

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.04.010

用于原子干涉重力仪的小型频率合成器设计与实现

摆海龙, 白金海, 胡栋, 王宇*

(航空工业北京长城计量测试技术研究所计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘要: 在原子干涉重力实验中, 拉曼激光制备常采用光学锁相环方法, 即先将主从激光器拍频信号与 6.8 GHz 微波信号源进行混频, 再与直接数字频率合成信号发生器进行鉴频鉴相, 得到的反馈信号用以控制激光器实现低噪声拉曼光输出, 而拉曼光相噪将直接影响原子干涉重力仪的灵敏度。本设计采用 STM32F103C8T6 单片机对 LMX2594 数字锁相环芯片进行编程控制, 通过锁相环频率合成技术, 最终获得 6.8 GHz 的微波信号源。测试结果表明, 该微波信号源相位噪声分别为 $-65.2 \text{ dB}@1 \text{ Hz}$ 、 $-95.3 \text{ dB}@1 \text{ kHz}$, 频率稳定度为 $2.72 \times 10^{-11}@1 \text{ s}$, 输出功率大于 10 dBm。在脉冲间隔时间为 100 ms 时, 信号源对原子干涉重力仪灵敏度的影响为 $8 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$, 分辨率影响为 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2@600 \text{ s}$, 具有频率稳定度高、相位噪声低等优点, 可以满足原子干涉重力实验。

关键词: 量子光学; 原子干涉重力仪; 微波信号源; 相位噪声; 锁相环

中图分类号: O431.2

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)04-00510-09

Design and implementation of a compact microwave synthesizer for atomic interference gravimeter

BAI Hailong, BAI Jinhai, HU Dong, WANG Yu*

(National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology and Calibration, Changcheng Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In atom interferometer gravity experiments, Raman laser preparation commonly uses an optical phase-locked loop method, in which the master and slave laser beat signal is mixed with a 6.8 GHz microwave signal source firstly, then frequency discrimination is performed with direct digital frequency synthesis signal generator, and lastly the feedback signal obtained is used to control the low-noise Raman optical output. So the phase noise of Raman output will directly affect the sensitivity of the atom interference gravimeter. This design uses the STM32F103C8T6 microcontroller to program and control the LMX2594 digital phase-locked loop chip, and obtains a 6.8 GHz microwave signal source through the phase-locked loop frequency synthesis technology. The final experimental results show that the phase

基金项目: 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(61727819)

作者简介: 摆海龙 (1996 -), 甘肃平凉人, 研究生, 主要从事原子干涉重力仪隔振技术方面的研究。E-mail: hailongbai@163.com

导师简介: 王宇 (1978 -), 北京海淀人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事量子计量方面的研究。E-mail: wangyu@cimm.com.cn

收稿日期: 2021-03-25; 修改日期: 2021-05-12

*通信作者。

noise of the microwave signal source is 65.2 dB@1 Hz, and -95.3 dB@1 kHz, Allan deviation (ADEV) is 2.72×10^{-11} @1 s, and the output power is greater than 10 dBm. When the pulse interval time (T) is 100 ms, influence of signal source on sensitivity of the atom interference gravimeter is $8 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$, and on the resolution of the atom interference gravimeter is $2 \times 10^{-8} \text{ g}@600 \text{ s}$. It is shown that the design has the advantages of high frequency stability and low phase noise, which can meet the requirements of microwave reference sources for atom interferometer.

Key words: quantum optics; atom interference gravimeter; microwave signal source; phase noise; phase-locked loop

0 引言

1991年斯坦福大学朱棣文小组实现原子干涉重力仪后,原子干涉重力仪得到了空前的发展。精确的重力加速度测量有助于研究地球的内部结构,在矿场探测、精密计量、基本单位溯源、自然灾害预警等领域都有应用^[1]。原子干涉重力仪的精度受限于对激光频率的精确控制,实验室常使用声光调制器(AOM)作为控制元件,AOM的调谐依赖于高精度的信号源^[2]。相干激光的产生、射频信号的移相、数字鉴频鉴相都需要信号源做本振参考^[3]。

