

引用格式: 句博文, 云恩学. 一种应用于 CPT 原子钟的低相噪微波频率合成器[J]. 时间频率学报, 2022, 45 (2): 151-155.

一种应用于 CPT 原子钟的低相噪微波频率合成器

句博文^{1,2}, 云恩学¹

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:在微波原子钟里,微波用于激励原子的钟跃迁以获得鉴频信号,微波的相位噪声是限制微波原子钟短期频率稳定度的主要因素之一。在本工作中,实现了一种用于相干布居囚禁(CPT)原子钟的低噪声、结构简单的微波频率合成器,以满足高性能 CPT 原子钟需要。合成器主要由 100 MHz 恒温晶体振荡器(OCXO)、声表面滤波器、带锁相的介质振荡器(PDRO)和直接数字合成器(DDS)组成。经测量,对于 1 Hz、100 Hz、1 kHz 和 10 kHz 频率偏移处,其输出的 3.417 GHz 信号的绝对相位噪声分别为 -61、-107、-118.6 和 -124 dBc/Hz。在 1 s 平均时间处,预期的交调效应对原子钟短期频率稳定的限制仅为 5.8×10^{-14} 。该设计不仅为小型化高性能 CPT 原子钟提供一种结构简单的微波合成器,还可应用于 POP、冷原子 CPT 等微波原子钟。

关键词:频率合成器;低相位噪声;原子钟;相干布局囚禁

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2022-02-0151-05

A low phase noise microwave frequency synthesizer applied to CPT atomic clock

JU Bo-wen^{1,2}, YUN En-xue¹

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the microwave atomic clock, the microwave is used to excite the clock transition of the atom to obtain the frequency discrimination signal, and the phase noise of the microwave is one of the main factors that limit the short-term frequency stability of the microwave atomic clock. In this work, a low-noise, simple-structure microwave frequency synthesizer for coherent population trap (CPT) atomic clocks was realized to meet the requirements of high-performance CPT atomic clocks. The synthesizer is mainly composed of a 100 MHz oven-controlled crystal oscillator (OCXO), a surface acoustic filter, a phase-locked dielectric oscillator (PDRO) and a direct digital synthesizer (DDS). The absolute phase noises of 3.417 GHz signal are measured to be -61, -107, -118.6 and -124 dBc/Hz for 1 Hz, 100 Hz, 1 kHz and 10 kHz offset frequencies, respectively. The expected intermodulation effect limits the short-term frequency stability of the atomic clock to only 5.8×10^{-14} at 1 s average time. This design not only provides a simple structure

收稿日期: 2021-10-16; 接受日期: 2021-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12173043)

microwave synthesizer for miniaturized high-performance CPT atomic clocks, but can also be applied to microwave atomic clocks such as POP and cold atom CPT.

Key words: frequency synthesizer; low phase noise; atomic clock; CPT (coherent population trapping)

0 引言

基于相干布居囚禁 CPT (Coherent Population Trapping)^[1] 量子干涉原理的被动型气泡型原子钟, 因其激励原子的钟跃迁的微波调制在光场上, 省去了微波腔, 可实现小型化甚至芯片级的原子钟, 可应用于对体积、功耗、重量有严格限制而又需要精密时间的场景, 如无人机、GNSS 便携接收机、水下勘探等^[2-3], 因而成为欧美等发达国家原子钟研究的重要方向。目前芯片级原子钟的频率稳定度在 10^{-10} @1 s 量级^[4], 还有较大提升空间以满足需要更高精度要求的应用, 如深空导航、微纳卫星编队组网、水下潜航器等。为了进一步提升 CPT 原子钟的频率稳定度性能, 目前国际上基于 $\text{lin} \perp \text{lin}$ 、push-pull 等构型的高性能 CPT 原子钟^[5-6], 频率稳定度达到了 10^{-13} @1 s 量级^[7-9], 展现了 CPT 原子钟良好的性能潜力。

