

# $^{85}\text{Rb}$ 喷泉钟的低相位噪声微波频率综合器设计

张宁<sup>1,2</sup>, 王倩<sup>1,2</sup>, 赵伟靖<sup>1,2</sup>, 姬清晨<sup>1,3</sup>, 魏荣<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>上海大学理学院, 上海 200444

**摘要** 采用低相位噪声频率合成和锁相技术,为世界首台 $^{85}\text{Rb}$ 喷泉钟研制了低相位噪声微波频率综合器,实现了低相位噪声的钟频信号输出。当该微波频率综合器的频率分辨率为 $0.7\ \mu\text{Hz}$ ,输出频率为 $3.036\ \text{GHz}$ 时,在傅里叶频率 $1\ \text{Hz}$ ,  $100\ \text{Hz}$ 和 $10\ \text{kHz}$ 处的单边带相位噪声谱密度分别为 $-97\ \text{dBc}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ,  $-127\ \text{dBc}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 和 $-130\ \text{dBc}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ,剩余相位噪声比本机振荡器绝对噪声低 $20\ \text{dB}$ 以上。研究了量子散弹噪声和Dick效应,发现在微波链路噪声为主要噪声的情况下, $^{85}\text{Rb}$ 喷泉钟的稳定度与目前 $^{87}\text{Rb}$ 和 $^{133}\text{Cs}$ 喷泉钟相当。微波系统对 $^{85}\text{Rb}$ 喷泉钟稳定度的贡献为 $2.9\times 10^{-13}\ \tau^{-1/2}$ ,其中频率综合器的剩余相位噪声贡献为 $1.2\times 10^{-14}\ \tau^{-1/2}$ ( $\tau$ 为积分时间)。利用该微波综合器,可以实现 $^{85}\text{Rb}$ 喷泉钟的高稳定运行,并为其性能的提升打下基础。

**关键词** 原子与分子物理学; 原子喷泉钟;  $^{85}\text{Rb}$ ; 频率综合器; 低相位噪声

中图分类号 O433.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1002001

## Design of Low Phase Noise Microwave Frequency Synthesizer for $^{85}\text{Rb}$ Fountain Clock

Zhang Ning<sup>1,2</sup>, Wang Qian<sup>1,2</sup>, Zhao Weijing<sup>1,2</sup>, Ji Qingchen<sup>1,3</sup>, Wei Rong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China

**Abstract** We have developed a low-noise microwave frequency synthesizer for the world's first  $^{85}\text{Rb}$  fountain clock. The setup is based on the techniques of low phase-noise frequency synthesis and phase-locking, which can realize the clock frequency signal output with low phase noise. When the output frequency is about  $3.035\ \text{GHz}$  and the frequency resolution is  $0.7\ \mu\text{Hz}$ , the single-sideband phase noise densities at  $1\ \text{Hz}$ ,  $100\ \text{Hz}$ , and  $10\ \text{kHz}$  Fourier frequency are  $-97\ \text{dBc}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ,  $-127\ \text{dBc}\cdot\text{Hz}^{-1}$ , and  $-130\ \text{dBc}\cdot\text{Hz}^{-1}$ , respectively. Moreover, the residual phase noise of the microwave frequency synthesizer is lower by  $20\ \text{dB}$  than that of the local oscillator. By comparing the contributions of quantum project noise and Dick effect, we show that the stability of the  $^{85}\text{Rb}$  fountain clock is comparable to those of  $^{87}\text{Rb}$  clock and  $^{133}\text{Cs}$  clock, where the noise from a microwave system is the main noise source. The stability caused by the microwave source for the  $^{85}\text{Rb}$  fountain clock is estimated as  $2.9\times 10^{-13}\ \tau^{-1/2}$  ( $\tau$  is integration time), among which the contribution of the residual phase noise from the frequency synthesizer is  $1.2\times 10^{-14}\ \tau^{-1/2}$ . The synthesizer is helpful to realize the operation of the  $^{85}\text{Rb}$  fountain clock with high stability and is expected to be the basis of the future improvement in clock performances.

**Key words** atomic and molecular physics; atomic fountain clock;  $^{85}\text{Rb}$ ; frequency synthesizer; low phase noise

**OCIS codes** 020.2930; 300.6210; 300.6370

## 1 引 言

近年来,原子喷泉频标<sup>[1-3]</sup>发展迅速,目前主要

的原子喷泉钟工作介质是 $^{133}\text{Cs}$ 和 $^{87}\text{Rb}$ 原子。国际单位制(SI)基于 $^{133}\text{Cs}$ 超精细能级跃迁辐射频率定义秒, $^{133}\text{Cs}$ 喷泉钟复现秒的精度达 $10^{-16}$ 量级<sup>[4-5]</sup>,

收稿日期: 2019-12-25; 修回日期: 2020-02-01; 录用日期: 2020-02-21

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB21030200)

