用于公路运行的车载超稳激光器

Dongdong Jiao[1,2,5,#], Qing Li [3,#], Jing Gao[1,2], Linbo Zhang[1,2], Mengfan Wu[1,2], Qi Zang[1,2], 王佳宁[4], **Guanjun Xu[1,2,5,**], and Tao Liu[1,2,5,**]**

[1] 中国科学院国家授时中心，中国科学院，西安 710600，中国[2] 中国科学院时间基准及其应用重点实验室，西安 710600，中国[3] 陕西省航天飞行器设计重点实验室，航天学院，西北工业

大学，西安，710072，中国

[4] 西安神泉光电科技有限公司，西安 710075，中国

[5] 合肥国家实验室，合肥 230088，中国

**通讯作者。电子邮箱：xuguanjun@ntsc.ac.cn；taoliu@ntsc.ac.cn

摘要

便携式超稳激光器是进行高精度测量的关键设备。本研究介绍了一种1550纳米车载便携式超稳激光器，专为在高速公路上连续实时运行而设计。为减轻环境影响，我们采取了多项措施，包括采用标准差为毫开尔文/天的主动温度控制，以降低光学参考腔的频率漂移；采用全保偏光纤器件，以增强光路的稳健性；并采用高度集成的电子单元，以减少热效应。我们通过与另一台类似的超稳激光器进行实时拍频测量，评估了该激光器的性能；测量覆盖约100千米的运输距离，途经乡村道路、国道、城市道路和高速公路。结果表明，运输过程中频率稳定度约为10^{-12}/(0.01s-100 s)；车辆静止且发动机运行时约为5×10^{-14}/s；发动机关闭时约为3×10^{-15}/s，且上述情况下均未采用主动振动隔离。本研究首次记录了便携式超稳激光器在高速公路上实现连续实时运行，为移动激光通信和动态自由空间时间频率比对等非实验室应用奠定了重要基础。

关键词：超稳激光器、车载式、频率稳定度、实时、高速公路

1. 引言

超稳激光器在光学钟 [1,2]，低相位噪声微波信号的生成 [3,4]， 暗物质探测 [5], 引力波探测 [6,7]，激光通信 [8]以及自由空间时间频率比对 [9]等领域具有重要应用。目前，实现超稳激光器的主要方法是采用 Pound-Drever-Hall（PDH）频率锁定技术，将激光稳定在光学参考腔的共振频率上 [10,11]。借助这种方法，最先进的超稳激光器已实现低于 10 mHz 的线宽，频率稳定度达到 10^{-17} [12-15]量级。这些超稳激光器主要采用低温硅腔 [12-14] 和长 48 cm 的超低膨胀玻璃（ULE）腔体 [15]实现。

随着空间光钟、引力波探测和重力场测量等科学项目不断推进 [16-19]， ，开发可运输超稳激光器的紧迫性显著增加[20-27]。目前，最先进的可运输超稳激光器可实现亚赫兹线宽，频率稳定度达到 10^{-16} [16,28-31] 量级。此外，其中一些激光器已展现出远距离

运输数千千米并用于太空应用的能力 [16,31-34]。值得注意的是，在这些远距离运输过程中，超稳激光器始终处于断电状态，只有抵达目的地后才会启动使用。随着移动激光通信、动态自由空间时间频率比对和移动激光雷达的快速发展，对能够在高速公路上连续实时运行的车载便携式超稳激光器的需求日益增长[9,35-37]。这对可运输超稳激光器提出了新的要求：它们不仅必须在抵达目的地后即可运行，还必须在运输途中持续实时输出超稳激光。就我们所知，目前尚无关于能够在高速公路上连续实时运行的车载便携式超稳激光器的研究。主要存在两项关键技术挑战：车辆运输过程中复杂的声音、振动和冲击容易导致系统失锁和性能下降；车内剧烈的温度波动会产生残余幅度调制噪声（RAM），并使光功率下降。