在前期的合成器研制中^[10], 基于梳状谱发生器来产生 3.417 GHz 微波信号, 获得了较低相位噪声, 但可以发现其结构仍然较为复杂、功耗偏大。在此基础上, 我们进一步研究了一种低相位噪声微波频率合成器, 该方案减少了电子器件和系统复杂性, 保证了低相噪的同时, 微波功率稳定性得到改进, 可用于 CPT 原子钟。该合成器利用声表面滤波器^[11]的窄带宽特性, 可以实现中心频率为 100.5 MHz 通带小于 1 MHz 的滤波, 同时应用了锁相介质振荡器 (PDRO) 可以实现锁相输出 3.417 GHz, 结构进一步优化。

1 低相噪频率微波合成器

我们频率合成器基本结构是基于 100 MHz 恒温晶体晶振 (OCXO) 和直接频率合成器 (DDS) 混频后生成 100.5 MHz 频率信号, 通过含有锁相环的介质振荡器 (DRO) 倍频后生成输出的 3.417 GHz 频率信号, 这种结构可以通过 DDS 产生小频率, 通过窄带滤波器滤波, 可以简化微波频率合成器的整体结构。

如图 1 所示, 具有超低相位噪声的 OCXO 晶振 (AXTAL, AXIOM5050ULN) 被选择作为微波频率合成器的本地晶振。OCXO 晶振的输出信号通过一个频率分配器 (Sync-tech, STMFP4) 被分为两路信号并且每一路信号的输出信号功率为 +13 dBm。第一路输出信号直接送入 DDS (ADI, AD9912) 作为 DDS 的参考输入信号, DDS 输出 0.5 MHz 信号送入到混频器的 IF 端。第二路输出信号直接连接到混频器的 LO 端, 通过混频器 (Mini-Circuits, ZFM-2-S+) 混频输出 100.5 MHz 信号, 混频器输出信号通过中心频率为 100.5 MHz 的声表面滤波器和功率放大器 (Mini-Circuits, ZFL-1000VH2X+) 送入到用于锁相 DRO 的采样相位检测器, DRO 的 3.417 GHz 信号使用子采样 PLL 直接锁相到 100.5 MHz 信号上, 产生的 3.417 GHz 信号经过滤波和放大, 可用于后续的相位噪声测量和 CPT 原子钟的实验。

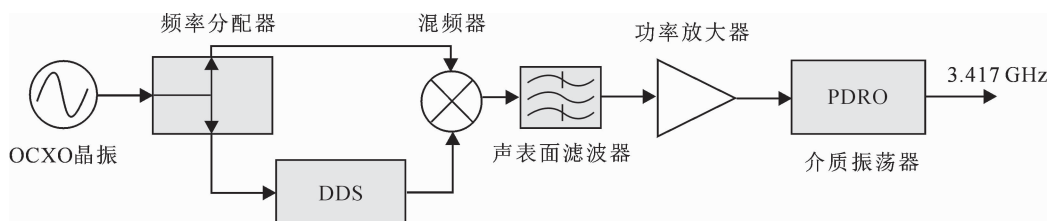


图 1 3.417 GHz 微波频率合成器结构图

2 频率综合器性能

通过频谱分析仪对频率合成器中 100.5 MHz 信号滤波前后的输出频谱进行测量, 结果如图 2 所示, 可以看出除中心频率 100.5 MHz 频率外其他频率都被很好地滤除, 并且插入损耗较小 (≤ 10 dB), 100.5 MHz

信号输出功率为 -9 dBm,没有明显的杂波信号。利用相位噪声分析仪(APPH 20G)测量的该低相位噪声频率综合器的关键信号 100 MHz,100.5 MHz,3.417 GHz(自由运行 DRO 和锁相 DRO)的绝对相位噪声。如图 3 所示,测试相位噪声所用的参考源与链路中的 100 MHz 本振(AXTAL,AXIOM5050ULN)相位噪声水平相当,但是通过互相关测量方法,经过 n 次互相关测量,可测量的相位本底可以降低 \sqrt{n} 。在我们的测量中,都经过了 10 次互相关测量,仪器本底噪声都在被测对象相位噪声之下,因而测量是准确、可靠的。在 1 Hz 至 100 MHz 有效偏移频率下的相位噪声不确定性约为 ± 5 dB。合成器中采用的 100 MHz OCXO (AXIOM5050ULN),其自由运行的相位噪声在 1 Hz,100 Hz,1 kHz,10 kHz 处相位噪声分别为 -78.4 、 -140 、 -166.1 、 -176.8 dBc/Hz,该相位噪声水平是非常出色的。

