

引用格式: 赵杏文, 韦强, 李东旭, 等. 激光抽运小型铯原子钟研制进展[J]. 时间频率学报, 2022, 45(1): 1-8.

激光抽运小型铯原子钟研制进展

赵杏文, 韦强, 李东旭, 李宇奥, 杨林

(成都天奥电子股份有限公司, 成都 610036)

摘要: 成都天奥电子股份有限公司 TA1000 激光抽运小型铯原子钟于 2015 年推出, 至今陆续完成了多个批次的生产, 成功应用于军用标准时间系统、北斗卫星导航系统、长波导航系统等国防工程, 以及电力、通信和计量等领域。2019 年, 被国际权度局 (BIPM) 推荐用于各国标准时间产生和国际原子时比对。2020 年参与守时工作, 2021 年 7 月开始取得权重, 为国际原子时获得贡献力量。为满足未来发展需要, 持续开展高性能、高可靠、高动态等系列化铯原子钟研发, 取得了一定的进展。

关键词: 铯原子钟; 激光抽运小型铯原子钟; 守时

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2022-01-0001-08

Progress on optically pumped cesium beam frequency standard

ZHAO Xing-wen, WEI Qiang, LI Dong-xu, LI Yu-ao, YANG Lin

(Chengdu Spaceon Electronics Company Limited, Chengdu 610036, China)

Abstract: Chengdu Spaceon Electronics Co., Ltd. posted TA1000 Optically Pumped Cesium Beam Frequency Standard in 2015. Until now, several products have been produced, and used in national defense engineering projects, such as military standard time system, Beidou satellite navigation system, long-wave navigation system, and in the field of power communication and measurement. In 2019, it was recommended by the BIPM for UTC/TAI. In 2020, TA1000 was applied for the UTC system, and gained weight since July 2021 to contribute to UTC. Facing the rapidly growing demand, Chengdu Spaceon Electronics Co., Ltd is continuing carrying out the research of making atomic clocks of high-performance, high reliability and high dynamic cesium, and is making some progress.

Key words: cesium beam clock; optically pumped cesium beam frequency standard; time keeping

0 引言

时间是国家信息领域的基石, 是卫星导航与综合时空体系的基础。美国第 21 号总统令所确定的 16 个关键行业中, 11 个依赖于精准时间^[1]。中国卫星导航系统管理办公室主任、北斗卫星导航系统新闻发言人冉承其表示“2035 年前 (中国) 将建设完善更加泛在、更加融合、更加智能的综合时空体系”^[2]。

原子钟是基于原子量子跃迁实现的标准时间频率信号发生器, 是时空体系的核心和性能指标提升的决定性因素之一。铯原子钟具有优良的频率准确度和中长期稳定度, 理论上没有漂移, 在 1967 年 10 月

第 13 届国际计量会议上, 时间单位“秒”采用铯原子钟提供的频率来定义, 人类进入原子时时代。铯原子钟可以用作一级频率标准以及一级时钟标准, 有着广泛的军民应用价值, 尤其是在军事指挥、通信和侦察等作战系统中发挥着不可替代的重要作用, 是世界各大国竞相开发利用的重要战略资源。

常用的商品化小铯钟有磁选态和光抽运两种类型^[3]。我公司采用光抽运方案, 实现了 TA1000 型激光抽运小型铯原子钟。2019 年, 被国际权度局 (BIPM) 推荐用于各国标准时间产生和国际原子时比对。2020 年参与守时工作, 2021 年 7 月开始取得权重。参与制定中华人民共和国国家标准《铯原子钟技术要求 and 测试方法》^[4]。为满足未来应用需求, 持续开展了高性能、高可靠、高动态等系列化铯原子钟研发, 取得了一定的进展。