\* E-mail: weirong@siom.ac.cn

$^{87}\text{Rb}$  喷泉钟的不确定度也可达到  $10^{-16}$  量级<sup>[6]</sup>。它们不仅在时频应用领域发挥重要作用,还被广泛应用于基础研究,例如测量精细结构常数的含时变化等<sup>[7-9]</sup>。由于 $^{85}\text{Rb}$  基态跃迁频率比较低,以 $^{85}\text{Rb}$  为介质的喷泉钟被认为在稳定度极限方面具有一定的劣势。但是, $^{85}\text{Rb}$  喷泉钟也具有一定的应用价值与科研价值,如利用 $^{85}\text{Rb}$  和 $^{87}\text{Rb}$  超精细跃迁比测量精细结构常数的含时变化<sup>[9-10]</sup>,或者利用它的特殊碰撞频移系数消除喷泉钟的碰撞频移<sup>[11-12]</sup>等。基于以上原因,本课题组开展了 $^{85}\text{Rb}$  喷泉钟的研究,在未选态且开环运行的情况下将 $^{85}\text{Rb}$  的基态超精细分裂的测量精度提高到  $5 \times 10^{-16}$ <sup>[13]</sup>,比原有结果提高了 5 个数量级。

稳定度是原子喷泉钟的重要指标之一,它受到量子系统噪声和微波系统噪声的共同影响<sup>[14-16]</sup>。对于微波系统而言,如果采用商用晶振作为本机振荡器(LO),可以实现秒稳在  $10^{-13}$  量级的短期频率稳定度,同时为了不恶化喷泉钟的稳定度,要求微波综合器的剩余相位噪声远低于 LO 的绝对相位噪声,因此超低相位噪声微波综合器一直是喷泉钟的一个研究热点。法国巴黎天文台<sup>[17-18]</sup>、美国国家标准局<sup>[19]</sup>、中国计量院<sup>[20]</sup>、中国科学院上海光学精密机械研究所<sup>[21]</sup>等单位都开展了专门的研究,在不同载波频率下,链路的剩余相位噪声较绝对相位噪声低 15 dB~25 dB。目前 $^{133}\text{Cs}$  和 $^{87}\text{Rb}$  频率综合器都有了相对成熟的方案,而关于 $^{85}\text{Rb}$  喷泉钟的微波链路研究鲜有报道,因此本课题组自行研制了 $^{85}\text{Rb}$  喷泉钟的微波频率综合器。基于低温蓝宝石振荡器<sup>[22]</sup>或者飞秒光梳技术<sup>[23-24]</sup>,可以实现更高的频率稳定度,但是由于造价和可靠性等原因,目前大多数喷泉钟采用晶体振荡器方案。作为国际上首台空间冷原子钟关键技术的微波系统,也是采用了自制微波链路的方案,微波综合器的相位噪声比 LO 低约 1 个数量级<sup>[25]</sup>。

本文证明了在微波系统噪声为主要噪声的情况下, $^{85}\text{Rb}$  喷泉钟可以达到与 $^{87}\text{Rb}$  和 $^{133}\text{Cs}$  喷泉钟相当的短期频率稳定度水平。根据稳定度要求,研制了应用于 $^{85}\text{Rb}$  喷泉钟的低相位噪声微波频率综合器,用于原子选态和形成分离振荡场。通过低噪声器件选取、锁相环路优化和功率匹配等方法,实现了微波综合器 100 MHz 输入,3.035 GHz 输出,频率调节范围在 40 MHz 以上,频率调节精度为  $0.7 \mu\text{Hz}$ ,单边带相位噪声低于 LO 噪声 20 dB 以上。结合目前 $^{85}\text{Rb}$  喷泉钟的运行指标<sup>[13]</sup>,根据

Dick 效应,计算出微波综合器对短期频率稳定度的贡献为  $1.2 \times 10^{-14}$ ,不仅满足了目前 $^{85}\text{Rb}$  喷泉钟物理实验的要求,未来也可应用更高稳定度的 LO,使 $^{85}\text{Rb}$  喷泉钟的稳定度达到量子散弹噪声极限。

## 2 $^{85}\text{Rb}$ 喷泉的稳定度

原子喷泉钟利用激光冷却、原子囚禁等技术,使原子温度冷却到  $\mu\text{K}$  量级。通过移动光学黏胶,使原子获得向上的初速度,原子在重力作用下向上做自由运动。原子在上抛、下落过程中,两次经过微波腔,微波腔中的驻波场由微波系统提供,可实现原子与分离振荡场的作用。将得到的 Ramsey 干涉条纹作为鉴频谱线,利用方波调制的办法将微波频率锁定在原子跃迁谱线的半峰全宽处,如图 1 所示。冷原子喷泉钟的短期频率稳定度可以表示为

$$\sigma_y^2(\tau) = \sigma_{y,\text{phy}}^2(\tau) + \sigma_{y,\text{MW}}^2(\tau), \quad (1)$$