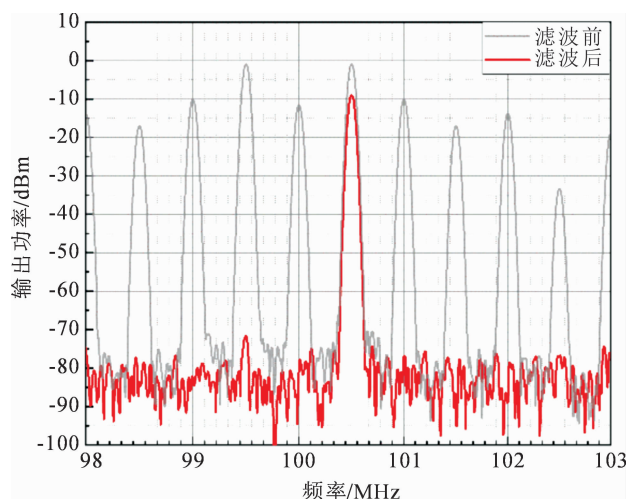
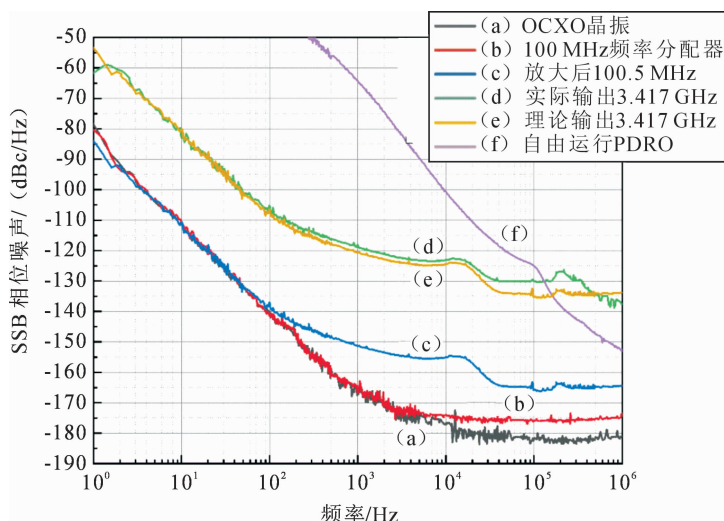


图 2 滤波之前和滤波之后混频器输出 100.5 MHz 信号频谱(RBW=VBW=47 kHz)



注:(a)为参考晶振 OCXO 100 MHz 输出信号,(b)为频率分配器 100 MHz 的输出信号,(c)为 100.5 MHz 功率放大器输出信号,(d)为实际输出的 3.417 GHz 信号,(e)为理论输出的 3.417 GHz 信号,(f)为自由运行 PDRO 的相位噪声