1 激光抽运小型铯原子钟技术及生产现状

2015 年, 成功研制出 TA1000 型激光抽运小型铯原子钟。

1.1 原理简介

1.1.1 技术原理

TA1000 型激光抽运小型铯原子钟采用先进的激光技术, 采用频率调谐于铯原子 D2 跃迁谱线 $F = 4 \rightarrow F' = 4$ 的波长为 852.1 nm 的 ≤ 2 MHz 的窄线宽抽运激光对铯原子进行原子态制备。发散角之内的全部原子进入微波腔, 与 9.2 GHz 的微波进行相互作用。原子共振跃迁出微波腔后进入检测区, 与另一束频率调谐于铯原子 D2 跃迁谱线 $F = 4 \rightarrow F' = 5$ 的激光相互作用。该光只激发产生了跃迁的原子, 原子发射荧光, 经荧光收集器收集后由光电探测器输出。这样, 当微波频率在跃迁中心频率 (共振频率) 附近扫描时, 在检测器后就可观察到铯原子的频率响应信号。电子自动控制系统把晶体振荡器的频率控制在频率响应信号上, 这就构成了激光抽运铯原子钟。图 1 是 TA1000 激光抽运小型铯原子钟原理框图。

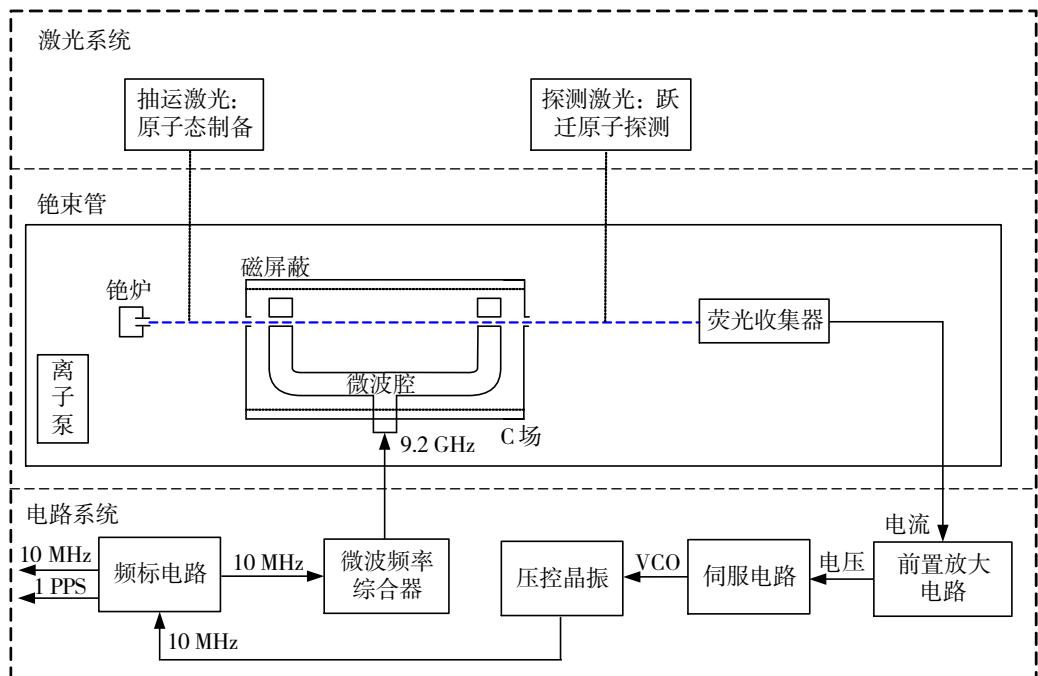


图 1 激光抽运铯原子钟原理框图

1.1.2 关键技术

TA1000 型激光抽运小型铯原子钟有 3 个技术优势: ① 采用全基态原子, 原子利用率高, 从根本上

解决了磁选态铯原子钟存在的寿命和技术指标无法兼顾的矛盾；② 采用双频率的激光进行原子态制备和原子循环跃迁探测，信噪比达到 8 000 以上；③ 利用声光调制技术，实现单一激光器输出两种不同频率激光，节约了成本。