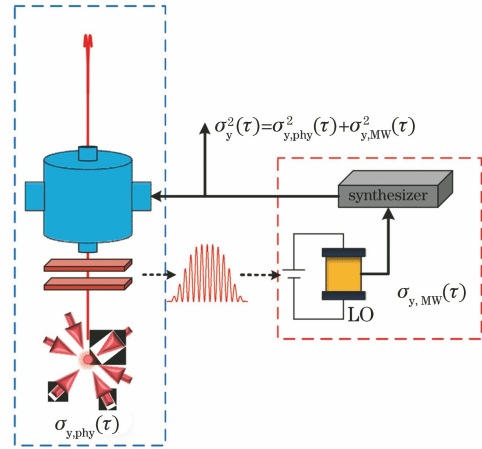


图 1 喷泉钟量子系统与微波系统鉴相示意图

Fig. 1 Diagram of phase detection between quantum system and microwave system in fountain clock

式中: $\sigma_{y,\text{phy}}(\tau)$  为量子系统对稳定度的贡献; $\sigma_{y,\text{MW}}(\tau)$  是微波系统对稳定度的贡献,喷泉钟的周期性运行模式使得鉴相过程不可避免地出现死时间,因此 $\sigma_{y,\text{MW}}(\tau)$  可以通过 Dick 效应<sup>[26-27]</sup> 描述。 $\sigma_{y,\text{phy}}(\tau)$

满足  $\sigma_{y,\text{phy}}(\tau) = \frac{1}{\pi Q_{\text{at}}} \sqrt{\frac{T_C}{\tau}} \sqrt{\frac{1}{N_{\text{at}}} + \frac{1}{N_{\text{at}} n_{\text{ph}}} + \frac{2\sigma_{\text{eN}}^2}{N_{\text{at}}^2}}$ , 其中  $T_C$  为喷泉运行周期,  $\tau$  为积分时间,  $Q_{\text{at}}$  为原子谱线的品质因子,  $N_{\text{at}}$  为探测原子数目,  $n_{\text{ph}}$  为原子的荧光发射效率,  $\sigma_{\text{eN}}$  为探测原子数的不确定度。 $\sigma_{y,\text{phy}}(\tau)$  表达式根号中的第一项表示量子散弹噪声,它是量子系统的主要噪声,第二项和第三项分别表示探测荧光脉冲的光子散弹噪声和探测噪声,由于第二、三项比第一项低一个数量级以上,因此有

$$\sigma_{y,\text{phy}}(\tau) \approx \frac{1}{\pi Q_{\text{at}}} \sqrt{\frac{T_C}{\tau}} \sqrt{\frac{1}{N_{\text{at}}}}. \quad (2)$$

Dick 效应是指在周期性鉴相的频标中,频标的输出相位会由于微波噪声下转换到环路通频带内而恶化,进而频标频率稳定度恶化,表示为

$$\sigma_y^{\text{Dick}}(\tau) = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g_m^2}{g_0^2} S_y(m/T_C) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

式中: $S_y(m/T_C) = (f^2/f_0^2) S_\varphi(m/T_C)$ 是微波信号在频率  $m/T_C$  处的频率起伏谱密度, $S_\varphi$  为相位起伏谱密度, $f$  为傅里叶频率, $f_0$  为载波频率, $m/T_C$  为  $1/T_C$  的  $m$  倍频; $g_m$  和  $g_0$  由灵敏度函数  $g(t)$  通过傅里叶变换计算得出<sup>[26]</sup>。 $g_m^2/g_0^2$  有明显的低频特性,表示载波附近的相位噪声对稳定度的影响较大,如图 2(a)所示。降低 Dick 效应可以通过下面三种方式:降低本机振荡器的相位噪声,减小喷泉钟运行周期  $T_C$  和增大鉴相占空比。

共振频率  $\nu_0$  对稳定度的影响表现在  $\sigma_{y,\text{phy}}(\tau)$  上,在相同线宽(约 1 Hz)下,由于  $\sigma_{y,\text{phy}}(\tau) \propto Q_{\text{at}}^{-1} \propto$

$\nu_0^{-1}$ ,因此,相比<sup>133</sup>Cs 的 9.1 GHz 共振频率和<sup>87</sup>Rb 的 6.8 GHz 的共振频率,<sup>85</sup>Rb 的 3.0 GHz 共振频率将导致  $\sigma_{y,\text{phy}}(\tau)$  恶化。而微波链路不受  $Q_{\text{at}}$  的影响,在  $\sigma_{y,\text{phy}}(\tau) \ll \sigma_{y,\text{MW}}(\tau)$  的情况下,<sup>85</sup>Rb 喷泉钟可以达到与<sup>133</sup>Cs 和<sup>87</sup>Rb 喷泉钟相当的稳定度水平,而采用稳定度更高的 LO 后,即  $\sigma_{y,\text{phy}}(\tau) > \sigma_{y,\text{MW}}(\tau)$ ,<sup>85</sup>Rb 喷泉钟较小  $\nu_0$  的劣势将显现出来。以目前运行的<sup>85</sup>Rb 喷泉钟为例,量子系统的贡献约为  $1.7 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ 。微波系统如果只考虑 LO 的噪声,取商用晶振 BVA 8607 为例,其单边带(SSB)相位噪声功率谱密度曲线如图 2(a)所示,它对稳定度的贡献为  $2.62 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ ,其中  $T$  为自由飞行时间, $\tau_p$  为微波作用时间, $\Delta\nu$  为 Ramsey 线宽。可以看出,微波系统的噪声是影响喷泉钟稳定度的主要因素。当以 BVA 8607 晶体振荡器作为 LO 时,三种原子介质的喷泉钟秒稳  $\sigma_y(1)$  随喷泉运行周期  $T_C$  的变化如图 2(b)所示,可以看出,<sup>85</sup>Rb 喷泉钟的短期频率稳定度与<sup>133</sup>Cs 和<sup>87</sup>Rb 喷泉钟的比较接近。