原子干涉重力仪的测量原理是上抛磁光阱中囚禁的 ^{87}Rb 原子,使其竖直向上形成原子喷泉。再采用两束相对传播频差为6.8 GHz的超精细拉曼脉冲,在重力场中对下落的原子团进行操控实现原子干涉,最终在探测区域对原子进行荧光探测,给出干涉条纹,从而获得当地重力加速度。光学锁相环技术(OPLL)是实验室常用的拉曼光制备方法,通过对两台激光器的拍频锁相得到6.8 GHz信号^[4,5]。具体的实现过程是,主从激光器拍频信号与6.8 GHz微波信号源进行混频,混频后得到一个50 MHz的射频信号,该射频信号与直接数字频率合成(DDS)进行数字鉴频鉴相,得到的带宽为500 kHz的信号反馈到激光器的FET电流控制端口,1 kHz以下的信号反馈到PZT电压控制端口,以此控制激光器,实现低噪声拉曼光输出。

原子干涉重力实验常用的E8257微波信号源^[6,7]存在体积大、发热量大、功耗大、噪声大、冗余接口多的缺点,无法满足原子干涉重力仪高精度小型化的目标。国外商用的原子干涉重力仪(如CG6^[8]、FG5^[9])等在实验室阶段使用商用信号源,原理样机达到微伽级,进入工程化阶段都使用自制微波源。针对实验室常用信号源的缺点以及微伽级原子干涉重力仪工程化和小型化的要求,设计了各具特色的微波信号源,应用于导航、陀螺、加计等。微波信号源的设计方法有锁相环(PLL)频率合成、直接数字(DDS)频率合成、PLL+DDS频率合成、直接频率合成等^[10]。

本文采用PLL频率合成技术,使用STM32F103C8T6单片机对数字锁相环芯片进行编程控制,通过锁相环频率合成技术实现点频输出,再放大并倍频,实现了6.8 GHz的微波信号源设计。

1 LMX2594锁相原理

锁相环实际上是一个相位负反馈系统,用于消除频率误差和相位误差,具有跟踪特性。根据锁相环的结构,可分为模拟锁相环和数字锁相环。典型的模拟锁相环由鉴频鉴相器(PFD)、环路滤波器(LPF)和压控振

荡器 (VCO) 组成;典型的数字锁相环是电荷泵锁相环,其组成部件在模拟锁相环的基础上加入了电荷泵 (CP) 和分频器 (DIV)。与模拟锁相环相比,数字锁相环具有锁定范围广、零误锁、静态相位差为 0 (理想状态环路锁定后)、锁定速度快的优点。数字锁相环原理可简述为:鉴频鉴相器对支路参考信号和分频器输出信号的相位差进行比较,产生正比相位差,作用于电荷泵的电流,使电容充电;外部环路滤波器滤除直流量中的高频分量和噪声,用于 VCO 产生震荡;环路滤波器输出的直流信号与 VCO 的频率线性相关,通过改变直流信号来不断减小参考信号和分频信号的误差,最终实现频率相位一致,锁相环输出锁定^[11]。电荷泵锁相环的结构如图 1 所示。

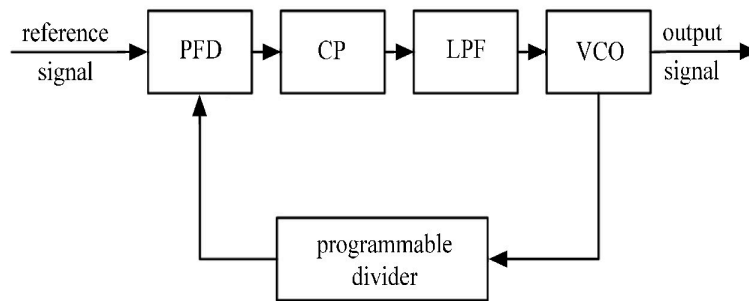


图 1 电荷泵锁相环结构

Fig. 1 Frame diagram of charge pump phase-locked loop

本设计选用的 LMX2594 是 Texas Instruments 生产的一款基于电荷泵锁相环的高性能数字频率合成器,可在不使用内部加倍器的情况下产生 10 MHz~15 GHz 的任意频率信号,因而无需使用分谐波滤波器,其优势是可以实现非常低的带内噪声和集成抖动。高速 N 分频器没有预分频器,从而显著减少了杂散的振幅和数量。还有一个可减轻整数边界杂散的可编程输入倍频器,其具有集成的线性稳压源 (LDO),无需板载低噪声 LDO^[12]。