从频率准确度、稳定度和可靠性 3 个核心要素出发，包括 5 项关键技术。图 2 是 TA1000 激光抽运小型铯原子钟关键技术。

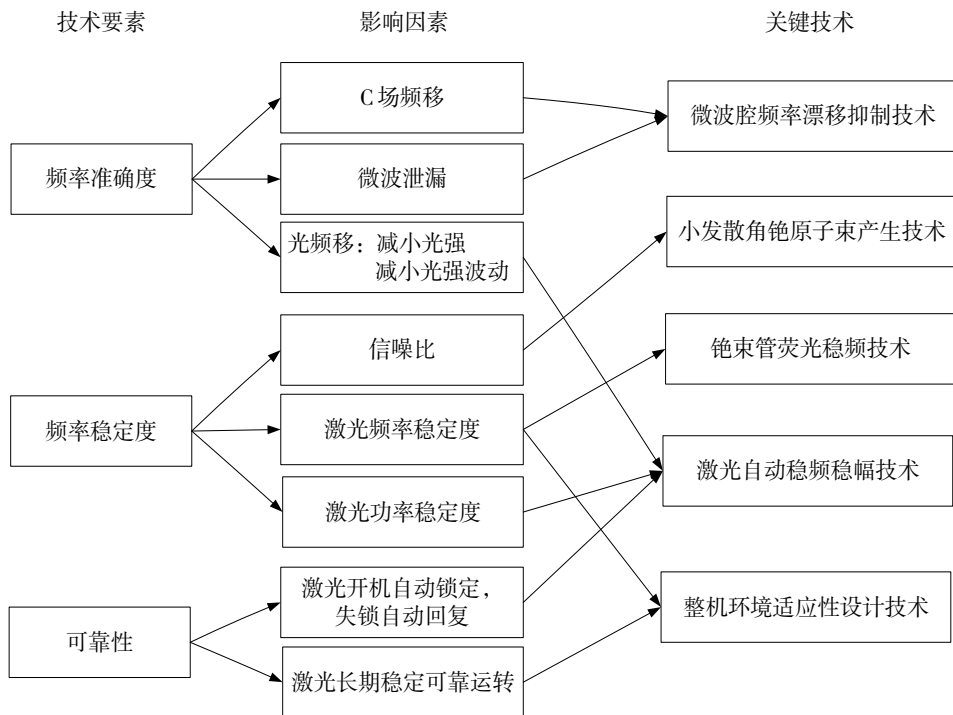


图 2 TA1000 激光抽运小型铯原子钟关键技术

1) 微波腔频率漂移控制技术

微波腔组件是铯钟整机内对频率准确度影响最多的部件。C 场频移、微波泄漏引起的频移均对频率准确度产生较大的影响。C 场本身绕制不均匀、外界磁场的影响都会引起 C 场均匀性。另外，如果微波泄漏到相互作用区之外，也会引起较大的频移。本产品采用主副线圈相结合的形式产生的 C 场；通过增加石墨管，减小微波泄漏。微波泄露可以控制在 100 dB 以下，此项频移量在 10^{-13} 量级以下。

2) 小发散角铯原子束产生技术

铯原子利用率决定了铯束管输出信号的信噪比，进而决定整机输出频率稳定度指标。为提高铯原子利用率，必须利用多孔准直器压窄铯原子束的发散角。发散角与喷射孔的长度成反比，与孔径成正比。我们采用波纹片叠加方式实现准直器，从而兼顾了大深径比（直径 0.08 mm 左右、深度 8 mm 左右，保证发散角小）和孔阵列（ 2 mm^2 左右，200 个通孔，保证原子数量多）。

3) 铯束管荧光稳频技术

激光二极管锁定的稳定性直接决定了激光抽运小型铯原子钟整机的频率稳定度指标。利用铯原子饱和吸收谱进行激光稳频，锁定效果容易受到饱和吸收铯原子泡的温度、泵浦激光和探测激光的入射角度和光强大小、周围的电磁场、饱和吸收泡内部的杂质等因素的影响，导致激光的中长期稳定度不佳。采用铯束管荧光稳频可以有效解决上述问题^[5]。传统 TA1000 采用饱和吸收稳频技术；高可靠铯原子钟采用铯束管荧光稳频技术。

