绍了本课题组设计的光学锁相环系统,该系统制备的相干激光拍频线宽远小于 1 Hz,在 10 MHz 积分带宽内的残余相位噪声为 0.002 rad²,在频偏 1 ~ 100 kHz 范围内的闭环相位噪声达到 -100 dBc/Hz,其性能指标主要受微波频率参考源 E8257 限制,对自由演化时间为 200 ms、拉曼 π 脉冲时间为 30 μ s、单次循环时间为 1 s 的典型原子干涉重力测量灵敏度的贡献约为 10 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$,100 s 积分时间后的分辨力贡献约为 1 μGal ,证明 OPLL 装置完全满足 1 μGal 量级的原子干涉重力测量装置对拉曼相干激光的需求。

参 考 文 献

- [1] Vanier J, Godone A, Levi F. Coherent population trapping in cesium: Dark lines and coherent microwave emission[J]. Physical Review A, 1998, 58(3): 2345-2358.
- [2] Marino A M, Stroud C R. Deterministic Secure Communications using Two-Mode Squeezed States[J]. Physical Review A, 2006, 74(2): 22315-22315.
- [3] Marino A M, Stroud C R. Phase-locked laser system for use in

- atomic coherence experiments [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(1): 857.
- [4] Zibrov A S, Fox R W, Ellingsen R, et al. High-resolution diode-laser spectroscopy of calcium [J]. Applied Physics B, 1994, 59(3): 327–331.
- [5] Kasevich M, Chu S. Atomic Interferometry Using Stimulated Raman Transitions [J]. Physical Review Letters, 1991, 67(2): 181–184.
- [6] Geiger R, Landragin A, Sébastien Merlet, et al. High-accuracy inertial measurements with cold-atom sensors [J]. AVS Quantum Science, 2020, 2(2): 024702.
- [7] Yun P, Tan B, Deng W, et al. High coherent bi-chromatic laser with gigahertz splitting produced by the high diffraction orders of acousto-optic modulator used for coherent population trapping experiments [J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(12): 123104.
- [8] Liu X, Mérola J-M, Guérandel S, et al. Ramsey spectroscopy of high-contrast CPT resonances with push-pull optical pumping in Cs vapor [J]. Optics express, 2013, 21(10): 12451–12459.
- [9] Wenlan Chen, Xianghui Qi, Lin Yi, et al. Optical phase locking with a large and tunable frequency difference based on a vertical-cavity surface-emitting laser. [J]. Optics Letters, 2008, 33(4): 357–359.
- [10] Wu C F, Yan X S, Huang J Q, et al. Phase noise reduction by optical phase-locked loop for a coherent bichromatic laser based on the injection-locking technique [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(1): 013103.
- [11] Lautier J, Lours M, Landragin A. A compact micro-wave synthesizer for transportable cold-atom interferometers [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(6): 849–852.
- [12] Wei Chunhua, Yan Shuhua, Jia Aíái, et al. Compact phase-lock loop for external cavity diode lasers [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(5): 57–60.
- [13] Cacciapuoti L, De Angelis M, Fattori M, et al. Analog + digital phase and frequency detector for phase locking of diode lasers [J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(5): 2646.
- [14] Hoeckel D, Scholz M, Benson O. A robust phase-locked diode laser system for EIT experiments in cesium [J]. Applied Physics B, 2009, 94(3): 429–435.
- [15] Wang X L, Tao T J, Cheng B, et al. A Digital Phase Lock Loop for an External Cavity Diode Laser [J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(8): 084214.
- [16] 贡昊, 王宇, 白金海, 等. 半导体激光器稳频综述 [J]. 计测技术, 2019, 30(1), 1674–5795
- [17] Hu Z K, Sun B L, Duan X C, et al. Demonstration of an ultrahigh-sensitivity atom-interferometry absolute gravimeter [J]. Physical Review A, 2013, 88(4): 043610.
- [18] Zhao Y, Wang S, Zhuang W, et al. Design of laser system for absolute gravimeter based on 87Rb atom interferometer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 9621(9): 196–202.
- [19] Yao Z W, Lu S B, Li R B, et al. Continuous Dynamic Rotation Measurements Using a Compact Cold Atom Gyroscope [J]. Chinese Physics Letters, 2016, 33(8): 083701.
- [20] Hu D, Wang Y, Ma H, et al. Gravity acceleration measurement based on Atom interferometry [J]. Journal of Physics Conference Series, 2018, 1149.
- [21] Cheinet P, Canuel B, Pereira F, et al. Measurement of the Sensitivity Function in a Time-Domain Atomic Interferometer [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2008.

收稿日期: 2020-10-30; 修回日期: 2020-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(61727819); 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2019205C002); 航空基金项目(201956044001)

作者简介

白金海(1988-), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为量子精密测量。参与并主持多项量子测量相关科研项目, 作为主要参与者研制了冷原子干涉绝对重力仪。