本研究考察了一种能够在高速公路上连续实时运行的1550纳米车载便携式超稳激光器。该超稳激光器是在2023 [33]中研发的便携式超稳激光器的改进型。为增强便携式超稳激光器抵抗外界温度变化的能力，我们对光学参考腔实施主动温度控制，使温度稳定度达到约0.6毫开尔文。为减小温度变化、声音和运输振动对激光偏振的影响，我们以保偏光纤光路取代原有的自由空间光路，并采用光纤保偏熔接方法，以尽量减小残余幅度调制。为减少电子单元的散热、体积和重量，我们将原有的六块电路板重新设计为单块电路板，大幅降低了电子单元的资源需求及其影响。我们将两台类似的超稳激光器置于车辆中，通过实时比对测量其性能。这些激光器在高速公路上运输了约100公里。实验结果表明，在运输过程中，无论行经乡村道路、国道、高速公路还是城市道路，超稳激光器的频率稳定度均为10^{-12}/s量级。相比之下，车辆静止（发动机运行）时约为5×10^{-14}/s，车辆静止（发动机关闭）时约为3×10^{-15}/s。整个测试过程中均未使用主动隔振台。这项工作为超稳激光器在非实验室环境（例如移动激光通信和动态自由空间时间频率比对）的连续实时运行奠定了重要的技术基础。

2. 系统设计与优化

如图 1 所示，这款便携式超稳激光器安装在车辆内部，由三个主要部分组成：实体单元、光学单元和电子单元。实体单元包括一个真空腔、被动隔热层，以及一个边长为 50 mm、对振动 [33] 不敏感的立方体光学参考腔。超稳激光器所需的全部电力均由车辆电池提供。

车辆在高速公路上行驶时，影响这款便携式超稳激光器性能的主要因素包括声音、温度波动和振动。声音主要来自车辆的发动机，而车内温度主要受发动机和各种电器的影响。振动可通过两条主要路径传递：一条是轮胎与道路相互作用后经车辆底盘传递，另一条是由发动机经车辆车架传递。振动的传递主要有两种方式：一种是经道路上的轮胎和车辆底盘传递，另一种是由发动机经车辆车架传递。为减轻温度、声音和振动等环境因素对车载超稳激光器性能的影响，本研究采取了多项措施，包括主动精密温度控制、全程保偏光纤光路，以及高度集成的电子单元。

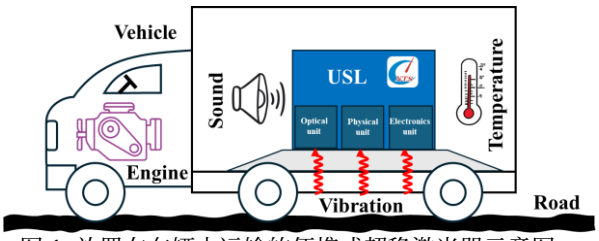


图 1. 放置在车辆中运输的便携式超稳激光器示意图。USL 表示便携式超稳激光器。

2.1 主动精密温度控制

与实验室环境相比，车辆内部的温度变化更大 [38,39]。为进一步减轻这些温度波动对超稳激光器性能的影响，我们对光学参考腔实施主动精密温度控制。值得注意的是，在初始阶段，光学参考腔仅采用被动热屏蔽来抑制温度变化 [33]。

通过初步测量，该光学参考腔的零膨胀系数温度点约为 32.5 °C [33], ，高于室温，适合采用单向加热进行精密温度控制。如图2所示，主动精密温度控制主要通过结合加热膜加热与温度控制器来实现。我们使用螺钉和无胶黏合剂，将聚酰亚胺加热膜紧密贴附在第一层热屏蔽罩上，从而为光学参考腔提供所需的温度点。总共有三个热敏电阻（10k B3950）。第一个位于固定光学参考腔的支撑框架上，用于监测光学参考腔的温度。其余两个热敏电阻位于第一层热屏蔽罩上，其中一个用于温度反馈，另一个用于监测加热膜的加热功能。最终，通过温度控制器将光学参考腔的温度波动控制在毫开尔文范围内。