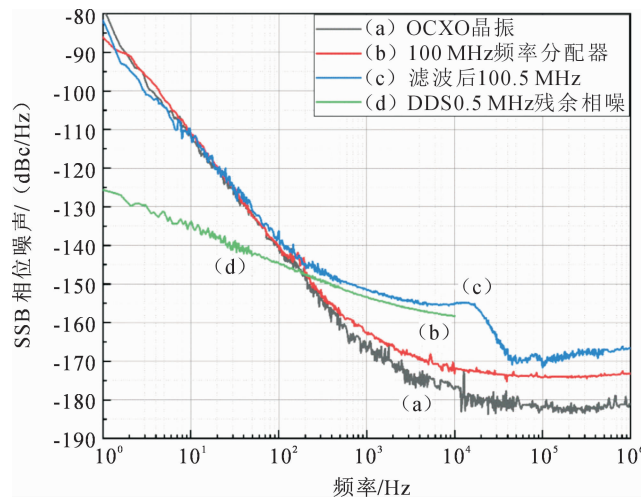
图 3 链路关键信号的绝对相位噪声性能

从图 3 中(d)和(e)曲线可以看出,PDRO 输出的 3.417 GHz 信号在偏移频率小于 30 kHz 时的相位噪声因理想化的 $20\log N$ 而恶化。对于 $f > 30$ kHz,与理想倍增的 3.417 GHz 信号相比,输出 3.417 GHz 信号的相位噪声会有所降低,尤其是在锁定带宽的偏置频率处,相位噪声最大恶化了 8 dB。此外,PLL 的锁定带宽约为 400 kHz。因此无法完全抑制微波综合器在 400 kHz 处的相位噪声。限制该 3.417 GHz 信号的相位噪声的最大原因是混频输出的 100.5 MHz 频率信号。在 ≤ 20 kHz 时,DDS 输出的 0.5 MHz 小频率信

号与频率分配器直接输出的 100 MHz 信号混频输出的 100.5 MHz 相位噪声决定最终输出 3.417 GHz 信号的相噪水平,而 ≥ 20 kHz 时,则由功率放大后的 100.5 MHz 信号影响输出信号。在下一节的测量和分析中,发现是由于 DDS 输出 0.5 MHz 信号的相位噪声恶化了 100.5 MHz 信号的质量进而限制了 3.417 GHz 输出信号的相位噪声。

在自由运行状态下,DRO 在 $f=100$ kHz 时表现出一 125 dBc/Hz 的相位噪声。 $f>10$ MHz 时的相位噪声基底为一 172 dBc/Hz(此处未显示)。在锁定状态下,3.417 GHz 输出信号在 $f=1$ Hz、100 Hz、1 kHz 和 10 kHz 时分别表现出一 61、-107、-118.6 和 -124 dBc/Hz 的相位噪声性能。

在上述工作的基础上,我们测量了频率合成链的关键信号和组件的绝对相位及残余相位噪声性能,如图 4 所示。在整个链路中,由于 3.417 GHz 输出频率是通过 100.5 MHz 频率锁相倍频得到的,所以影响最终输出 3.417 GHz 信号质量的是 100.5 MHz 信号质量,100.5 MHz 信号是由 100 MHz 信号和 0.5 MHz 信号进行混频得到,通过测量 0.5 MHz 残余相噪和 100 MHz 信号的绝对相噪,明显显示出 0.5 MHz 信号残余相噪在 >200 Hz 后限制了其绝对相噪的质量,造成了混频后信号的恶化。由于最终输出 3.417 GHz 的参考信号是 100.5 MHz 信号,所以最终会恶化输出的 3.417 GHz 信号。在图 3 中,锁定 DRO 输出的 3.417 GHz 性能比 100.5 MHz 信号的性能高约 31 dB,这与理想倍频情况吻合。



注:(a)为 OCXO 100 MHz 绝对相噪,(b)为频率分配器 100 MHz 绝对相噪,
(c)为混频滤波后 100.5 MHz 绝对相噪,(d)为 0.5 MHz 残余相噪

图 4 0.5 MHz 残余相噪测量结果图

3 稳定度影响

目前对高性能 CPT 原子钟短期频率稳定性限制的主要贡献之一是微波相位噪声,它通过脉冲工作模式下的 Dick 效应或连续工作模式的交调效应来影响原子钟的频率稳定度^[12-13]。以后者为例,当微波信号用低频 f_m 调制时,偏移频率等于 f_m 偶数倍的相位噪声将频率波动转化为伺服回路的探测信号,根据该交调效应,微波相位噪声对短期频率稳定度的贡献为^[14]

$$\sigma_y^2(\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} C_{2n}^2 S_{\varphi}(2nf_m) \tau^{-1}, \quad (1)$$

式(1)中, f_m 是原子钟微波的调制频率, $S_{\varphi}(2nf_m)$ 是频偏为 f_m 偶次倍的微波相位噪声, C_{2n} 是相应谐波的系数,对于气泡型原子钟,调制频率一般在百赫兹量级,交调效应的贡献以低次谐波为主。因此,我们着重考虑 100 Hz~1 kHz 范围内的相位噪声。最近的研究表明高性能 CPT 原子钟对微波相位噪声表现出更大的敏感性^[15],因而,研制低相噪微波频率综合器显得更加必要。