LMX2594 同时支持单端和差分输入输出,参考信号 f_{SOC} 可通过 OSCinP 或 OSCinM 从参考支路单端输入,也可差分输入,经过倍频 (OSC_2X)、前 R 分频器 (PLL_R_PRE)、倍频器 (MULT) 和后 R 分频器 (PLL_R),最终得到鉴相频率

$$f_{\text{PD}} = \frac{f_{\text{SOC}} N_{\text{OSC_2X}} N_{\text{MULT}}}{N_{\text{PLL_R_PRE}} N_{\text{PLL_R}}}, \quad (1)$$

式中: f_{SOC} 为参考信号输入频率, $N_{\text{OSC_2X}}$ 为倍频数值, N_{MULT} 为倍频器数值, $N_{\text{PLL_R_PRE}}$ 为前 R 分频器数值, $N_{\text{PLL_R}}$ 为后 R 分频器数值。

鉴相器输出的信号经过电荷泵由 Cpout 管脚输出到外置环路滤波器,滤波后的信号通过管脚 Vtune 经过 VCO 和 N 分频器进行反馈。 N 分频器不仅具备整数分频,还包含了分数补偿,可实现 $1 \sim 2^{32}-1$ 的任意分母,整数和小数分频均可通过编程控制。VCO 的输出可表示为

$$f_{\text{VCO}} = f_{\text{PD}} (N + N_{\text{frac}}), \quad (2)$$

式中: N 为整数分频数, N_{frac} 为小数分频数。

f_{VCO} 经由通道分频器 (Channel divider) 编程分频,通道分频器由 4 段组成,总的分频数等于 4 段的乘积,每

一段的分频数都是偶数, 并不是所有的分频值都有效。分频系数为 k , 最终通过管脚 RF_{out} 的输出为

$$F_{out} = \frac{f_{VCO}}{k}. \quad (3)$$

内部寄存器的控制字以 SPI 总线的方式经过管脚 CSB 、 SCK 、 SDI 写入, 还可以通过管脚 MUX_{out} 输出监控。

2 信号源的软硬件设计

本研究所设计的微波信号源主要由 STM32F103C8T6 单片机、LMX2594 芯片、OLED 12864、键盘和超低噪声线性稳压源 LP5912 构成, 整体结构图如图 2 所示。