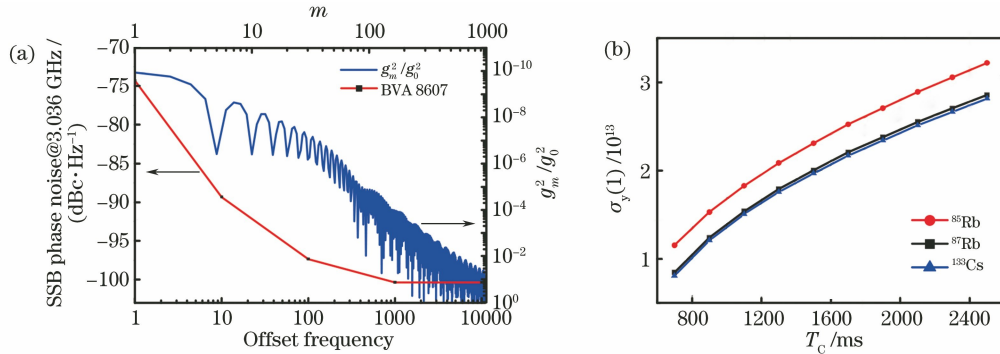


图 2 不同条件下 LO 对喷泉钟稳定度的影响。(a)  $T_C=2.8$  s,  $T=0.56$  s,  $\tau_p=40$  ms; (b)  $\Delta\nu=1$  Hz,  $T=0.56$  s,  $\tau_p=40$  ms  
Fig. 2 Influence of LO on stability of fountain clock under different conditions. (a)  $T_C=2.8$  s,  $T=0.56$  s, and  $\tau_p=40$  ms; (b)  $\Delta\nu=1$  Hz,  $T=0.56$  s, and  $\tau_p=40$  ms

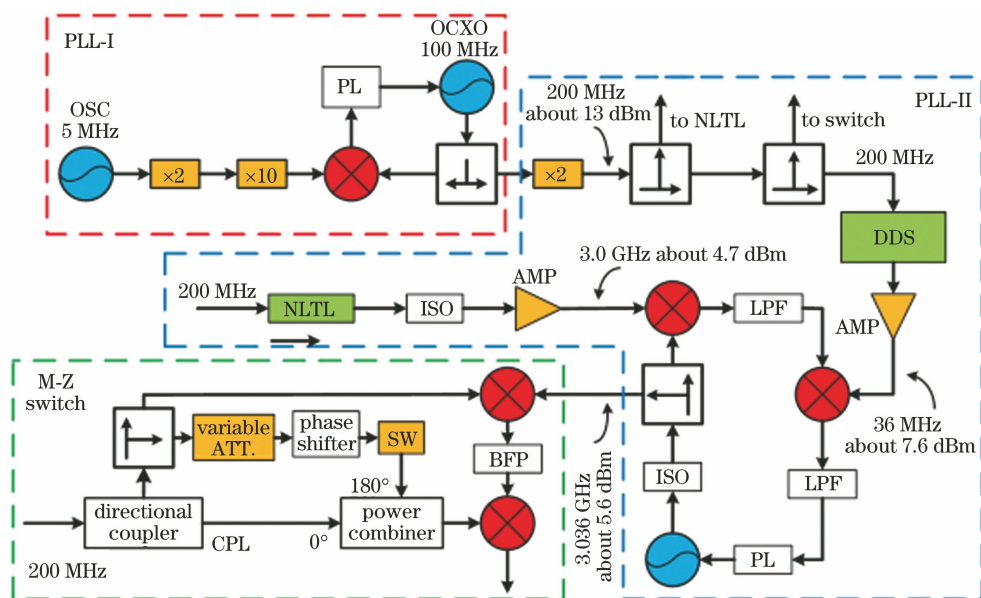
### 3 <sup>85</sup>Rb 喷泉钟的微波频率综合器结构

根据<sup>85</sup>Rb 喷泉钟对微波系统的要求,设计研制了低噪声的微波频率综合器,整个微波系统的链路结构如图 3 所示,其主要由两个锁相环路(PLL-I、PLL-II)和一个微波开关构成,PLL-II 为综合器的主体,其中 PL 为锁相电路,ISO 为隔离器,AMP 为功率放大器,LPF 为低通滤波器,BFP 为带通滤波器,CPL 为耦合输出端。搭建了完全相同的两套 3.036 GHz 频率综合器,用于测量其剩余相位噪声。频率综合器放置在机箱内,各部件均固定在铝材上,以保证器件接地良好并抑制振动。