4) 激光自动稳频稳幅技术

激光系统容易失锁是制约国内外激光抽运小型铯原子钟实现的主要障碍之一，而功率稳定度差是制

约长期稳定度指标的关键原因。我们采用双调制稳频技术，基于 ARM+FPGA 平台，利用 CORDIC 算法进行激光自动找谱、自动锁定以及失锁自恢复处理，可实现在 100 mA、40℃ 范围内自动找谱和自动锁定，失锁自恢复时间 < 1 s；利用工作于 Bragg 衍射状态下的声光调制器（AOM）进行激光稳幅处理，激光功率稳定度相对变化可达 $< 0.05\%$ 。

5) 整机环境适应性设计技术

相比磁选态铯原子钟，激光抽运小型铯原子钟应用了对温度、振动等高度敏感的半导体激光器，导致整机的环境适应性和长期运行能力变差。TA1000 型激光抽运小型铯原子钟创新性地采用了多参数智能监测与伺服控制算法、多层温度测控设计和“目标值”自动调控技术，适应 0~3 km 海拔高度和 0℃~40℃ 的工作环境，从实验室应用拓展到复杂工程应用。

1.2 测试情况

1.2.1 静态测试

2017 年至今，TA1000 型激光抽运小型铯原子钟累计生产了多个批次，产品技术指标一致性较好，达到 Microchip 5071A 高性能产品的占比稳步提升至 60% 以上。图 3 是 TA1000 激光抽运小型铯原子钟与 Microchip5071A 高性能产品技术指标对比图。

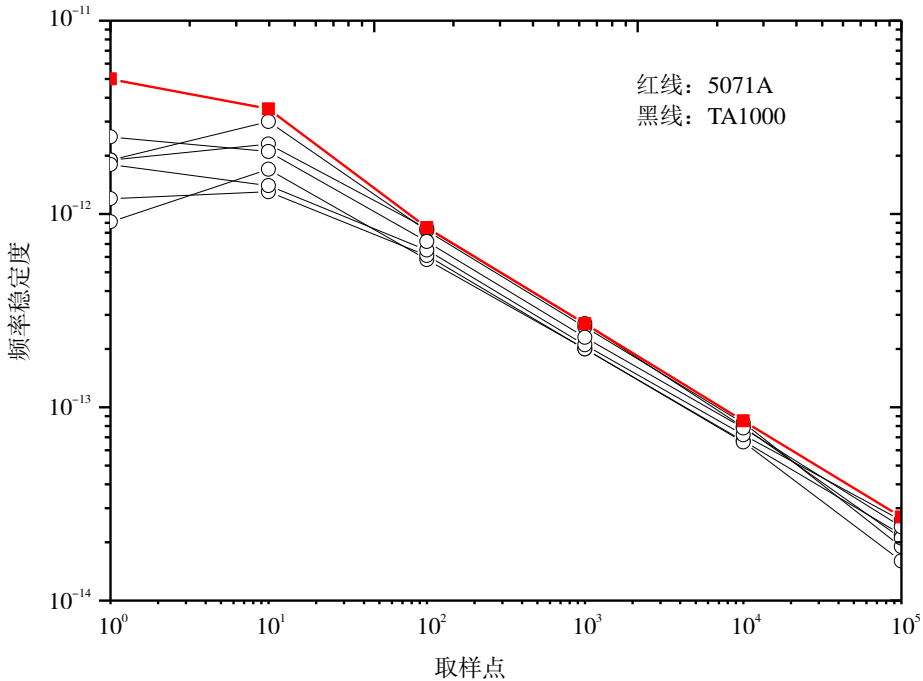


图 3 产品测试结果与 Microchip5071A 高性能产品对比

1.2.2 环境适应性测试

通过开展环境适应性设计，TA1000 激光抽运小型铯原子钟在 0℃~40℃ 的工作环境、0~3 km 海拔高度、0~±1 Gauss 外磁场范围内，能够保证频率准确度。