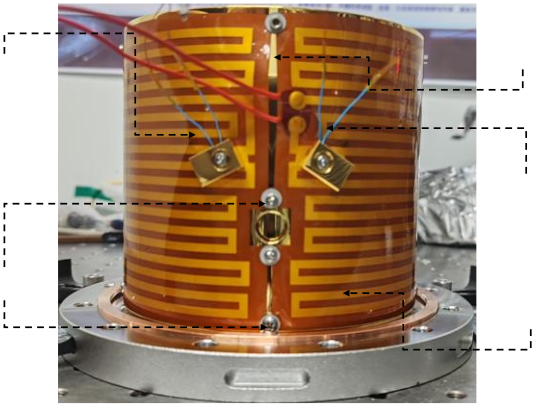


图2. 50 mm 长立方体光学参考腔主动精密温度控制的现场图。

2.2 光学单元优化

在PDH激光频率稳定技术中，电光调制器（EOM）常用于实现频率调制。然而，它也会引入由残余幅度调制产生的低频噪声，导致鉴频信号的信噪比无法达到散粒噪声极限，从而降低超稳激光器的频率稳定度 [40]。激光偏振容易发生变化，进而引发残余幅度调制，导致超稳激光器的性能下降。在车辆内部，激光偏振容易受到温度变化和运输振动的影响 [40,41]。如图3所示，为减轻这些影响，我们用光纤光路替换原有的自由空间光路，并采用保偏光纤熔接方法，以最大限度地减小偏振抖动 [42,43]。通过采用这些措施，残余幅度调制从约 3×10^{-15}/s 降至约 3×10^{-16}/s。

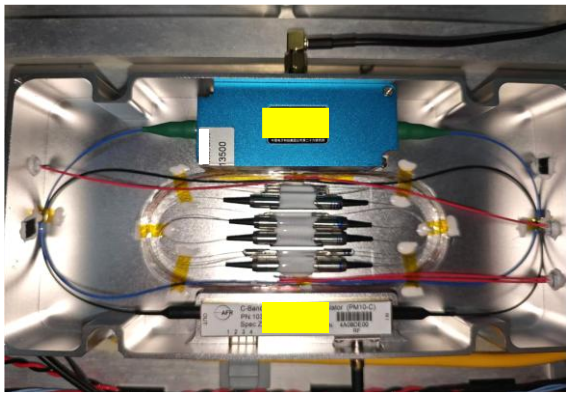


图3. 全光纤光路实物图。

车载便携式超稳激光器的光学单元由主光路、腔前光路和腔后光路组成。主光路主要负责调制和解调，腔前光路用于模式匹配，腔后光路则用于信号监测。为尽可能减轻光路单元的重量并缩小其体积，采用了多种光纤器件，包括声光调制器（AOM）、EOM 和隔离器。

2.3 电子单元优化

超稳激光器电子单元的主要功能是为光学器件提供信号和电力，同时为真空系统提供高压电源。该单元主要由六个功能模块组成：调制解调器模块、PZT慢速控制模块、AOM快速控制主模块、电源模块、离子泵高压电源模块及其他模块。自动锁频功能是可运输超稳激光器 [44-46], 的核心特性，其硬件实现主要依赖前五个模块。在运输过程中，超稳激光器容易因振动冲击和激光频率漂移而失锁。针对这两种失锁情况，我们提出了一种自动锁定算法，分别处理由振动冲击和频率漂移引起的失锁。主控模块能够快速判断失锁原因：当系统受到振动冲击时，采用粒子群优化算法获取扫描PZT的最佳步长值，从而重新捕获锁定点；当系统因长期频率漂移而接近失锁时，则采用预校正方法提前补偿PZT电压，在系统完全失锁前恢复锁定质量。实验结果表明，自动重新锁定时间不到1秒 [46]。

在运输过程中，振动和温度变化会影响电子单元的可靠性以及超稳激光器的性能。如图4所示，为实现这一目标，我们将六个模块集成到一块电路板上，这带来四项主要优势：显著减小体积和重量；缩短信号传输路径，提升系统性能和抗干扰能力；减少潜在故障点，提高整体可靠性；简化热设计，避免局部过热问题。通过这种集成设计，电子单元的体积从原来的355 mm × 150 mm × 270 mm减小至235 mm × 110 mm × 17 mm，缩小约30倍。