在 PLL-I 中,首先通过有源倍频器和十倍频器,将 BVA 8607 晶体振荡器(OSC)的频率由

5 MHz 转换至 100 MHz。然后将一个低噪声 100 MHz 的高精度恒温晶振(OCXO)锁定在 20 倍频的 OSC 信号上,通过调整锁相环电路参数,使得 OCXO 的相位噪声在锁相带宽内跟随 OSC 变化,优化 PLL-I 输出的 100 MHz 信号的绝对相位噪声。这个 100 MHz 信号将同时用于<sup>87</sup>Rb 喷泉钟的 6.834 GHz 微波频率综合器和<sup>85</sup>Rb 喷泉钟的 3.036 GHz 微波频率综合器。在 PLL-II 中,首先通过一个有源倍频器,将 PLL-I 输出的 100 MHz 信号转换至 200 MHz,此时信号功率为 13 dBm。此 200 MHz 信号经过两个功分器分为三路信号,分别作为非线性传输线(NLTL)、微波开关的输入信号以及直接数字频率合成器(DDS)的参考信号。NLTL 输出的 3.0 GHz 信号经过隔离器和功率放大



图 3  $^{85}\text{Rb}$  喷泉钟的微波系统链路设置Fig. 3 Chain setup of microwave system of  $^{85}\text{Rb}$  fountain clock

器后,功率达到 4.7 dBm,然后在混频器上与介质振荡器(DRO)输出的 3.036 GHz 信号进行混频。混频后产生一个低频 36 MHz 信号和一个高频信号,其经过低通滤波器后,与 DDS 输出的参考信号进行鉴相,产生的相位误差信号经过 LPF 和环路滤波器,输入到 DRO 频率调谐端以控制 DRO 频率,最终将 DRO 的频率锁定为 3.036 GHz。

在喷泉钟脉冲的运行过程中,要对微波信号进行开断控制,目前使用的微波开关为电控开关。为了达到微波相位连续、附加相位噪声更小的要求,本文利用马赫-曾德尔干涉原理自制了 M-Z 型微波开关,具体的链路结构如下。200 MHz 微波信号经过一个定向耦合器,被分为两路信号,测试显示直通端功率与输入端功率相差不大,耦合端功率比直通端功率低 9.6 dB。在直通端连接一个功分器,其中一路与 PLL-II 输出的 3.036 GHz 信号混频产生 3.236 GHz 信号,使用一个腔体带通滤波器滤除其他频率成分。另一路经过可调衰减器(variable ATT),以平衡与耦合端的微波功率,再利用一个移相器,调节两路 200 MHz 信号之间的相位差为  $180^\circ$ 。两路 200 MHz 微波同时输入合束器形成干涉,最后用一个电控开关(SW)控制直通端的微波输入。当电控开关打开时,两路信号相消,微波开关输出 3.236 GHz 信号。当电控开关关闭时,输出的 200 MHz 与 3.236 GHz 的信号进行混频,输出所需要的 3.036 GHz 的信号。最后,实现 200 MHz 信号的关断比在 60 dB 以上。

#### 4 频率综合器的性能

使用频谱分析仪测量频率综合器的输出频谱,结果如图 4 所示,其中  $F$  为频谱仪采集的频率。可以看出,频率综合器可以被很好地锁定在所需的 3.036 GHz 频率上,输出功率为 5.6 dBm,且无明显杂散频率。微波综合器输出的 3.036 GHz 信号的绝对相位噪声由 PLL-I 输出的 100 MHz 信号的绝对相位噪声决定,BVA 8607 和 OCXO 的相位噪声以及锁相后 100 MHz 信号的绝对相位噪声如图 5 所示。BVA 8607 晶体振荡器的相位噪声在傅里叶频率为 100 Hz 以内时优于 OCXO 振荡器,而在 100 Hz 以外劣于 OCXO 振荡器。通过 100 Hz 的锁相环路,最终得到的 100 MHz 输出信号兼具了 BVA 8607 近旁频(小于等于 100 Hz)和 OCXO 振荡器远旁频(大于 100 Hz)低噪声的优点,有利于更好的稳定度指标的获取。使用微波干涉法对 PLL-II 中的关键器件以及整套微波综合器进行了剩余相位噪声测试,测试链路如图 6 所示。以信号发生器(Agilent E8257D)产生的信号作为测试系统的输入信号,其经过功分器后,同时输入到两个待测器件(DUT)中,在其中一个待测器件后连接移相器,使两路信号在鉴相器(PFD)处相干相消,信号经过 LPF 后,利用快速傅里叶变换分析仪(FFT analyzer, MODEL SR760)采集测试结果。该测试方法的测量灵敏度高并且可有效消除共模噪声<sup>[28]</sup>。