1) 温度适应性

环境温度过高或过低有可能导致激光系统无法锁定，从而影响整机正常使用。因此对于工程化应用的光抽运小铯钟产品，需考察其温度适应性。TA1000 在 -10℃~+40℃ 范围能够正常工作，0℃~+40℃ 全温范围内频率准确度变化 $< 1 \times 10^{-12}$ 。图 4 是 TA1000 激光抽运小型铯原子钟在 0℃~+40℃ 过程中的频率温度系数。

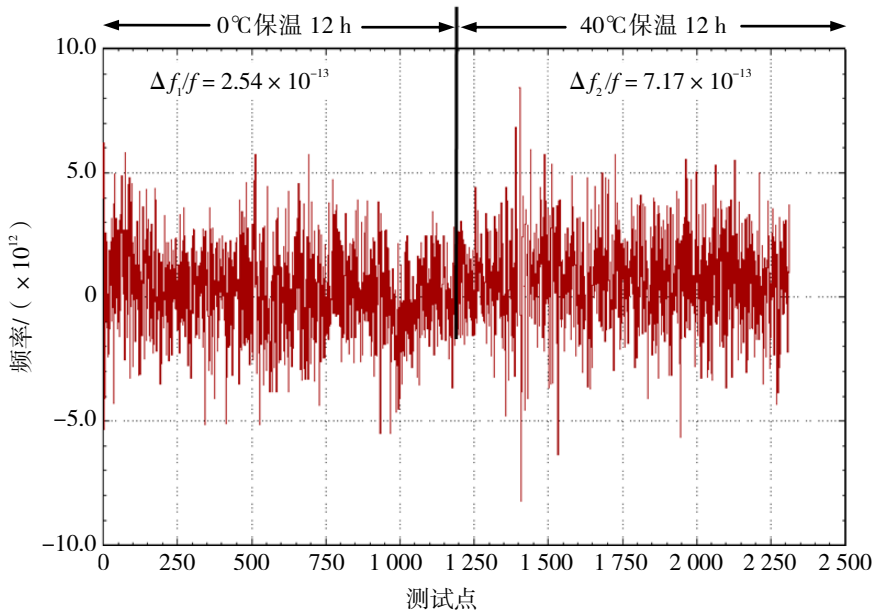


图 4 0°C ~ 40°C 温度试验：频率温度系数

2) 低气压适应性

海拔的变化，会导致产品输出频率准确度发生细微变化。为保证一级频率标准优良的频率准确度指标，产品针对气压对准确度的影响因素，进行了设计。TA1000 经过低气压模拟实验，产品在海拔 500 m (96 kPa) ~ 3 km (对应西藏那曲地区海拔, 76 kPa)，频率准确度变化 $< 1 \times 10^{-12}$ 。图 5 是 TA1000 激光抽运小型铯原子钟低气压试验结果。