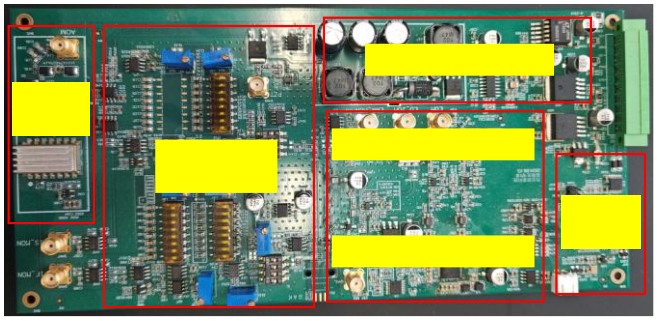


图 4. 电子单元的印制电路板实物图。

3. 实验测试设计方案

超稳激光器的实验测试方案如图 5 所示。两台结构相同的超稳激光器安装在车辆内部，并通过拍频比较测试其性能。主要测试设备包括示波器和频率计。前者用于监测超稳激光器的锁定状态，后者用于存储超稳激光器的拍频信号数据。每台超稳激光器的整体尺寸为 8U 标准机箱，重量约为 35 kg。在一台超稳激光器内部放置一个加速度传感器，并将其固定在实体单元的上部；另一个加速度传感器固定在车辆内部的地板上，用于监测车内的振动状况。需要指出的是，两台超稳激光器之间进行实时、不间断的拍频比较。

整个运输测试路线全长约 100 公里，涵盖四种道路类型：乡村道路、国道、城市道路和高速公路。路线起点为中国科学院国家授时中心（NTSC），途经上述四种道路后返回起点，并在高速公路收费站和停车服务区停留。本次运输测试持续约 100 分钟。需要指出的是，在城市道路上行驶时，遇到行人和交通信号灯会出现两种运行状态：制动和起步。车辆在各类道路上的行驶速度严格遵守机动车国家限速规定。在服务区内，车辆停靠，但发动机仍正常运转。