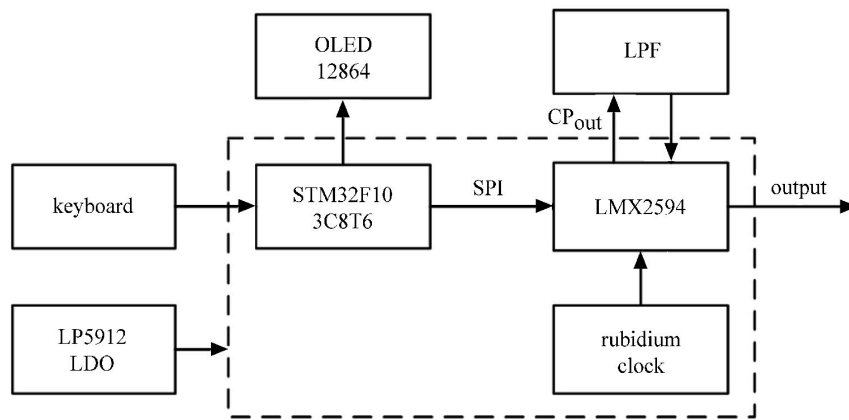


图2 整体设计结构框图

Fig. 2 Structure block diagram of overall design

2.1 参考支路信号源选择

支路参考源信号的相噪、稳定性和杂散等性能水平直接限制最终信号源的性能^[13,14]。高性能的本底需要高额的成本, 本设计参考开发成本和性能要求, 选择支路参考频率为 100 MHz 的同相锁相晶振模块 (SPLLA-10-100), 相位噪声为 $-91.4 \text{ dB}@1 \text{ Hz}$ 、 $-139.9 \text{ dB}@1 \text{ kHz}$, 频率稳定度为 $1.6 \times 10^{-11}@1 \text{ s}$ 、 $4.28 \times 10^{-12}@10 \text{ s}$, 如图 3 所示。为发挥锁相晶振的最大性能, 本设计给锁相晶振模块外参考 10 MHz 更高性能铷钟, 从而使锁相晶振输出信号接近底噪。高性能铷钟相位噪声为 $-95 \text{ dB}@1 \text{ Hz}$ 、 $-150 \text{ dB}@1 \text{ kHz}$, 频率稳定度为 $5 \times 10^{-12}@1 \text{ s}$ 、 $2 \times 10^{-12}@10 \text{ s}$ 、 $6 \times 10^{-13}@100 \text{ s}$ 。

2.2 外部环路滤波设计

环路滤波器是锁相环系统的重要组成部分, 其特点是时域积分、频域低通滤波, 滤除鉴相器输入的杂波, 环路滤波器的性能决定了锁相环系统的相噪、稳定性和杂散等重要指标。按照滤波电路中的电子元件构成, 滤波器分为有源滤波和无源滤波。有源滤波具有输入阻抗高、输出阻抗低、开环增益高的优点, 但其电路结构复杂、功耗大、运放自身具有噪声, 并且带宽有限。无源滤波通过调谐原理滤除系统中的谐波, 在高频系统中更具优势^[15]。环路滤波器的输入是电荷泵的输出电流 ICP , 其输出电压 VC 输入到 VCO 。理论上, 滤波器的阶数越高对高频噪声的抑制能力越强, 但电路也会更加复杂, 容易使系统失稳。本设计选用三阶无源环路滤波器, 传输阻抗为

$$F_s = \frac{1 + sC_2R_2}{s(C_1 + C_2 + C_3) \left(1 + \frac{sC_1C_2R_2}{C_1 + C_2}\right) (1 + sC_2R_3)} \quad (4)$$

以尾1标准型零极点法表示为

$$F_s = \frac{1}{C_t} \frac{1 + T_2s}{s(1 + T_1s)(1 + T_3s)} \quad (5)$$

式中

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3, \quad (6)$$

$$T_1 = \frac{C_1C_2C_3R_2R_3}{\sqrt{(C_1 + C_2 + C_3)(C_1C_2R_2 + C_2C_3R_2 + C_1C_3R_3 + C_2C_3R_3 - C_1C_2C_3R_2R_3)}}, \quad (7)$$

$$T_2 = R_2C_2, \quad (8)$$

$$T_3 = \sqrt{\frac{C_1C_2R_2 + C_2C_3R_2 + C_1C_3R_3 + C_2C_3R_3 - C_1C_2C_3R_2R_3}{C_1 + C_2 + C_3}}. \quad (9)$$