在本实验中,通过测量所研制的微波频率合成器输出 3.417 GHz 微波信号的相位噪声,如图 3 中曲线(d)所示,并根据公式(1)进行估计,在平均时间为 1 s 处,微波通过交调效应对原子钟频率稳定度的贡献为 5.8×10^{-14} ,要比目前 CPT 原子钟最好的频率稳定度低半个数量级^[16]。

4 结语

本工作展示了一种低相位噪声的 3.417 GHz 微波频率综合器,其结构简单,相位噪声低。对于 1 Hz、100 Hz、1 kHz 和 10 kHz 频率偏移处,其输出的 3.417 GHz 信号的绝对相位噪声分别为 -61、-107、-118.6 和 -124 dBc/Hz。当应用于 CPT 原子钟时,通过交调效应,对 CPT 原子钟的短期频率稳定度影响仅为 5.8×10^{-14} @1 s。因此,本工作中的微波频率合成器可以满足高性能 CPT 原子钟的要求,同时,该频率合成器也可用于 POP、冷原子 CPT、拉曼原子干涉仪或陀螺仪等需要低相噪微波的实验。目前我们的微波频率综合器主要受 DDS 输出 0.5 MHz 信号的相位噪声限制,这是我们下一步改进的方向。

参考文献:

- [1] ALZETTA G, GOZZINI A, MOI L, et al. An experimental method for the observation of r. f. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour[J]. *Il Nuovo Cimento B (1971-1996)*, 1976, 36(1): 5-20.
- [2] HAFELE J C, KEATING R E. Around-the-world atomic clocks: predicted relativistic time gains[J]. *Science*, 1972, 177(4044): 166-168.
- [3] WALLER P, GONZALEZ F, BINDA S, et al. The in-orbit performances of GIOVE clocks[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(3): 738-745.
- [4] 李松松, 张奕, 田原, 等. 芯片原子钟的工作原理及其研究进展[J]. *导航与控制*, 2018, 17(6): 13-18.
- [5] JAU Y Y, MIRON E, POST A B, et al. Push-pull optical pumping of pure superposition states[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(16): 160802. 1-160802. 4.
- [6] HAFIZ M A, BOUDOT R. A coherent population trapping Cs vapor cell atomic clock based on push-pull optical pumping[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(12): 124903.
- [7] HAFIZ M A, COGET G, PETERSEN M, et al. Symmetric autobalanced Ramsey interrogation for high-performance coherent-population-trapping vapor-cell atomic clock[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(24): 244102.
- [8] HAO Q, LI W, HE S, et al. A physics package for rubidium atomic frequency standard with a short-term stability of $2.4 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(12): 123111.
- [9] MICALIZIO S, CALOSSO C E, GODONE A, et al. Metrological characterization of the pulsed Rb clock with optical detection[J]. *Metrologia*, 2012, 49(4): 425-436.
- [10] LI X, YUN P, LI Q, et al. A low phase noise microwave source for high-performance CPT Rb atomic clock[J]. *Electronics Letters*, 2021, 57(17): 659-661.
- [11] 文继国. 射频声表面波滤波器的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [12] AUDOIN C, CANDELIER V, DIMARCQ N. A limit to the frequency stability of passive frequency standards due to an intermodulation effect[C]//Conference on Precision Electromagnetic Measurements, IEEE, 1990: 93.
- [13] BANDI T, AFFODERBACH C, STEFANUCCI C, et al. Compact high-performance continuous-wave double-resonance rubidium standard with $1.4 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ stability[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2014, 61(11): 1769-1778.
- [14] DENG J Q, MILETI G, JENNINGS D A, et al. Improving the short-term stability of laser pumped Rb clocks by reducing the effects of the interrogation oscillator[C]//Proceedings of International Frequency Control Symposium, Orlando; IEEE, 1997: 438-445.
- [15] DANET J, LOURS M, GUÉRANDEL S, et al. Dick effect in a pulsed atomic clock using coherent population trapping[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2014, 61(4): 567-574.
- [16] FRANÇOIS B, CALOSSO C E, HAFIZ M A, et al. Simple-design ultra-low phase noise microwave frequency synthesizers for high-performing Cs and Rb vapor-cell atomic clocks[J]. *The Review of scientific instruments*, 2015, 86(9): 094707.