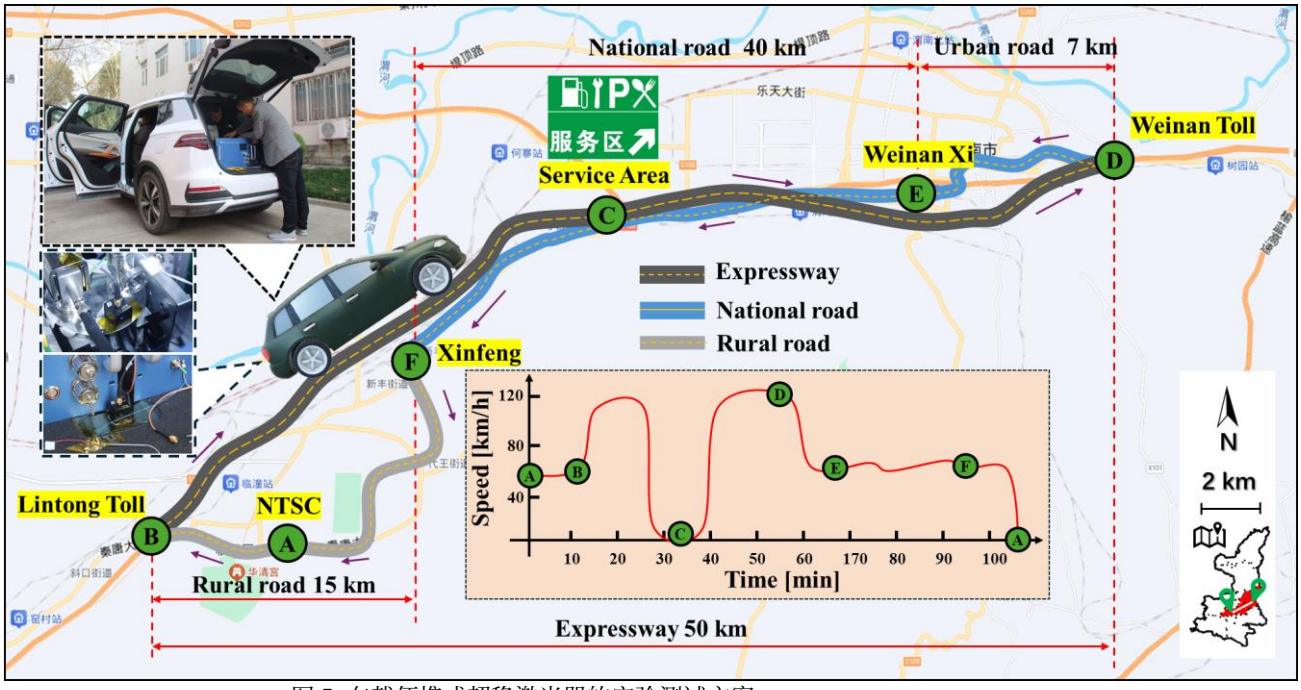


图 5. 车载便携式超稳激光器的实验测试方案。

4.结果与讨论

图 6 展示了车辆行经不同类型道路时，车载超稳激光器的频率变化。总体而言，在乡村道路、国道、城市道路和高速公路上，超稳激光器的频率峰峰值变化约为 60 kHz。车辆静止时（仅发动机运转），超稳激光器的频率峰峰值变化降至约 2 kHz，比车辆行驶时低约 30 倍。

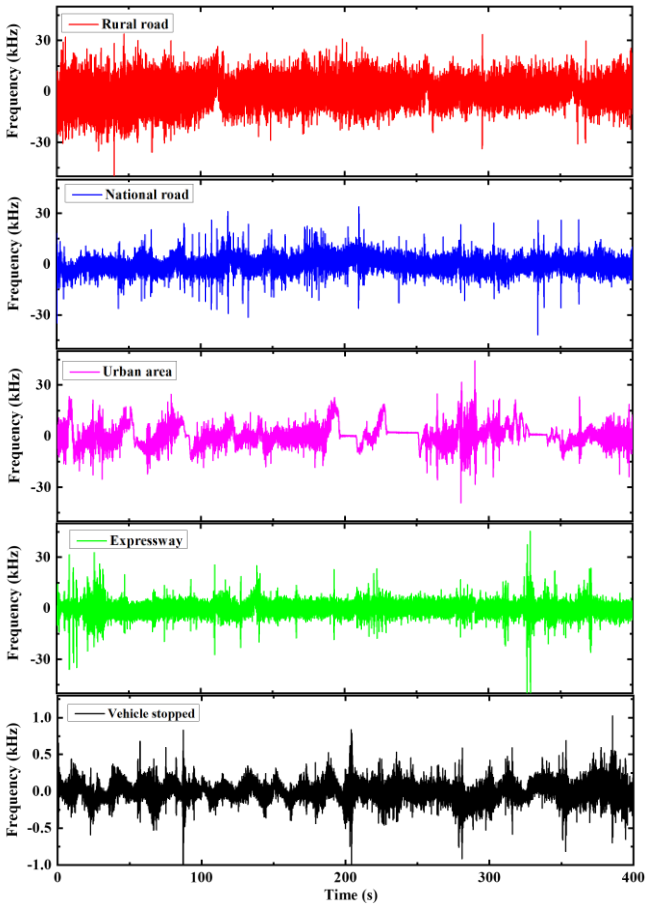


图6. 不同运行条件下车载便携式超稳激光器的频率变化。

如图 6 所示，超稳激光器在乡村道路上的平均频率变化约为 50 kHz；在城市道路上约为 25 kHz；在国道上约为 20 kHz；在高速公路上约为 15 kHz。车辆静止时（仅发动机运行），超稳激光器的平均频率变化约为 1 kHz。这些现象的主要原因可能是不同类型道路上的相对振动有所不同：高速公路上的振动最小，而乡村道路上的振动加速度较大。

值得注意的是，如图 6(c) 所示，车载超稳激光器在城市道路上的表现与在其他类型道路上的表现略有不同。具体而言，在交通信号灯前停车以及为避让行人停车时，车辆需要制动并重新启动，导致超稳激光器的频率变化出现突变，从高值降至接近零，或从接近零升至高值。