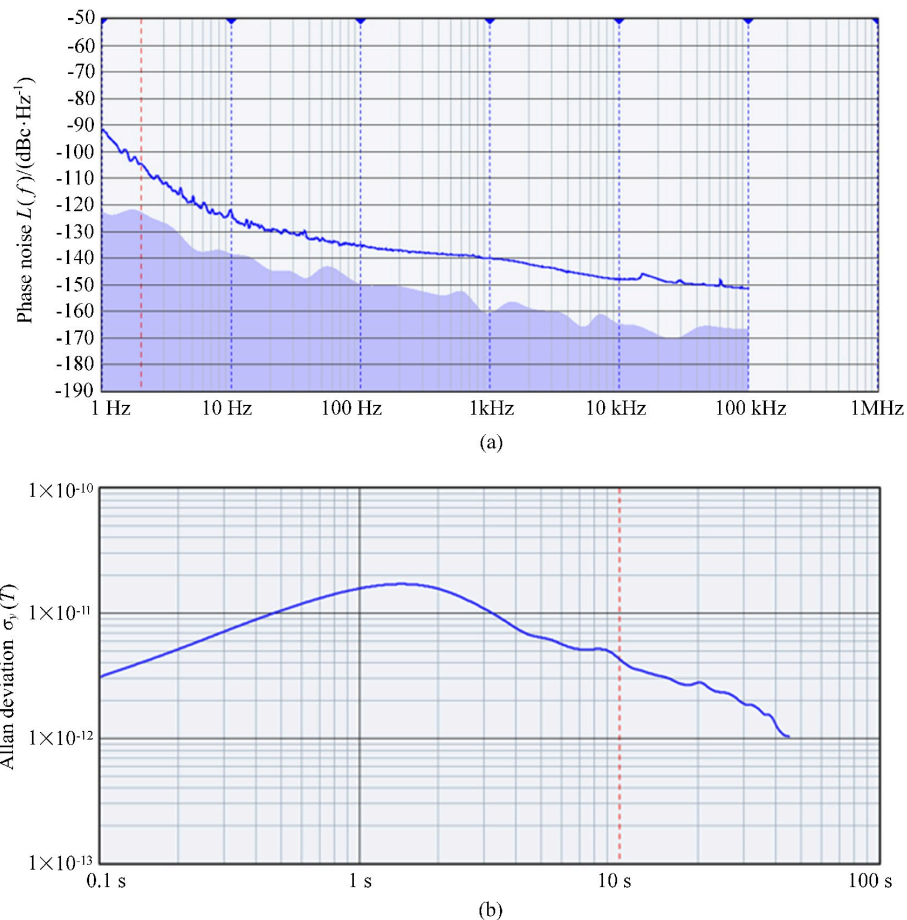


图3 SPLLA-10-100的(a)相位噪声与(b)频率稳定度

Fig. 3 (a) Phase noise and (b) frequency stability of SPLLA-10-100

环路滤波器的相角裕度范围一般设置为 $45^\circ \sim 55^\circ$, 在 48° 时系统具有超高的锁定速度, 在 50° 时噪声抑制比最好^[16]。本设计中, VCO频率为8000 MHz, 鉴相频率为100 MHz, 环路带宽为287.65 kHz, 小于鉴相频率

的 1/10, 参考德州仪器仿真工具 PLLatinum, 同时兼顾信号源能够用作 50 MHz 鉴频鉴相本振源, 对环路滤波器进行设计, 如图 4 所示。

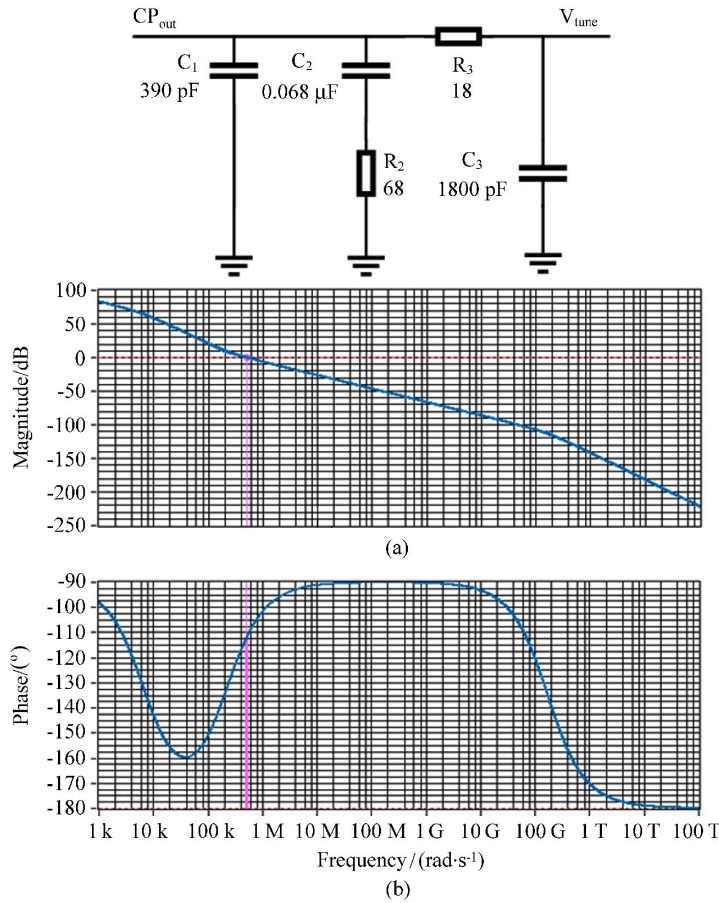


图 4 环路滤波器 (a) 幅频特性及 (b) 相频特性

Fig. 4 (a) Amplitude-frequency characteristic and (b) phase-frequency characteristic of loop filter