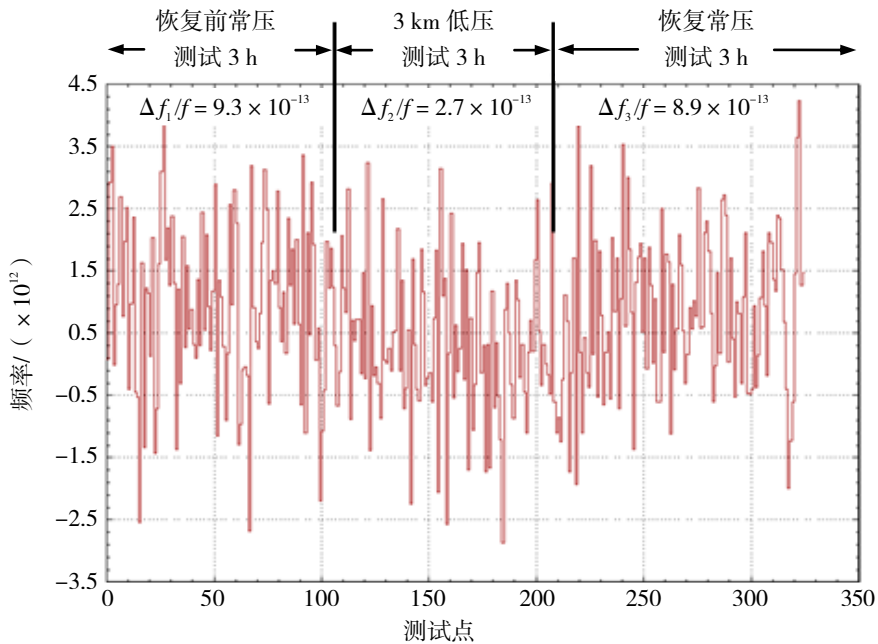


图 5 低气压试验

3) 磁敏感度

外磁场 $0 \sim \pm 1$ Gauss, TA1000 激光抽运小型铯原子钟准确度变化 $< 1 \times 10^{-12}$ 。图 6 是 TA1000 激光抽运小型铯原子钟磁敏感度试验结果。

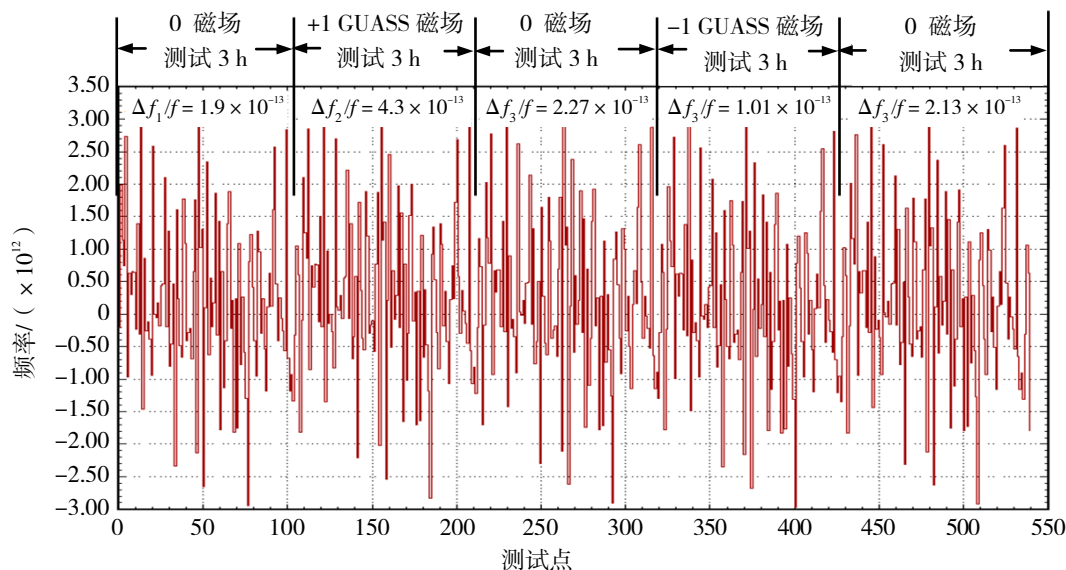


图 6 磁敏感度试验

1.3 批产情况

经过多轮产品试制,固化了工艺,制定了产品研制生产流程图,形成了包括铯原子泡制作、印制板装配、整机装配、整机调试等在内的全套工艺文件,可有效指导从元器件筛选、印制板装配、模块装配、模块接线、整机调试到测试等产品生产的全部过程。在原有铷原子钟生产平台的基础上,进行适应性的改造设计,以满足光抽运铯原子钟电子线路及整机装调需求。根据铯原子钟技术特点,新建了激光光学系统调试和测试、铯束管测试等环境。图 7 是 TA1000 激光抽运小型铯原子钟激光系统、铯束管等 2 个核心部件调试及测试平台。图 8 是 TA1000 激光抽运小型铯原子钟整机测试环境。

