

一种用于冷原子重力仪的低相噪微波频综研制

欧阳鑫川^{1,2}, 胡青青^{3*}, 叶美凤¹, 邓见辽¹, 杨博文^{1,2}, 亢航航^{1,2}, 肖玲¹, 万金银^{1**}, 成华东^{1,2***}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³国防科技创新研究院前沿交叉技术研究中心, 北京 100010

摘要 研制了一种用于冷原子重力仪的集成化、低相噪、多通道微波频率综合器。利用锁相环技术, 将 100 MHz 晶振锁定到 10 MHz 晶振上, 改善了 100 MHz 晶振近端的相位噪声, 使输出至后级倍频链路的 100 MHz 信号的相位噪声同时具备 10 MHz 及 100 MHz 晶振的优点。通过搭建超低相噪倍频链路, 得到⁸⁷Rb 原子基态跃迁所需的 6.834 GHz 微波信号。通过互相关法测量得到在频偏为 1 Hz 和 10 kHz 处的相位噪声分别为 -60 dBc/Hz 和 -120 dBc/Hz, 其频率分辨率为 1.42×10^{-6} Hz, 并评估了其相位噪声对冷原子重力仪测量分辨率的影响。该微波频综方案具有普适性, 可广泛应用于原子钟和干涉仪等量子精密测量领域。

关键词 测量与计量; 精密测量; 微波频综; 低相噪; 锁相环; 冷原子重力仪

中图分类号 O433.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2311001

1 引言

在量子精密测量实验中, 需要对微波的频率、功率、相位等进行精确控制^[1-2]。在微波原子钟系统中, 需要精确控制频率(跳频)或者相位(调相)来实现闭环锁定^[3-5]; 在里德伯测量电场等实验中^[6], 需要驱动微波天线, 这要求微波源能够输出较大的功率并且幅度可控; 在原子重力仪系统中, 通过扫描拉曼光的频率来补偿原子自由下落过程中重力引起的多普勒频移^[7], 频率扫描的分辨率会影响重力加速度的测量精度^[8-9]。另一方面, 微波源的性能会直接影响实验测量精度, 例如微波源的相位噪声会通过 Dick 效应影响原子钟的稳定度^[10]。在文献^[11-12]中, 用光生微波的方法研制了超低相位噪声的频率源, 但由于其结构复杂, 不利于集成。文献^[13]介绍了一种用于冷原子重力仪的微波频综方案, 输出 6.834 GHz 时, 在频偏 1 Hz 处的相位噪声约为 -50 dBc/Hz, 与使用外部晶振参考的商用信号发生器 E8257D 水平相当^[14]。

本文利用锁相环技术改善了 100 MHz 晶振近端的相位噪声, 在频偏为 1 Hz 时, 相位噪声被压低

至 -96 dBc/Hz。并利用直接数字式频率合成器(DDS)以及数控衰减器, 搭建了一套低相噪、超高频率分辨率的集成化微波频综系统。当输出频率为 6.834 GHz 时, 在频偏为 1 Hz 和 10 kHz 处的相位噪声分别为 -60 dBc/Hz 和 -120 dBc/Hz, 其频率分辨率为 1.42×10^{-6} Hz。此外, 还开发了配套的控制系統, 可对输出的频率、功率进行编程, 满足各种实验需求。经过评估, 该微波频综可以满足不同实验条件下冷原子重力仪测量分辨率对微波频综性能的要求。该方案可以很容易地推广到其他目标频率, 应用于其他精密测量系统。

2 微波频综结构及设计

冷原子重力仪是在冷却并囚禁原子的基础上, 对原子进行选态之后再依次与 $\pi/2 - \pi - \pi/2$ (作用时间分别为 $\tau - 2\tau - \tau$) 的三个拉曼脉冲作用, 使原子团在两个能态之间分束、反转、合束, 进而形成干涉^[15]。在这个过程中, 拉曼光的相位波动会直接影响干涉的总相位, 进而影响重力仪的测量灵敏度。当采用电光调制产生拉曼光时, 拉曼光的相位噪声主要来源于微波频综^[14], 因此微波频综的相位噪声