光学参考腔主动精密温度控制的实验结果如图7所示。黑色点划线表示控制回路内的温度结果，蓝色实线表示在回路外监测的测试结果。两个热敏电阻的位置如图2所示。

热敏电阻 A 用于闭环温度控制，而热敏电阻 B 用于监测环路外的温度。控制目标温度设为 32.5°C，控制环路内的温差约为 1 毫开尔文，即峰峰值。开环实验的平均温度约为 32.29°C，温差约为 2 毫开尔文，同样为峰峰值。环路内温度的标准差约为 0.2 毫开尔文，而环路外约为 0.6 毫开尔文。

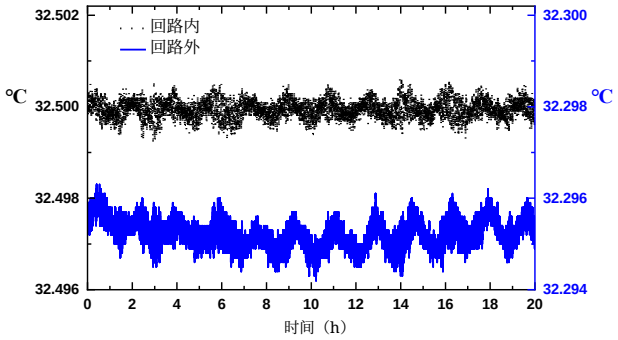


图 7. 光学参考腔主动精密温度控制的实验结果。

鉴于城市环境下道路状况复杂，我们选取这一场景作为典型案例进行分析。图8展示了超稳激光器在城市道路上随车辆运行时的频率变化测试结果，以及超稳激光器的振动加速度变化。蓝色实线表示振动加速度变化，红色实线表示超稳激光器的频率变化。总体而言，频率变化的峰峰值约为 40 kHz，振动加速度变化的峰峰值约为 0.5g。这些测试结果与参考文献[47] 和[48]报道的结果一致。值得注意的是，在 340 秒至 410 秒之间，发生了两次制动和起步事件。具体而言，制动事件发生在约 378 秒至 383

秒，起步事件发生在约 399 秒至 402 秒。如图8所示，在制动和起步过程中，超稳激光器频率变化的响应时间均快于振动加速度的响应时间，前者约为 1 秒，后者约为 4 秒。此外，频率变化的响应呈现出更显著的线性特性。这些发现表明，超稳激光器能够测量振动加速度并快速响应，具有优异的线性特性。

