



原子频标发展的最新动向 —— 第 55 届国际频率控制年会有关情况简介

刘 铁 新

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

介绍了在第 55 届国际频率控制年会上了解到的原子频标发展的最新动向。

2001 年第 55 届国际频率控制年会由 IEEE 的超声、铁电和频率控制协会发起, 在美国的华盛顿州西雅图市召开。会议共进行了 4 天, 第 1 天是时间频率领域的专题讲座。后面三天安排了 3 个专题报告, 宣读了 100 多篇报告, 展示了 50 多篇报告。中国有 6 位代表参加了这次会议, 提交的论文涉及铯喷泉, 光抽运铯钟, 晶体振荡器, 声表面波, 铷钟的谐振腔和小氢钟等研究课题。

频控年会的专题讲座简单而全面地介绍了时间频率领域的基本知识。这次共分为 12 个专题, 其中包括晶体振荡器、蓝宝石微波频率源、时间频率的传递、原子频率标准、低噪声振荡器的设计和性能、频率综合、锁相技术等。宣读和展示的报告涉及超声、铁电和频率控制领域的相关内容, 下面仅就涉及原子频标的情况做一简介。

1 原子喷泉和冷原子钟

原子喷泉和冷原子钟以其具有更高的性能, 成为目前原子频标的研究热点。在这次会议中这一专题一共宣读了 5 篇论文, 分别介绍了美国的耶鲁大学、喷气推进试验室 (JPL)、国家标准技术研究院 (NIST)、法国的 LPTF (Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences) 和 Paris-Nord 大学的工作。

耶鲁大学物理系介绍了他们研制的激光冷却铷原子 (^{87}Rb) 钟的进展。其目前的工作重点放在新的态检测器和微波谐振腔的设计上, 以提高信噪比、减小腔相移。试验表明铷原子 (^{87}Rb) 喷泉钟的冷碰撞频移为铯原子冷碰撞频移的 $1/30$, 这样在铷原子喷泉钟中可以提高原子数而不降低频率准确度。在原子频标中现在常用方波调制的方法获得误差信号, 美国的 JPL 讲述了他们使用的一种相位调制方案。该方案控制两个腔的相位, 它将用在 2005 年放在国际空间站上的激光冷却铯钟上。美国的 NIST 介绍了他们高稳定性激光冷却铷原子钟的设计。他们的设计有两个特点: 一是使用了超低速高密度原子 (LVIS); 二是使用了 JPL 的获得误差信号的新方法。法国的 LPTF 介绍了他们为了在不同时间比较 ^{87}Rb 和 ^{133}Cs 的超精细能级建立的铷原子 (^{87}Rb) 喷泉钟。在试验中他们也发现了铷具有极低的碰撞频移, 并且检测到它的碰撞频移是铯的 $1/70$ 。为了进一步试验并且充分利用超稳定蓝宝石低温振荡器和铷原子的低碰撞频移, 他们正在建立一个 ^{87}Rb 和 ^{133}Cs 可以同时工作的双喷泉。另外他们通过理论分析和仿真讨论了原子反冲对频率的影响。最初的研究结果表明它对频率漂移的影响在 $(1 \sim 2) \times 10^{-15}$ 。

2 原子喷泉和比对

德国的 PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt) 介绍了他们研制的铯喷泉 CsF1 的比对情况。1999 年 PTB 的铯原子喷泉钟 CsF1 开始运转,除了在本地对,他们还同美国的喷泉钟 NIST-F1 进行比对。在当前的装置下 CsF1 的不准确度为 1.4×10^{-15} (1σ), 相对频率不稳定性为 $3.5 \times 10^{-13}(\tau/s)^{-1/2}$ 。美国海军天文台 (USNO) 有用喷泉钟做守时的计划。目前他们第一台铯喷泉钟的短期稳定度为 $2 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ 。他们将进一步优化铯喷泉钟的长期稳定度。美国海军天文台还介绍了他们发展综合 IGS (International GPS Service) 频率尺度的工作。NIST 介绍了他们用 5 台氢钟建立的超稳频率标准,进行事后处理的时间尺度 AT1E 的稳定度在 4h~100d 的范围内好于 1×10^{-15} , 在 10d 达到了最好的稳定度 3×10^{-16} , 频率漂移率为 $3 \times 10^{-15}/\text{yr}$, 比任何单一的脉泽有着更高的稳定性和可靠性, 可以作为第二参考并且在研制 NIST-F1 和 NIST-7 中发挥了重要作用。此外, 他们详细地讲述了他们第一次和 PTB 进行的铯喷泉远程比对。在 2000 年的 8 月和 9 月, NIST-F1 和 PTB-CSF1 进行比对。在远距离比对过程中, 使用了卫星双向法、GPS 载波相位和 GPS 共视这三种方法。在第一个间隔里, 使用卫星双向法测得的频差为 0.4×10^{-15} , 使用 GPS 载波相位测得的频差为 0.2×10^{-15} , 比对过程对不准度的影响是 0.7×10^{-15} ; 使用 GPS 共视频差为 1.6×10^{-15} , 比对不准度为 2×10^{-15} 。同时 NIST 还进一步研究了 GPS 载波相位法, 他们比较了两个分析软件包, 找出产生差异的可能原因, 以降低这些因素的影响。