收稿日期: 2021-03-25; 修回日期: 2021-04-16; 录用日期: 2021-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(61875215, 61727821, 11904408)

通信作者: *qqhu@baqis.ac.cn; **jywan@siom.ac.cn; ***chenghd@siom.ac.cn

是重力仪的重要指标之一。拉曼光相位噪声与总干涉相位噪声的关系如下^[16]

$$(\sigma_{\varphi}^{\text{rms}})^2 = \int_0^{+\infty} |H(\omega)|^2 S_{\varphi}(\omega) d\omega, \quad (1)$$

式中： $\sigma_{\varphi}^{\text{rms}}$ 为总干涉相位噪声的均方根值； $H(\omega)$ 为相位噪声传递函数^[15]； $S_{\varphi}(\omega)$ 为拉曼光相位噪声的功率谱。 $\sigma_{\varphi}^{\text{rms}}$ 与重力测量分辨率的关系为^[17]

$$\sigma_g = \frac{\sigma_{\varphi}^{\text{rms}}}{k_{\text{eff}} T^2}, \quad (2)$$

式中： σ_g 为重力测量分辨率； k_{eff} 为有效波矢的大小； T 为拉曼脉冲间的自由演化时间。

此外，在通过 DDS 扫描拉曼光频率补偿原子自由下落过程中重力引起的多普勒频移时，重力加速度由扫频的共振斜率决定，可表示为^[18]

$$g = \frac{\alpha}{k_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

式中： g 为重力加速度； α 为 DDS 扫频共振斜率。由此可知，扫频过程中的噪声会直接影响重力加速度的测量，DDS 的扫频分辨率尤为重要。

不同工作频率的晶振，其相位噪声特性不同。本文采用的 10 MHz 晶振在近端的相位噪声优于 100 MHz 晶振，但 100 MHz 晶振的相位噪声随频偏下降的速率高于 10 MHz 晶振，在远端 100 MHz 晶振的相位噪声表现更好。因此，可以将 100 MHz 晶振锁定在 10 MHz 晶振上，并调整锁相环带宽至它们的相位噪声交点处对应的频偏，压低 100 MHz 近端相噪的同时，还保留其远端的性能，锁相环路如图 1(a) 所示。10 MHz 晶振经过十倍频后，与 100 MHz 晶振输出频率进行混频，会得到一个近直流信号和一个 200 MHz 的信号。由于 OP27 带宽的限制，200 MHz 的信号会被滤掉。通过改变 R1、R2、C1 来调整锁相环的带宽，最后反馈至 100 MHz 晶振频率调谐端。