2.3 电源设计

本设计采用 DC5 V 外供电, 经过超低噪声线性稳压芯片 LP5912 输出 3.3 V 电源, 供 LMX2594 和 STM32F103C8T6 单片机使用, 设计原理图如图 5 所示。

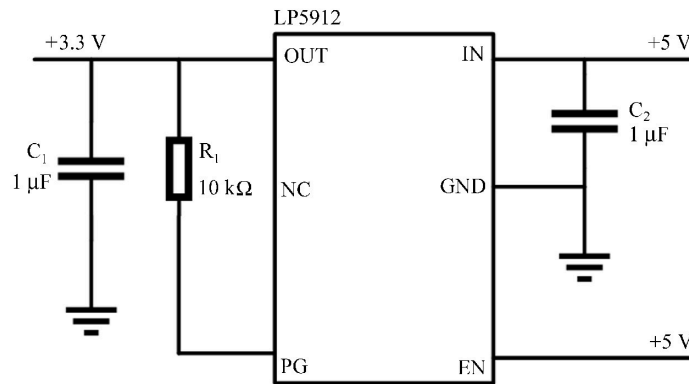


图 5 频率合成器电源原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the frequency synthesizer power supply

2.4 程序设计

本设计软件采用C语言编写,选择的IDE工具为Keil uVision5,控制MCU为STM32F103C8T6,具有工作频率高和IO口丰富的特点。LMX2594具有113个寄存器,通过SPI协议对寄存器进行数据写入,配置通过CSB、SCK、SDI管脚进行,数据通过J-Link烧录到MCU,然后由MCU的IO引脚根据PLL芯片的SPI控制时序对PLL进行寄存器控制写入。

上电后,程序运作。首先初始化键盘、LCD和LMX2594;其次判断键盘状态,若无输入,进入等待键盘输入状态,当键入设定参数后,程序对键入值进行解析计算;最终通过SPI接口写入LMX2594。软件运作流程如图6所示。

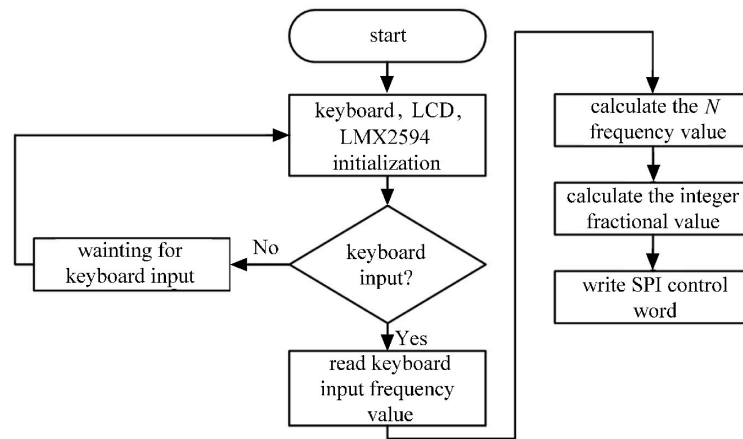


图6 软件流程图

Fig. 6 Flow chart of the software

3 实验测试

原子干涉重力仪的精度主要受限于拉曼光相噪和振动噪声,其中拉曼光相噪是目前迫切要解决的因素,国内外学者对此做了大量的研究,如美国斯坦福大学诺奖得主 Steven 小组^[17]、欧洲德国洪堡大学 Tino 小组^[18]、国内华中科技大学胡忠坤小组^[19]。评判信号源对原子干涉重力实验的影响都是用相噪传递函数,要求信号源对原子干涉重力实验相噪的影响小于原子干涉重力仪要达到的分辨率^[20]。相噪传递函数 $H_\phi(\omega)$ 可表示为

$$H_\phi(\omega)^2 = \frac{16}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2\right]^2} \sin\left(\frac{\omega T}{2}\right)^2 \left[\sin\frac{1}{2}\omega(T-2\tau) + \frac{\omega}{\Omega} \cos\frac{\omega T}{2} \right]^2, \quad (10)$$