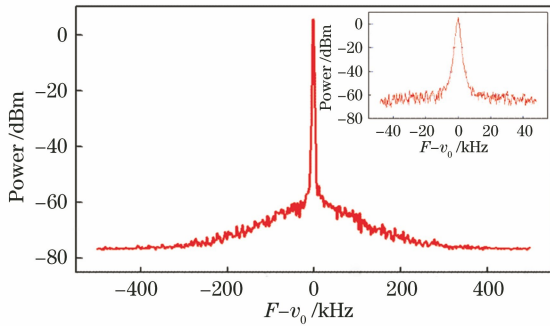


图 4 频率综合器的输出频谱(插图为 100 kHz 范围内的输出频谱)

Fig. 4 Power spectrum of microwave signal in range of 1 MHz (insert is power spectrum in range of 100 kHz)

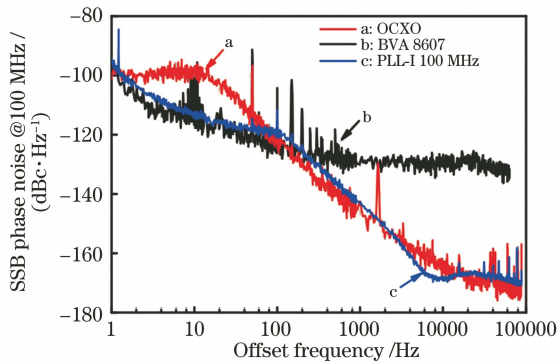


图 5 微波系统的绝对相位噪声

Fig. 5 Absolute phase noise of microwave system

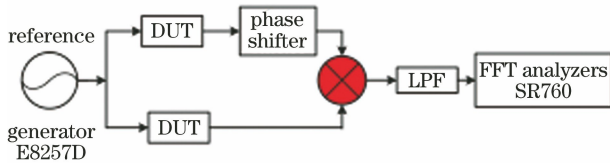


图 6 剩余相位噪声的测试链路

Fig. 6 Experimental setup used for measurement of phase noise

综合器的剩余相位噪声主要来自于有源器件,故对使用的有源器件进行了特殊选择,并测试了它们的相位噪声,测试结果如图 7 所示,其中相位噪声在特定频率点的恶化是测试过程中的环境因素引入的。链路中使用低噪声倍频器件 NLTL 产生 3.0 GHz 微波信号,其内部集成了功率放大器、非线性传输线和腔体滤波器这三个器件,且它的噪声性能对频率综合器的剩余相位噪声起决定性作用,经测试发现,NLTL 在输入功率为 10 dBm 时相位噪声最小,单边带相位噪声谱密度在 1 Hz 处为  $-104 \text{ dBc} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,如图 7 中 a 线所示。PLL-II 中的参考信号由 DDS 提供,本文的 DDS 基于 AD 9854 芯片,参考频率为 200 MHz,输出频率范围为

0~150 MHz,频率精度达  $0.7 \mu\text{Hz}$ ,输出功率、相位均可调节,同时具有跳频(FSK)功能。为减小 DDS 杂散频率的影响,在 DDS 输出端后连接一个截止频率为 40 MHz 的椭圆滤波器(EF)。测得的 DDS+EF 的单边带相位噪声谱密度在 1 Hz 处为  $-109 \text{ dBc} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,如图 7 中 b 线所示。在链路设置上,对 DDS 输出的 36 MHz 信号、NLTL 输出的 3.0 GHz 信号与 DRO 输出的 3.036 GHz 信号进行了差频鉴相,而非倍(分)频鉴相,故可以有效避免这两个频率信号的相位噪声倍频恶化。此外,也测量了有源倍频器(FS020-100)和功率放大器(ERA-5+)的剩余相位噪声,这些器件对输出信号的相位噪声也有贡献,如图 7 中 c、d 曲线所示,它们在 1 Hz 处的单边带相位噪声谱密度分别为  $-123 \text{ dBc} \cdot \text{Hz}^{-1}$  和  $-127 \text{ dBc} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

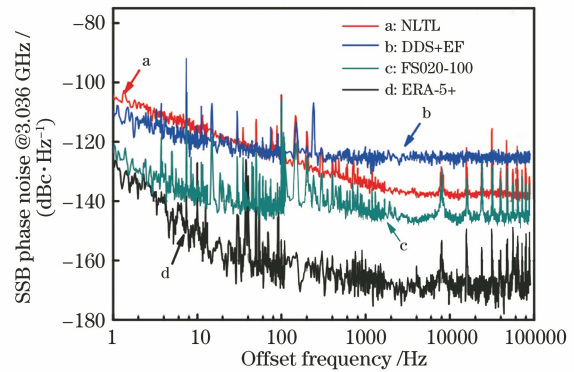


图 7 微波综合器中有源器件的剩余相位噪声

Fig. 7 Residual phase noises of some key components in microwave frequency synthesizer