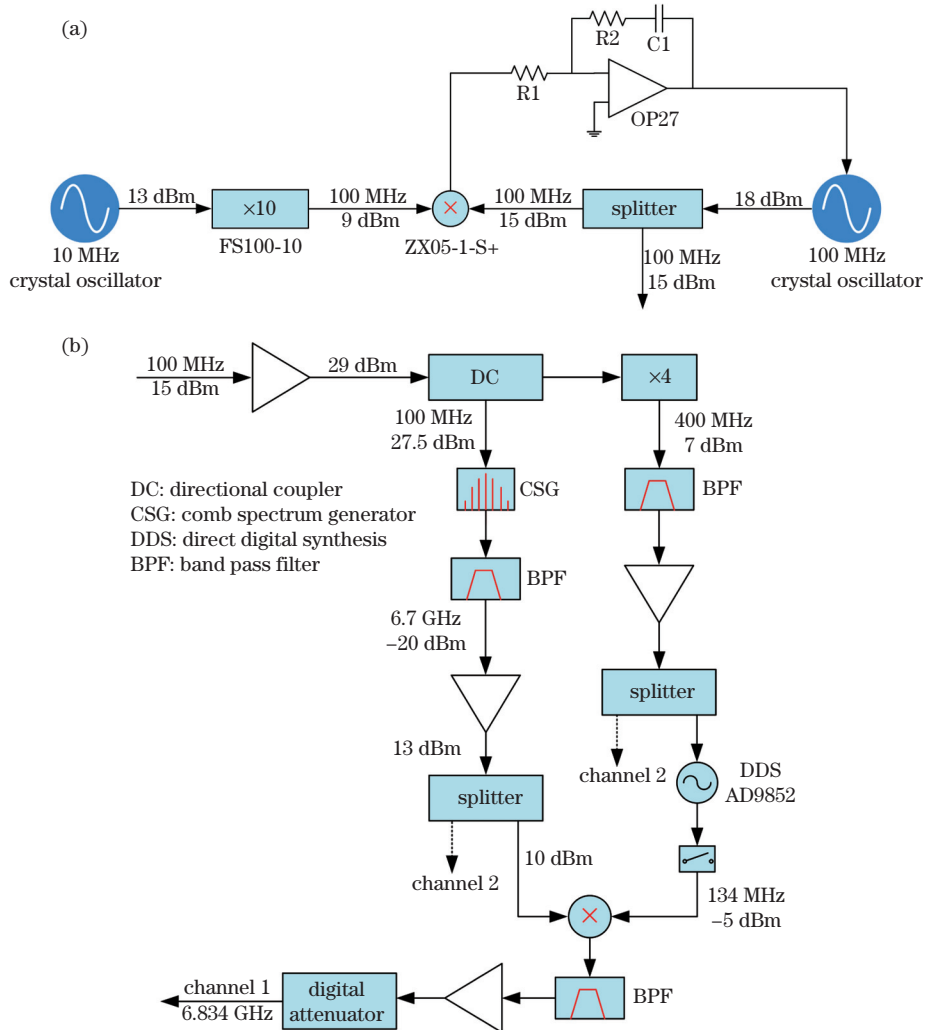


图 1 100 MHz 锁相环及 100~6834 MHz 倍频链路。(a) 100 MHz 锁相环；(b) 100~6834 MHz 倍频链路

Fig. 1 Phase locked loop of 100 MHz and frequency synthesizer of 100-6834 MHz.

(a) Phase locked loop of 100 MHz; (b) MHz frequency synthesizer of 100-6834.

DDS 具有频率、功率可编程,并且在频率扫描过程中能保持相位连续的优点,被广泛用于微波链路中。通常将 DDS 输出频率与载波频率混频得到实验所需的频率,而 DDS 能输出的最大频率是其内部时钟频率的 0.4 倍。其输出频率可表示为^[18]:

$$f_{out} = f_{reference} \times \frac{f_{FTW}}{2^N}, \quad (4)$$

式中: $f_{reference}$ 为 DDS 内部时钟频率; N 为 DDS 频率控制字的位数; f_{FTW} 为频率控制字的值。对于⁸⁷Rb 原子而言,其基态能级跃迁频率为 6.834 GHz,若选取 6.8 GHz 作为载波频率,那么 DDS 输出频率在 34 MHz 左右。由于微波链路间的耦合,载波频率距离目标频率太近,很难将 6.8 GHz 完全从输出频率中滤除干净,因此选取 6.7 GHz 作为载波频率。先将锁相后的 100 MHz 信号通过梳状谱发生器,经由滤波器得到 6.7 GHz,之后再与 DDS 的输出频率进行混频。图 1 (b)给出了微波频综的结构示意图。在现有的 DDS 当中,AD9852 的频率分辨率与扫频分辨率都最高(48 位),因此选取 AD9852 来搭建微波链路。但由于 AD9852 的额定最大参考频率为 300 MHz,因此其频率调节范围仅为 0~120 MHz。为了满足实验需求,通过增加主动散热措施对其进行超频,使其能够在参考频率为 400 MHz 的条件下稳定工作。此时其频率调节范围被扩展至 0~160 MHz,能够

覆盖大多数实验所需频率范围,并且频率分辨率为 1.42×10^{-6} Hz。之后再经过微波开关、混频器、带通滤波(中心频率为 6.834 GHz,带宽为 50 MHz)、功率放大器以及数控衰减器,得到低相噪、超高频率分辨率的微波信号。图 1 (b)中功分器后的虚线用于通道 2 的信号输出,输出频率在 6.834 GHz 附近,结构与通道 1 基本一致,作用是驱动微波喇叭,在实验过程中对冷原子团进行微波选态。