式中: Ω 是 Rabi 频率, τ 为 $\pi/2$ 脉冲长度, T 为脉冲时间间隔。信号源相噪对原子干涉重力灵敏度的影响 σ_ϕ 可表示为

$$\sigma_\phi^2 = \int_0^\infty H_\phi(\omega)^2 S_\phi(\omega) d\omega, \quad (11)$$

式中 $S_\phi(\omega)$ 是测得的信号源相噪数据。

设置 LMX2594 的输出为 6.820 GHz, 与 6.8 GHz 微波信号(KeySight E8257)进行混频,使用同相科技相位噪声测试仪(ST8030)进行相噪和稳定度测试,测试结果如图7所示,相位噪声为 $-65.2 \text{ dB}@1 \text{ Hz}$ 、 -95.3

dB@1 kHz, 频率稳定度 ADEV 为 2.72×10^{-11} @1 s、 6.12×10^{-12} @10 s。在对本信号源设计进行评判的过程中, 取脉冲时间间隔 $T = 100$ ms, π 脉冲持续时间 $\tau = 30$ μ s, 计算得到微波信号源对原子干涉重力仪灵敏度的影响为 8×10^{-8} m/s²/Hz^{1/2}, 600 s 积分时间对原子干涉重力仪分辨率的影响为 2×10^{-8} m/s²。

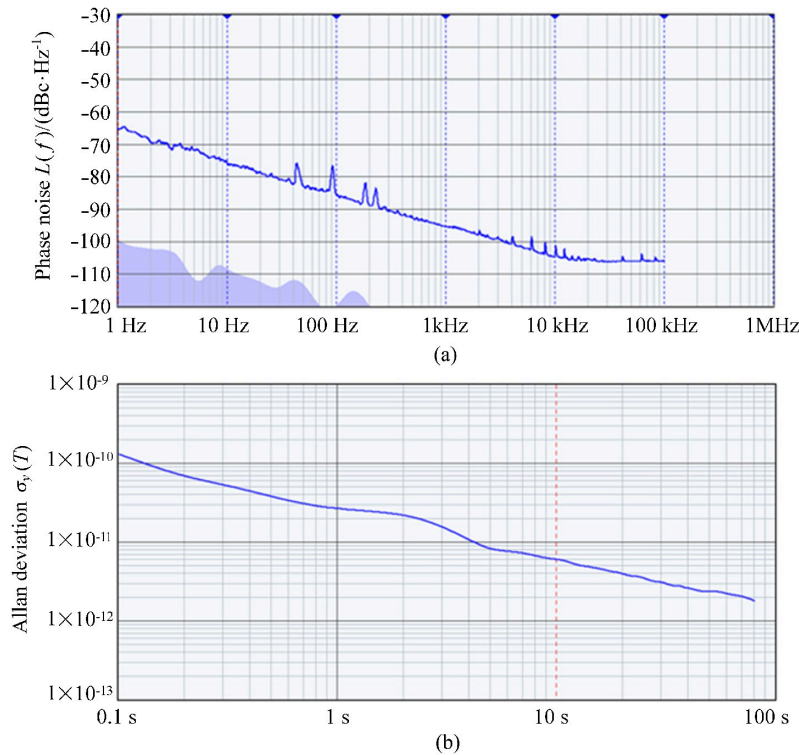


图7 微波信号源 (a) 相位噪声及 (b) 频率稳定度

Fig. 7 (a) Phase noise and (b) frequency stability of microwave signal source

4 结 论

本设计中微波信号源对原子干涉重力仪灵敏度影响为 8×10^{-8} m/s²/Hz^{1/2}, 600 s 积分时间对原子干涉重力仪分辨率影响为 2×10^{-8} m/s²。其替代了大功率 Keysight E8257, 实现了 15 W 小功率的频率合成器设计, 为原子干涉重力实验降低功耗 225 W, 体积也远小于 E8257, 同时又能通过键盘改变频率实现 50 MHz 鉴频鉴相本振参考, 符合原子干涉重力仪工程化和小型化的目标, 为原子干涉重力仪从实验室到现场和机载操作做出了贡献。

参考文献:

- [1] Freier C, Hauth M, Schkolnik V, et al. Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 723: 012050.
 - [2] Zhang Q Z. *Research of DDS Signal Source in An Atom Interferometry Gravimeter* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- 张巧珍. 原子干涉测量中 DDS 信号源的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.