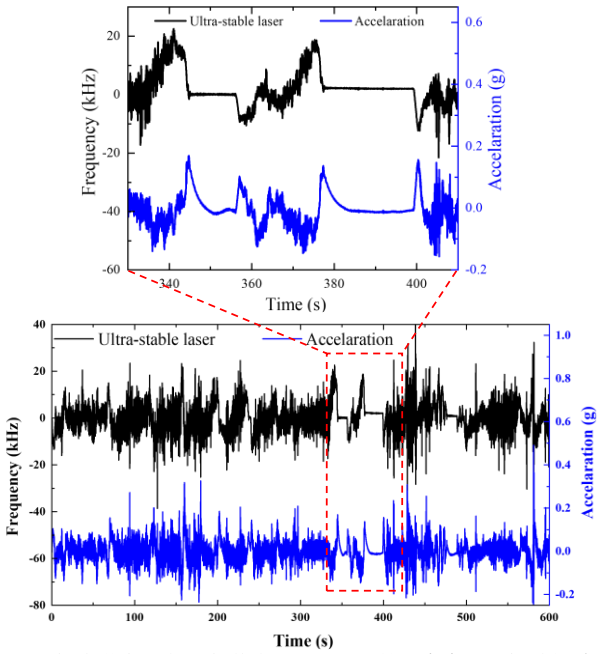


图8. 超稳激光器在城市道路不同工况下的频率变化和振动加速度。

图 9 展示了车载便携式超稳激光器在不同类型道路上的频率稳定度。总体而言，在 0.01 至 100 秒的时间范围内，超稳激光器在乡村道路、国道、高速公路和城市道路上的频率稳定度通常处于 10^{-12} 量级；但乡村道路上在 0.01 至 0.2 秒的时间范围内，稳定度处于 10^{-11} 量级。这一差异主要归因于车辆在乡村道路上经历的内部振动相对较强。在 0.3 至 20 秒的时间范围内，车载便携式超稳激光器在乡村道路和国道上的频率稳定度基本相当，因为这两类道路的道路状况大致相似。在同一时间范围内，超稳激光器在高速公路上的频率稳定度优于国道和城市道路，而城市道路上的稳定度最差。这很可能是由于城市道路上的交通信号灯更多，导致制动和加速情况更加频繁。

车辆静止时（发动机运行），车内超稳激光器在 0.3 至 100 秒的时间范围内，其频率稳定度约处于 10^{-14} 量级，比车辆停下且发动机关闭时超稳激光器的频率稳定度差约一个数量级。然而，在乡村道路、国道、高速公路和城市道路上，其频率稳定度约比自由运行激光源 [49]好两到三个数量级。

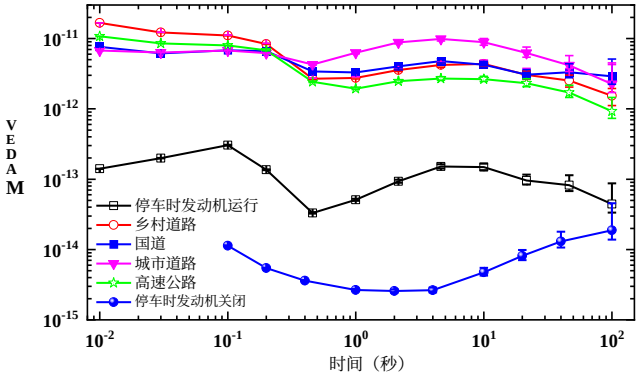


图9. 车辆便携式超稳激光器在不同运行条件下的频率稳定度。

测试结果表明，这款车辆便携式超稳激光器对环境条件具有很强的适应性，在各种路段均能保持稳定的锁定状态。运输过程中，其频率稳定度比自由运行的激光光源高约两到三个数量级，但仍比静止时的稳定度低约三个数量级，这主要是由振动造成的。如果能够有效减轻振动，我们有理由相信，这款车辆便携式超稳激光器的稳定度还可以进一步提高。实现这一目标主要有两种方法：第一，提高光学参考腔的振动灵敏度，不过在宽范围振动条件下这会带来挑战；第二，有效抑制车辆振动，这是一项要求极高的技术工作。与实验室条件相比，振动频率更加复杂，加速度幅值也更大，因此需要更优越的隔振设计 [50,51]。我们后续的工作将聚焦于这款超稳激光器的隔振设计。

5. 结论

本研究成功开发出一种1550纳米车载便携式超稳激光器，旨在实现连续实时的高速公路运行，有效解决可运输激光器在运输过程中无法运行的局限性。该激光器实施了三项核心优化：主动精密温度

控制可将光学参考腔稳定在约 0.6 毫开尔文；光纤路径可减轻由

振动和温度波动引起的偏振抖动；集成电子单元则能在最大限度降低热影响的同时减小体积和重量。大量100公里多路况测试验证了该系统的稳健性能：运输相关频率稳定度（约为10^{-12}/(0.01s-100 s)）比自由运行激光器高出2至3个数量级；车辆静止且发动机运行时，稳定度测量值约为5×10^{-14}/s，发动机关闭时约为3×10^{-15}/s，无需主动振动隔离即可达到接近实验室的标准。这项创新技术为移动激光通信和动态自由空间时间频率比对等实用的非实验室应用铺平了道路，从而推动了可运输超稳激光器领域的发展。