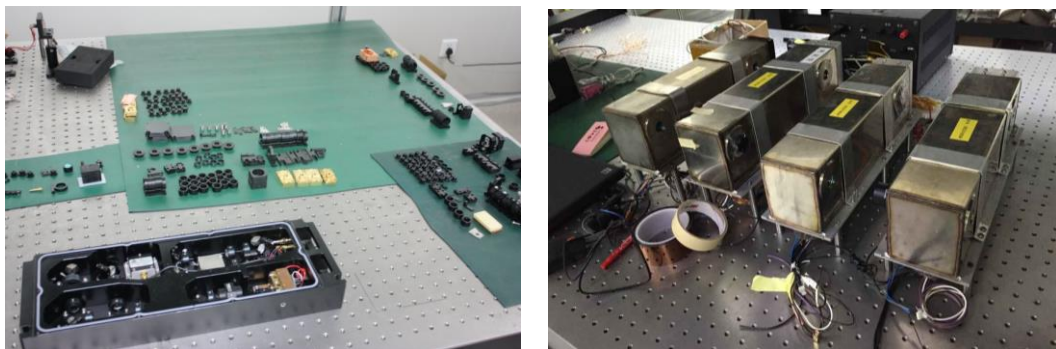


图 7 核心部件调试及测试平台



图 8 整机测试环境

2 系列铯原子钟研制情况

在 TA1000 激光抽运小型铯原子钟研制基础上，公司立足需求，紧跟技术发展步伐，持续开展高性能、高可靠、高动态等系列化铯原子钟研发，取得了一定进展，下面简要介绍。

2.1 高性能铯原子钟

激光抽运型铯原子钟理论上采用全数原子，并采用循环跃迁探测的机制，应具有更高的稳定度指标极限，理论极限为 $3 \times 10^{-12} / \sqrt{\tau}$ （1 s 稳定度指标主要取决于晶振，因此理论极限从 100 s 之后开始算）。TA1000 激光抽运小型铯原子钟远未达到理论值，未充分发挥出光抽运型产品的技术优势，仍需要继续开发。根据铯原子钟稳定度公式（见公式 1），激光抽运小铯钟的短期稳定度指标与信噪比成反比、与线宽成正比。线宽主要取决于铯束管，而信噪比与铯束管、激光系统的工作参数有关。对于我们的系统，激光器的线宽会引起激光频率噪声，从而降低系统的信噪比。

$$\sigma_y(\tau) \propto \frac{1}{R} \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \tau^{-1/2}, \quad (1)$$

式（1）中， R 代表信噪比，和铯束管、工作参数相关。通过窄线宽激光技术可以有效增加信噪比； $\Delta\nu$ 代表鉴频曲线线宽； ν_0 代表跃迁谱线中心频率 9.192 631 770 GHz； τ 代表取样时间。

目前突破了窄线宽激光技术，得到了初步的结果，百秒稳定度达到 2.33×10^{-13} ，万秒达到 2.79×10^{-14} ，十万秒达到 1.91×10^{-14} ，高出 Microchip5071A 高性能产品 3 倍，达到世界上指标最好的 OSA3300 水平。这一实验结果发表在 Optics EXPRESS 上^[6]。预计 2021 年实现原理样机，2022 年实现工程样机并小批量试产。图 9 是高性能铯原子钟初步测试结果。