在实验过程中,开发了配套的嵌入式控制系统,对微波进行控制,如:扫频、调相、扫功率等,原理框图如图 2 所示。由主控芯片(STM32F103)直接控制 DDS、微波开关以及衰减器,其中频率信息直接写入 AD9852 内部寄存器,包括输出频率、扫频上下限、扫频步长间隔、相位等。由于通过 DDS 后需要混频和功率放大,为了更精确地控制输出的功率,不使用 DDS 的内部衰减器。微波的通断用通过 DDS 后的微波开关来控制,当微波开关断开时,混频器输出 6.7 GHz,信号会被带通滤波器滤除,进而实现微波的关断。微波的功率通过最终输出前的数控衰减器来控制。在实验过程中,可通过控制 AD9852 的工作模式对输出频率进行操控,如:三角扫频、啁啾扫频、跳频、调相等。微波开关及扫(跳)频通过控制管脚 FSK 同步到实验时序中,上位机通过 STM32F103 对微波信号进行各种编程以满足实验需求。

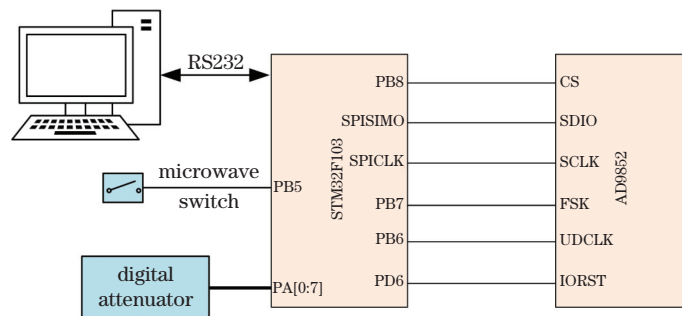


图 2 微波控制系统

Fig. 2 Microwave control system

3 测试结果

由于冷原子重力仪后期需要车载测量,各组件都设计成标准的机箱尺寸,微波源的实物图如图 3 所示。图 4 给出了 10 MHz 晶振(方形点线)、100 MHz 晶振(圆点线)、锁相环路(PLL)的剩余相位噪声(倒三角线)以及实现环路锁定后 100 MHz 信号的相位噪声(正三角线)。可以看出,当频偏小于 31 Hz 时,10 MHz 晶振经过十倍频后的相位噪声优于 100MHz 晶振输出频率;当频偏大于 31 Hz

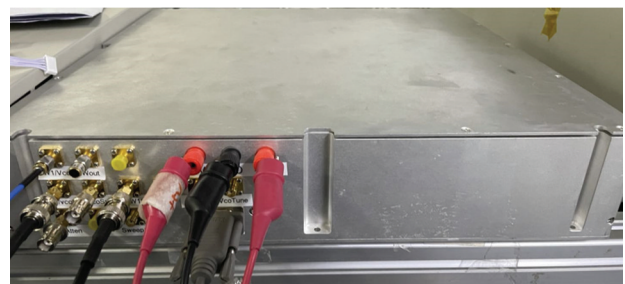


图 3 微波源实物图(400 mm×400 mm×80 mm)

Fig. 3 Picture of microwave source
(400 mm×400 mm×80 mm)

时, 100 MHz 晶振的相位噪声更好, 因此将锁相环的带宽调整为 31 Hz。锁相后 100 MHz 的相位噪声在远端保持原本相噪性能的同时, 在近端相噪得以改善, 在频偏为 1 Hz 处, 相位噪声由原本的 -73 dBc/Hz 被压低到 -96 dBc/Hz。锁相环的剩余相位噪声如图 4 中倒三角线所示, 可以看出, 环路的相位噪声在近端比锁相后的 100 MHz 信号低约 20 dB, 这保证了输出频率的相位噪声不会因锁相环而恶化。测量相位噪声所用仪器为 Microsemi 公司的 5125A, 远端的测试结果被其底噪限制。