- [3] Bai J H, Hu D, Gong H, *et al.* An optical phase-lock loop system for atom interferometers [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2020, 40(6): 26-30.
白金海, 胡栋, 贡昊, 等. 用于原子干涉仪的光学锁相环系统 [J]. 计测技术, 2020, 40(6): 26-30.
- [4] Peters A, Chung K Y, Chu S. High-precision gravity measurements using atom interferometry [J]. *Metrologia*, 2001, 38(1): 25-61.
- [5] Schmidt M, Prevedelli M, Giorgini A, *et al.* A portable laser system for high-precision atom interferometry experiments [J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(1): 11-18.
- [6] Sorrentino F, Lien Y H, Rosi G, *et al.* Sensitive gravity-gradiometry with atom interferometry: Progress towards an improved determination of the gravitational constant [J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(9): 095009.
- [7] Zhou M K, Hu Z K, Duan X C, *et al.* Precisely mapping the magnetic field gradient in vacuum with an atom interferometer [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(6): 061602.
- [8] Lewis A M, Rodgers A. Tests with commercial classical gravimeters in preparation for tests of quantum prototype [R]. 2018.
- [9] Poli N, Wang F Y, Tarallo M G, *et al.* Precision measurement of gravity with cold atoms in an optical lattice and comparison with a classical gravimeter [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(3): 038501.
- [10] Luo M, Wang G C, Liu C J, *et al.* RF SiP design based on silicon integrated passive device [J]. *Electronics Process Technology*, 2016, 37(1): 17-20.
罗明, 王贵昌, 刘长江, 等. 一种小型毫米波宽带频率源设计实现 [J]. 电子工艺技术, 2016, 37(1): 17-20.
- [11] Liu T. Design and implementation of frequency source based on DDS device [J]. *Electronic Science and Technology*, 2013, 26(1): 56-58.
刘韬. 基于 DDS 频率源的设计与实现 [J]. 电子科技, 2013, 26(1): 56-58.
- [12] Texas Instruments, LMX2594 15 GHz wideband PLLatinum RF synthesizer with phase synchronization and JESD204B support [OL]. 2017-3. <https://html.alldatasheetcn.com/html-pdf/932720/TI1/LMX2594/54/1/LMX2594.html>.
- [13] Zhou F, Li N, Liu X L, *et al.* The design of DDS signal generator based on AD9951 [J]. *Software Guide*, 2020, 19(7): 85-88.
周锋, 李楠, 刘雪莉, 等. 基于 AD9951 的 DDS 信号发生器设计 [J]. 软件导刊, 2020, 19(7): 85-88.
- [14] Huang H P, Qiu B. Design and implementation of DDS sine wave signal generator based on AD9850 [J]. *Electronics World*, 2013, 4: 57-59.
黄汉平, 邱波. 基于 AD9850 构成的 DDS 正弦波信号发生器设计与实现 [J]. 电子世界, 2013, 4: 57-59.
- [15] Liu A. *Design of Wideband Phase Lock Loop Filter* [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
刘冕. 宽带 PLL 环路滤波器的设计 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [16] Liu Y. *Design of Phase Detector and Loop Filter in PLL* [D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
刘颖. 锁相环中鉴相器和环路滤波器的设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [17] Young B, Kasevich M, Chu S. *Precision Atom Interferometry with Light Pulses* [M] // *Atom Interferometry*, Amsterdam: Elsevier, 1997: 363-406.
- [18] Schmidt M, Senger A, Hauth M, *et al.* A mobile high-precision absolute gravimeter based on atom interferometry [J]. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, 2(3): 170.
- [19] Zhou M K. *Experimental Demonstration of an Atom Interferometry Gravimeter* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
周敏康. 原子干涉重力测量原理性实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [20] Yao S N. *Investigation on the Phase Noise of Raman Laser* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
姚世娜. 拉曼激光的相位噪声研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.