测量的 PLL-II 的整体剩余相位噪声如图 8 所示,其单边带相位噪声功率谱密度在 1 Hz 处为  $-97 \text{ dBc} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。由图 7、8 可以看出,微波综合器的噪声主要是由 NLTL 和 DDS 引起的。从拟合曲线也可以看出引起频率综合器剩余相位噪声的主要噪声类型,在 2 Hz 以内,相位噪声曲线满足  $f^{-3}$  幂律特征,噪声类型为闪烁频率噪声类型;在 2~200 Hz 范围内,相位噪声的幂律特征为  $f^{-1}$ ,相应的噪声类型为闪烁相位噪声类型;在 200~40000 Hz 频率范围内,幂律特征为  $f^0$ ,相应的噪声类型为白相位噪声;在 40000 Hz 以外的噪声为白频率噪声,幂律特征为  $f^{-2}$ 。与商用 E8257D 信号发生器的相位噪声比较,在小于 1000 Hz 和大于 1000 Hz 的两个傅里叶频率范围内,本文链路的相位噪声比 E8257D 所用链路小 25 dB 和 10 dB 以上。在此基础上,计算了  $^{85}\text{Rb}$  喷泉钟的短期频率稳定度。目

前,<sup>85</sup>Rb 喷泉钟的运行周期  $T_c$  为 2.8 s, 原子飞行时间  $T$  约为 560 ms, 微波作用时间  $\tau_p$  为 40 ms, 获得的 Ramsey 干涉条纹线宽  $\Delta\nu=0.95$  Hz<sup>[13]</sup>。根据 (1)~(3) 式计算得到, 微波系统的稳定度贡献  $\sigma_{y,MW}(\tau)$  为  $2.9 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ , 其中综合器剩余相位噪声的贡献为  $1.2 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ , 量子散弹噪声的稳定度  $\sigma_{y,phy}(\tau)$  极限为  $1.7 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ , 总的短期频率稳定度  $\sigma_y(\tau)$  为  $3.4 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ 。

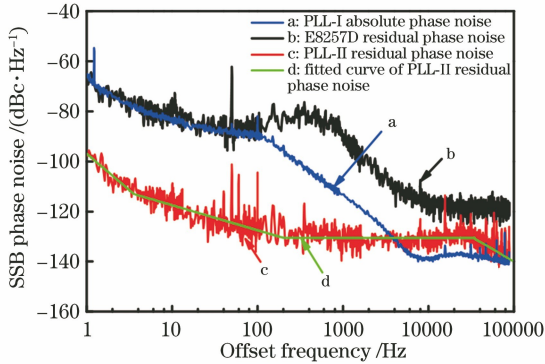


图 8 微波综合器的相位噪声测试图

Fig. 8 Phase noise of microwave synthesizer

目前,<sup>85</sup>Rb 喷泉钟的稳定度并不理想, 主要是因为系统处于初测阶段, 大量参数还需要优化, 开环周期过大, 占空比太小。如果将<sup>85</sup>Rb 喷泉钟的运行参数提高到目前<sup>87</sup>Rb 喷泉钟的水平<sup>[29]</sup>, 它的短期频率稳定度可以达到  $2.6 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ 。采用更好的 LO, 并通过二维磁光阱装载的办法来提高占空比, 可以降低微波系统噪声, 使其接近甚至优于量子散弹噪声的水平, 还可以通过增加探测原子数来降低量子散弹噪声, 最终有望将短期频率稳定度提高到  $1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$  左右, 此时量子散弹噪声占主要部分, 接近<sup>85</sup>Rb 喷泉钟的极限。

## 5 结 论

为国际上首台<sup>85</sup>Rb 喷泉钟研制了低噪声微波综合器, 它可以实现分辨率为  $0.7 \mu\text{Hz}$  的钟频信号输出, 在 3.036 GHz 时的剩余相位噪声指标为  $-97 \text{ dBc} \cdot \text{Hz}^{-1} @ 1 \text{ Hz}$ 、 $-127 \text{ dBc} \cdot \text{Hz}^{-1} @ 100 \text{ Hz}$  和  $-140 \text{ dBc} \cdot \text{Hz}^{-1} @ 100 \text{ kHz}$ , 比目前最好的 BVA 8607 商业晶振的绝对相位噪声低 20 dB 以上, 为高稳定度<sup>85</sup>Rb 喷泉钟的运行打下基础。

在目前工作模式下,<sup>85</sup>Rb 喷泉钟共振频率较低的劣势对短期频率稳定度影响不大, 与<sup>133</sup>Cs 和<sup>87</sup>Rb 的指标相差约 20%。基于目前的运行参数, 所研制的微波综合器的剩余噪声的贡献为  $1.2 \times$

$10^{-14} \tau^{-1/2}$ , 总的短期频率稳定度预期为  $3.4 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ 。优化参数后, 通过使用更低相位噪声的 LO, 并提高喷泉钟鉴相占空比, 增加探测原子数目, 有望将<sup>85</sup>Rb 喷泉钟的稳定度提高到  $1.0 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$  左右, 达到<sup>85</sup>Rb 喷泉钟的量子散弹噪声稳定度极限。