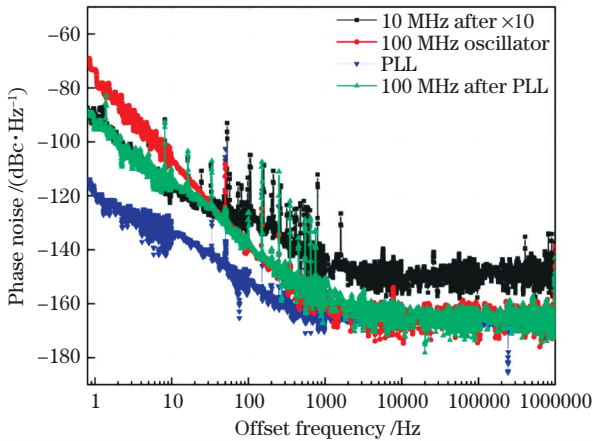


图 4 锁相环内各部分的相位噪声

Fig. 4 Phase noise performances of the PLL

将通道 1 和通道 2 的输出频率进行混频, 之后再通过低通滤波器进入示波器, 测试其扫频功能, 如图 5(a) 所示。其中, 通道 2 输出频率保持不变, 通道 1 初始频率比通道 2 高 1 Hz, 扫频步长设置为 10^{-3} Hz, 时间间隔为 1 ms, 用示波器观察扫描过程, 如图 5(b) 所示。混频后信号的振荡周期随时间变短, 频率增大, 在整个过程中曲线保持平滑, 相位保持连续。

锁相后的 100 MHz 信号经过倍频链路得到实验所需频率 6.834 GHz, 相位噪声测试结果如图 6 所示, 在频偏为 1 Hz 和 10 kHz 处的相位噪声分别为 -60 dBc/Hz 和 -120 dBc/Hz。同源信号在近端的相位噪声与输出频率间的关系可表示为^[19]

$$p(f_1) - p(f_2) = -20 \lg \frac{f_1}{f_2}, \quad (5)$$

式中: f_1 和 f_2 分别为不同的输出频率; $p(f)$ 为输出频率为 f 时的相位噪声。当频偏为 1 Hz 时, 100 MHz 倍频前后的相位噪声相差约 36 dB, 与 (5) 式计算得到的理论值基本一致, 表明该倍频链

路没有恶化信号的相位噪声, 测试结果中的杂散点主要是电源干扰引起的。

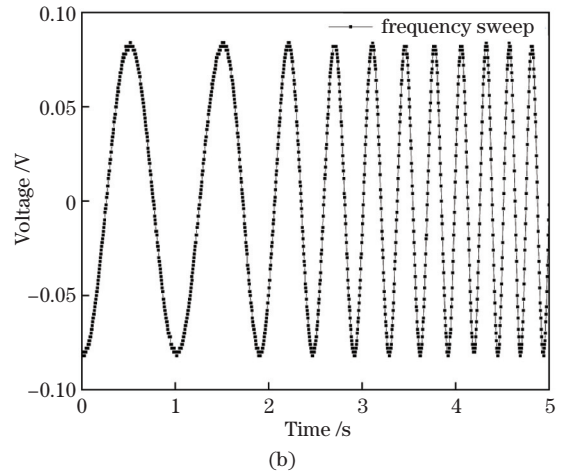
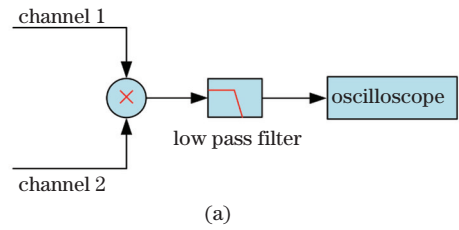


图 5 扫频测试链路及扫频测试结果。

(a) 扫频测试链路; (b) 扫频测试结果

Fig. 5 Scheme of frequency sweep test and result of frequency sweep. (a) Scheme of frequency sweep test; (b) result of frequency sweep.