3 激光频标

激光频标具有较高的参考谱线的频率, 有利于改善频标的稳定度和准确度, 在这次会议上有 6 篇相关文章。

美国的 NIST 介绍了他们建立的两台光频标, 一台是囚禁单离子 $^{199}\text{Hg}^+, ^2S_{1/2} \rightarrow ^2D_{5/2}$ 跃迁, 波长 282nm; 一台是激光冷却 ^{40}Ca 原子, $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ 跃迁, 波长 657nm。目前 Ca 频标的相对不准度为 5×10^{-14} 。德国介绍了他们研制射频囚禁激光冷却铷离子光频标的情况, 他们使用 $^1S_0 \rightarrow ^3P_3$ 跃迁, 波长 236.5nm。目前他们的测量不准度为 3×10^{-13} 。美国华盛顿大学物理系分析了用铷离子做光频标的优势。此外美国的 NIST 还介绍了蓝宝石飞秒激光器噪声特性的试验研究、光通讯中波长的控制和校准; 美国的联合天体物理研究所介绍了他们在两个飞秒激光器相位同步上的工作。

4 频率综合

直接数字频率合成是近年研究的高潮, 这次会议上欧洲几个国家介绍了他们的研究情况。

捷克共和国科学院无线电工程和电子研究所利用 Z 变换和附加的延时电路, 对 DDS-PLL 中相位噪声和杂散进行了分析和仿真, 给从事研究开发的工程师提供了一种快速简单估算出相位噪声和离散的杂散信号幅度的方法。意大利比萨大学信息工程系研究了用二阶或者抛物线内插的近似方法产生正弦波。经过实验表明这种方法比线性内插在电路复杂性大致相同的情况下性能更好。根据 DDS 输出频率分辨率高、相位连续的特点, 可以把它用在温度补偿晶体振荡器中。保加利亚科学院电子研究所利用外部一个温度传感器测温。DDS 的频率控制字经过控制微机的计算, 当中包含了所期望输出的频率和晶体振荡器的实时温度, 使得 DDS 的频率控制字含有温补信息。斯洛伐克共和国的 FEI STU 大学无线电系使用了可以自温测试的双模晶体振荡器 (DMXO), 温度补偿由计算 DDS 的频率控制字实现。

5 氢钟产品

会议期间有各地的时间频率领域的厂商展销他们的产品。参展单位俄罗斯的 Quartzlock 公司和美国的 Datum 公司介绍了他们生产的氢钟。

俄罗斯的 Quartzlock 公司有近 40 年研究时频产品的历史。在他们的资料中主要介绍了 CH1-75 型主动型氢钟、CH1-76 型被动型氢钟和其他时频方面的产品。CH1-75 型主动型氢钟目前的重量 90kg, 体积 68cm×48cm×56cm。它分为有自动调谐的 CH1-75B 和没有自动调谐的 CH1-75 两种。2001 年他们又推出了一种带有自动调整功能的新型号 CH1-75A, 这种氢钟和有自动调谐时的指标差不多, 但是具体的功能没有详细的介绍。他们生产的氢钟在没有自动调谐的情况下, 1s 的频率稳定度 2×10^{-13} , 1h 的频率稳定度 1×10^{-15} ; 在有自动调谐的情况下, 1s 的频率稳定度 2×10^{-13} , 1h 的频率稳定度 3×10^{-15} 。CH1-76 型被动型氢钟的重量 55kg, 体积 28cm×48cm×56cm, 和他们生产的主动型氢钟相比体积和重量都大约减小了一半。目前 1s 和 1h 的频率稳定度分别是 1.5×10^{-12} 、 2×10^{-14} 。此外, 他们还生产其他的时频产品, 在 2001 年的产品目录中介绍了恒温晶体振荡器、晶振频率标准、驱分放大器、频率变换器、频率相位比较器、GPS 时间频率标准、铷钟以及 GPS 伺服铷钟。另外还介绍了由这些仪器组合而成的频率测试和驱分系统。

Datum 公司从 1971 年开始研制时间频率方面的产品。经过这些年的发展, 已经从单一的铯束频标发展到多种时间频率产品, 包括主动型氢钟、铯钟、铷钟、晶振、射频驱分模块和总线级时频产品, 在商业、军事和航天中得到应用。1997 年 Datum 公司收购了 Sigma Tau 公司, 在 Mr. Harry Peters 领导下生产了 20 年的主动型氢钟转到了 Datum 公司。在过去的 20 年时间里, 已经有 40 多台主动型氢钟在世界各地使用。他们生产的 MHM2010 型主动型氢钟的频率稳定度在 1s 时为 2×10^{-13} , 1000s 时达到 3×10^{-15} 。

从这次会议上了解到国际上特别是美国、法国和德国的喷泉钟正和光频标的研究很活跃。喷泉钟正在向实用化发展, 铷喷泉因为冷碰撞频移比铯喷泉小而得到了重视。光频标的研制也取得了很大的进展。

The Most Recent Progress on Atomic Clock —Brief Introduction of 2001 FCS and PDA Exhibition

Liu Tiexin

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

Some most recent progress on atomic clock including cold atom clocks, comparisons, optical standards and direct digital synthesis is given according to the 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition. ^{87}Rb fountain clocks now have been emphasized because its cold collision frequency shift is smaller than that for ^{133}Cs . Optical clocks have been made progress as well. The latest performance of hydrogen maser is introduced at last.