## 参 考 文 献

- [1] Wynands R, Weyers S. Atomic fountain clocks[J]. Metrologia, 2005, 42(3): S64-S79.
- [2] Li R X, Gibble K, Szymaniec K. Improved accuracy of the NPL-CsF<sub>2</sub> primary frequency standard: evaluation of distributed cavity phase and microwave lensing frequency shifts[J]. Metrologia, 2011, 48(5): 283-289.
- [3] Wang Q, Wei R, Wang Y Z. Atomic fountain frequency standard: principle and development[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(16): 163202. 王倩, 魏荣, 王育竹. 原子喷泉频标: 原理与发展[J]. 物理学报, 2018, 67(16): 163202.
- [4] Weyers S, Gerginov V, Kazda M, et al. Advances in the accuracy, stability, and reliability of the PTB primary fountain clocks[J]. Metrologia, 2018, 55(6): 789-805.
- [5] Heavner T P, Donley E A, Levi F, et al. First accuracy evaluation of NIST-F<sub>2</sub> [J]. Metrologia, 2014, 51(3): 174-182.
- [6] Guéna J, Abgrall M, Clairon A, et al. Contributing to TAI with a secondary representation of the SI second[J]. Metrologia, 2014, 51(1): 108-120.
- [7] Yu C H, Zhong W C, Estey B, et al. Atom-interferometry measurement of the fine structure constant[J]. Annalen Der Physik, 2019, 531(5): 1800346.
- [8] Tanabe T, Akamatsu D, Kobayashi T, et al. Improved frequency measurement of the 1S<sub>0</sub>-3P<sub>0</sub> clock transition in <sup>87</sup>Sr using a Cs fountain clock as a transfer oscillator[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 2015, 84(11): 115002.
- [9] Marion H, Pereira dos Santos F, Abgrall M, et al. Search for variations of fundamental constants using atomic fountain clocks[J]. Physical Review Letters, 2003, 90(15): 150801.
- [10] Berengut J C, Flambaum V V, Kava E M. Search for variation of fundamental constants and violations of fundamental symmetries using isotope comparisons[J]. Physical Review A, 2011, 84(4): 042510.
- [11] Gibble K, Verhaar B J. Eliminating cold-collision frequency shifts[J]. Physical Review A, 1995, 52(4): 3370-3373.

- [12] Kokkelmans S, Verhaar B J, Gibble K, et al. Predictions for laser-cooled Rb clocks [J]. *Physical Review A*, 1997, 56(6): R4389-R4392.
- [13] Wang Q, Zhang N, Guang W, et al. Precision measurements of the ground-state hyperfine splitting of  $\text{Rb}_{85}$  using an atomic fountain clock [J]. *Physical Review A*, 2019, 100(2): 022510.
- [14] Fertig C, Gibble K. Measurement and cancellation of the cold collision frequency shift in an  $^{87}\text{Rb}$  Fountain clock [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(8): 1622-1625.
- [15] Weyers S, Lipphardt B, Schnatz H. Reaching the quantum limit in a fountain clock using a microwave oscillator phase locked to an ultrastable laser [J]. *Physical Review A*, 2009, 79(3): 031803.
- [16] Li W B, Du Y B, Li H, et al. Development of low phase noise microwave frequency synthesizers for reducing Dick effect of Cs fountain clocks [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(9): 095311.
- [17] Rovera G D, Santarelli G, Clairon A. Frequency synthesis chain for the atomic fountain primary frequency standard [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1996, 43(3): 354-358.
- [18] Chambon D, Lours M, Chapelet F, et al. Design and metrological features of microwave synthesizers for atomic fountain frequency standard [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2007, 54(4): 729-735.
- [19] Santarelli G, Governatori G, Chambon D, et al. Switching atomic fountain clock microwave interrogation signal and high-resolution phase measurements [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2009, 56(7): 1319-1326.
- [20] Liu N, Lin P, Wang P, et al. The design of microwave synthesizer for cesium atomic fountain clock of NIM [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2010, 31(3): 274-277.
- [21] Yu M Y, Wang Y N, Wan J Y, et al. Low phase noise microwave frequency synthesizer for cold atom clock [J]. *AIP Advances*, 2019, 9(4): 045223.
- [22] Hartnett J G, Nand N R, Parker S R, et al. Radio frequency signals synthesised from independent cryogenic sapphire oscillators [J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(4): 294-295.
- [23] Xie X P, Bouchand R, Nicolodi D, et al. Photonic microwave signals with zeptosecond-level absolute timing noise [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 44-47.
- [24] Didier A, Millo J, Grop S, et al. Ultra-low phase noise all-optical microwave generation setup based on commercial devices [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(12): 3682-3686.
- [25] Li T, Huang J C, Qu Q Z, et al. Space qualified microwave source for cold atom clock operating in orbit [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(11): 113115.
- [26] 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.
- [27] Greenhall C A. A derivation of the long-term degradation of a pulsed atomic frequency standard from a control-loop model [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1998, 45(4): 895-898.
- [28] Riehle F. *Frequency standards: basics and applications* [M]. Weinheim: John Wiley & Sons, 2006: 74.
- [29] Du Y B, Wei R, Dong R C, et al. Recent improvements on the atomic fountain clock at SIOM [J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(7): 070601.