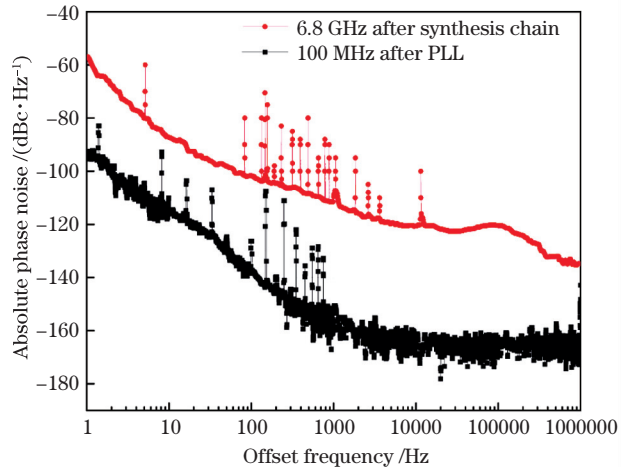


图 6 100-6834 MHz 倍频链路的绝对相位噪声

Fig. 6 Absolute phase noise performances of the 100-6834 MHz frequency synthesis chains

将测试结果代入 (1) 式和 (2) 式, 积分上下限分别为 1 Hz 和 1 MHz, 可以得到在不同 T 和 τ 下, 微波源的相位噪声对重力分辨率的影响, 如表 1 所示。可以看出, 该微波源能够满足微伽量级的冷原子重力仪需求。

表 1 不同 T 和 τ 条件下,微波源相噪对重力分辨率的影响Table 1 Effect of phase noise of microwave source on gravity resolution under different T and τ

$\tau / \mu\text{s}$	T / ms	$\sigma_{\varphi}^{\text{rms}} / \text{mrad}$	$\sigma_g / \mu\text{Gal}$
10	100	1.39	0.864
10	200	2.55	0.395
10	300	3.86	0.267
30	100	1.34	0.834
30	200	2.54	0.395
30	300	3.84	0.265
50	100	1.35	0.836
50	200	2.52	0.392
50	300	3.84	0.265

4 结 论

本文搭建了一套用于冷原子重力仪的低相噪、超高频分辨率的集成化微波源。通过控制锁相环的带宽将 100 MHz 晶振锁定在 10 MHz 晶振上,改善其近端相位噪声使频偏 1 Hz 处的相噪从 -73 dBc/Hz 压低至 -96 dBc/Hz ;通过对 AD9852 进行超频,使其能在参考频率为 400 MHz 的状态下稳定工作,将其频率输出范围拓展至 $0 \sim 160 \text{ MHz}$;搭建了超低相噪的倍频链路,当输出频率为 6.834 GHz 时,在频偏为 1 Hz 和 10 kHz 处的相位噪声分别为 -60 dBc/Hz 和 -120 dBc/Hz ,优于商用信号发生器 E8257D 及文献[13]中的微波频综,并且其频率分辨率为 $1.42 \times 10^{-6} \text{ Hz}$ 。通过评估可知,该微波源能够满足不同演化时间和拉曼脉冲宽度条件下微伽量级精度冷原子重力仪的需求。此外,还开发了配套的控制系統以对微波进行各种编程,如跳频、调相、三角及啁啾扫频等。该微波频综方案可以推广到其他目标频率,能够满足原子钟和原子干涉仪等量子精密测量实验的需求。

参 考 文 献

- [1] Zheng W Q, Bi X, Zhang G Y, et al. Experimental demonstration of light narrowing effect based on free atomic spin precession [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304001.
郑文强, 毕欣, 章国亿, 等. 基于原子自由进动的光缩效应实验研究 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304001.
- [2] Wang X W, Gao Y C, Zhao J B, et al. Design of microwave cavity for in situ atom detection used in space cold atom clock [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0901006.
王新文, 高源慈, 赵剑波, 等. 空间冷原子钟原位探

测微波腔设计 [J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0901006.