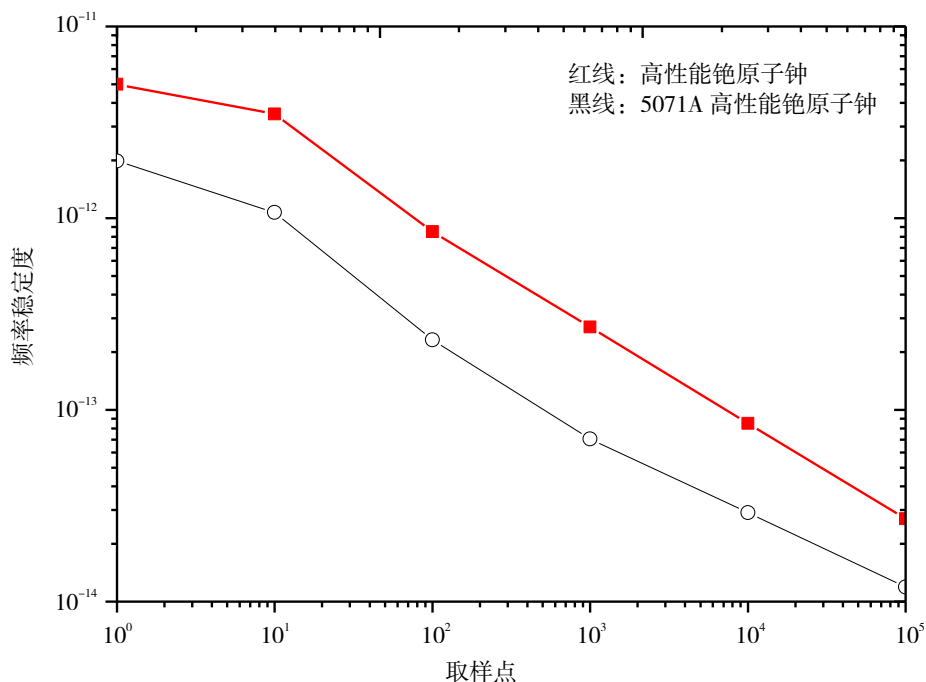


图 9 高性能铯原子钟初步测试结果

2.2 高可靠铯原子钟

随着 5G 通信、智能电网、智慧城市建设的推进，铯原子钟在民用领域的应用日趋明显。应用于数字同步、电网同步、交通运输行业的铯原子钟，相比技术指标，对可靠性要求更高。项目团队推出了

TA1200 高可靠铯原子钟, 在网运行时间 > 10 a, MTBF > 100 000 h。目前已供货中国电信同步网省级钟项目。

2.3 高动态铯原子钟

为满足动态计量、装备应用需求, 团队开展了抗振光抽运铯束管技术、高动态在自动伺服技术、快速预热荧光稳频技术预先研究, 实现了车载激光抽运小型铯原子钟样机, 在三级公路运输条件下, 产品能够稳定锁定。受限于 UPS 电源, 未能测试车载条件下的稳定度指标。后续将继续开展适用于车载、机载铯原子钟研制。图 10 是车载铯原子钟车载测试现场。



图 10 车载铯原子钟测试现场

3 结语

世界各国普遍采用小型铯原子钟来产生和保持时间频率体系的基准时间, 是时间频率体系的核心。随着时间频率体系的不断升级, 对小铯钟技术指标和可靠性要求越来越高。公司实现了 TA1000 型激光抽运小型铯原子钟, 并为了满足未来使用需求, 持续开展高性能、高可靠、高动态等系列化铯原子钟研发, 取得了一定的进展。

参考文献:

- [1] 王康庆, 张绍武. 美国关键基础设施保护立法、政策现状评析及发展趋势[C] // 第 30 次全国计算机安全学术交流会, 重庆: 第 30 次全国计算机安全学术交流会组委会, 2015(9): 41-45.
- [2] 王希, 谭谟晓. 为全面建设社会主义现代化国家开好局、起好步[N]. 人民日报, 2020-8-6(01).
- [3] 曹远洪. 光抽运小铯钟及其在 PNT 应用[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 83-88.
- [4] GB/T 39724-2020. 铯原子钟技术要求及测试方法[S]. 2020.
- [5] 赵杏文, 陈海军, 杨林, 等. 采用铯束管荧光稳频技术的小型光抽运铯原子频率标准[J]. 宇航计测技术, 2020, 4(1): 17-22.
- [6] SHANG H S, ZHANG T Y, MIAO J X, et al. Laser with 10^{-13} short-term instability for compact optically pumped cesium beam atomic clock[J]. Optics EXPRESS, 2020, 28(5): 6868-6880.