- [3] Lin H X, Lin J D, Deng J L, et al. Pulsed optically pumped atomic clock with zero-dead-time [J]. The Review of Scientific Instruments, 2017, 88(12): 123103.
- [4] Shuker M, Pollock J W, Boudot R, et al. Ramsey spectroscopy with displaced frequency jumps [J]. Physical Review Letters, 2019, 122(11): 113601.
- [5] Sanner C, Huntemann N, Lange R, et al. Autobalanced Ramsey spectroscopy [J]. Physical Review Letters, 2018, 120(5): 053602.
- [6] Kübler H, Sedlacek J A, Schwettmann A, et al. Atom based vector microwave electrometry using rubidium rydberg atoms in a vapor cell[C]//Quantum Information and Measurement 2014, March 18-20, 2014, Messe Berlin, Berlin, Germany. Washington, D.C.: OSA, 2014: JW2A.42.
- [7] Cheng B, Gillot P, Merlet S, et al. Influence of chirping the Raman lasers in an atom gravimeter: phase shifts due to the Raman light shift and to the finite speed of light[J]. Physical Review A, 2015, 92(6): 063617.
- [8] Karcher R, dos Santos F P, Merlet S. Impact of direct-digital-synthesizer finite resolution on atom gravimeters[J]. Physical Review A, 2020, 101(4): 043622.
- [9] Tao J J, Zhou M K, Zhang Q Z, et al. Note: Directly measuring the direct digital synthesizer frequency chirp-rate for an atom interferometer [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(9): 096108.
- [10] Santarelli G, Audoin C, Makdissi A, et al. Frequency stability degradation of an oscillator slaved to a periodically interrogated atomic resonator [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(4): 887-894.
- [11] Millo J, Abgrall M, Lours M, et al. Ultralow noise microwave generation with fiber-based optical frequency comb and application to atomic fountain clock [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(14): 141105.
- [12] Kalubovilage M, Endo M, Schibli T R. Ultra-low phase noise microwave generation with a free-running monolithic femtosecond laser [J]. Optics Express, 2020, 28(17): 25400-25409.
- [13] Lautier J, Lours M, Landragin A. A compact microwave synthesizer for transportable cold-atom interferometers [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(6): 063114.
- [14] Ji J Y, Wang Y. Influence of Raman laser phase

- noise on the measurement resolution of atomic gravimeter[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2015, 35(6): 14-19.
- 季俊云, 王宇. 拉曼激光相位噪声对原子干涉重力仪测量分辨力的影响[J]. *计测技术*, 2015, 35(6): 14-19.
- [15] Wang Y N, Yan S H, Xu D Y, et al. Measuring the phase noise of Raman lasers with an atom-based method[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(3): 033203.
- [16] Luo Y K. Research on key technologies of precision gravity measurement system based on cold atom interferometry[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017: 81-83.
- 罗玉昆. 冷原子干涉精密重力测量系统关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017: 81-83.
- [17] Hu Q Q. Performance evaluation and improvement of the cold atom interferometry gravimeter [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017: 69-72.
- 胡青青. 冷原子干涉重力仪测量性能评估与提升方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017: 69-72.
- [18] Tao J J. Precise control of laser frequency by direct digital synthesizer system in an atom interferometer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 6-15.
- 陶娟娟. 原子干涉仪中 DDS 精密控制激光频率的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 6-15.
- [19] Xu L. Research and implementation of 5MHz-400MHz local oscillator with low phase noise [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019: 55-62.
- 徐林. 5 MHz-400 MHz 低相噪本振源研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019: 55-62.

Development of Integrated Low-Phase Noise Microwave Frequency Synthesizer for Cold Atomic Gravimeter

Ouyang Xinchuan^{1,2}, Hu Qingqing^{3*}, Ye Meifeng¹, Deng Jianliao¹, Yang Bowen^{1,2},
Qi Hanghang^{1,2}, Xiao Ling¹, Wan Jinyin^{1**}, Cheng Huadong^{1,2***}

¹Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China;

³Advanced Interdisciplinary Technology Research Center, National Innovation Institute of Defense Technology,
Beijing 100010, China

Abstract

This paper develops a low-phase noise microwave frequency synthesizer for a cold atom gravimeter. The phase-locked loop technique improves the near-end phase noise at the output frequency of the 100 MHz crystal oscillator. The 6.834 GHz microwave signal required for the ground states transition of the ⁸⁷Rb atom is obtained by building an ultralow-phase-noise multiplier. The measured absolute phase noise performance of the 6.834 GHz signal is -60 dBc/Hz and -120 dBc/Hz at offset frequencies of 1 Hz and 10 kHz, respectively. The frequency resolution is as small as 1.42×10^{-6} Hz. Meanwhile, we investigated the impact of the microwave source's phase noise on the cold atomic gravimeter's measurement resolution. The microwave frequency synthesizer is compact and easily expandable to other quantum precision measurement fields such as atomic clocks and atomic interferometers.

Objective Microwaves are commonly used in quantum precision measurements, and their frequency, power and phase must be precisely controlled. Atomic clocks, for example, are typically closed-loop locked using frequency hopping or phase tuning. Other experiments, such as measuring electric fields with Rydberg atoms, necessitate driving and adjusting the microwave antenna's power. For example, in the cold atomic gravimeter, the doppler shift caused by gravity during the free fall of atoms needs to be compensated by scanning the frequency of the Raman laser and the resolution of the frequency tuning will affect the measurement precision. On the other hand, the performance of the microwave source could affect the measurement accuracy of the experiment and the stability of the atomic clock due to the Dick effect. Because of its ultra-low-phase noise performance, a photo-generated microwave has been widely used in quantum precision measurement. However, due to its complex structure, it is difficult to integrate. This paper develops a miniaturized vehicle-mounted frequency synthesizer with low-phase noise

and ultra-high frequency resolution.

Methods Based on the phase-locked loop (PLL) technique, the phase noise of the 100 MHz ultra-low-phase noise crystal oscillator is improved. [Fig. 1(a)]. Next, the 100 MHz signal enters the comb spectrum generator to obtain the 6.7 GHz frequency after filtering. Finally, the 6.7 GHz signal is mixed with the direct digital synthesizer (DDS) to obtain the required 6.834 GHz for the experiment [Fig. 1(b)]. Besides, we developed a control system to tune the DDS (Fig. 2), microwave switch and attenuator to manipulate the output frequency and power of the frequency synthesizer.

Results and Discussions We adjusted the bandwidth of the phase lock loops(PLL) to 31 Hz. After PLL, the absolute phase noise of the 100 MHz signals has been improved to -96 dBc/Hz at the offset frequency of 1 Hz (Fig. 3). Mixing the output frequencies of channel 1 and channel 2 [Fig. 4(a)] to test the frequency sweep. The test results show that the signal phase remains continuous during the sweeping process [Fig. 4(b)]. The absolute phase noise performances of the 6.834 GHz are shown in Fig. 5. At offset frequencies of 1 Hz and 10 kHz, the phase noise is -60 dBc/Hz and -120 dBc/Hz, respectively. The measured results show that microwave frequency synthesis can meet the atom gravimeter's experimental requirements.

Conclusions This paper builds a miniaturized, transportable microwave source with low-phase noise and ultra-high frequency resolution for a cold atomic gravimeter. The 100 MHz crystal is locked to a 10 MHz crystal by controlling the PLL bandwidth to improve its near-end phase noise from -73 dBc/Hz to -96 dBc/Hz at the offset frequency of 1 Hz. The reference frequency of AD9852 is overclocked to 400 MHz, to extend its frequency output range up to 160 MHz. The achieved frequency resolution is as small as 1.42×10^{-6} Hz. The developed control system can programme the frequency and power of the microwave source to meet the needs of most quantum precision measurement experiments. The evaluation results show that the microwave frequency synthesizer can satisfy the cold atomic gravimeter's requirements of a μ Gal level measurement precision. Furthermore, the PLL and frequency multiplier scheme can be easily extended to other target frequencies without loss of generality.

Key words measurement and metrology; precision measurement; microwave synthesizer; low phase noise; phase locked loop; cold atomic gravimeter

OCIS codes 300.6370; 350.4010; 120.3180