致谢

本项目获得国家自然科学基金（项目编号：12303076和12403078）、陕西省重点研发计划（项目编号：2024GX-ZDCYL-01-28和2025CY-YBXM- 0060）、三秦人才特殊支持计划（项目编号：09R0557A00）、陕西省优秀青年科学家基金项目（项目编号：2025JC-JCQN-082）、陕西省秦创原“科学家 + 工程师”团队建设项目（项目编号：2025QCY-KXJ-162）、湖北珞珈实验室开放基金（项目编号：230100030）以及科技创新2030—“量子通信与量子计算机”重大项目（项目编号：2021ZD0300900）的资助。

[#] Dongdong Jiao和Qing Li对本研究贡献相同。

参考文献

[1] Alexander Aeppli、Kyungtae Kim、William Warfield、Marianna S. Safronova 和 Jun Ye。具有 8×10^{-19} 系统不确定度的钟。Physical Review Letters，133：023401，2024年。[2] Ross Hutson、William Milner、Lingfeng Yan、Jun Ye 和 Christian Sanner。在光学原子钟中观测到毫赫兹级协同兰姆位移。Science，383：384-387，2024年。[3] T. M. Fortier、M. S. Kirchner、F. Quinlan、J. Taylor、J. C. Bergquist、T. Rosenband、N. Lemke、A. Ludlow、Y. Jiang、C. W. Oates 和 S. A. Diddams。通过光学频率分频产生超稳微波。Nature Photonics，5：425-429，2011年。[4] Y. Y. Jiang、A. D. Ludlow、N. D. Lemke、R. W. Fox、J. A. Sherman、L.-S. Ma 和 C. W. Oates。利用 10^{-16} 级激光稳定化提升光学原子钟的稳定性。Nature Photonics，5(3)：158-161，2011年。[5] Melina Filzinger、Ashlee R. Caddell、Dhruv Jani、Martin Steinel、Leonardo Giani、Nils Huntemann 和 Benjamin M. Roberts。利用时空分离原子钟和腔体搜寻超轻暗物质。Physical Review Letters，134：031001，2025年。

[6] Benno Willke. 面向先进引力波探测器的稳频激光器。《激光与光子学评论》, 4(6): 780-794, 2010年。[7] Jun Luo, Li-Sheng Chen, Hui-Zong Duan, Yun-Gui Gong, Shoucun Hu, Jianghui Ji, Qi Liu, Jianwei Mei, Vadim Milyukov, Mikhail Sazhin, Cheng-Gang Shao, Viktor T Toth, Hai-Bo Tu, Yamin Wang, Yan Wang, Hsien-Chi Yeh, Ming-Sheng Zhan, Yonghe Zhang, Vladimir Zharov, and Ze-Bing Zhou. 天琴：空间引力波探测器。《经典与量子引力》, 33: 035010, 2016年。[8] Devin Powell. 激光助力空间通信。《自然》, 499: 266-267, 2013年。[9] Qi Shen, Jian-Yu Guan, Ji-Gang Ren, Ting Zeng, Lei Hou, Min Li, Yuan Cao, Jin-Jian Han, Meng-Zhe Lian, Yan-Wei Chen, Xin-Xin Peng, Shao-Mao Wang, Dan-Yang Zhu, Xi-Ping Shi, Zheng-Guo Wang, Ye Li, Wei-Yue Liu, Ge-Sheng Pan, Yong Wang, Zhao-Hui Li, Jin-Cai Wu, Yan-Yan Zhang, Fa-Xi Chen, Chao-Yang Lu, Sheng-Kai Liao, Juan Yin, Jian-Jun Jia, Cheng-Zhi Peng, Hai-Feng Jiang, Qiang Zhang & Jian-Wei Pan. 在113 km距离上进行时间与频率的自由空间传递，10^{-19} 不稳定度为。Nature, 610: 661-666, 2022年。[10] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward. 利用光学谐振腔实现激光相位和频率稳定。《应用物理B》, 22: 97-105, 1983年。[11] Eric D. Black. Pound-Drever-Hall激光频率稳定简介。《美国物理学杂志》, 69: 79-87, 2001年。[12] T. Kessler, C. Hagemann, C. Grebing, T. Legero, U. Sterr, F. Riehle, M. J. Martin, L. Chen, and J. Ye. 基于硅单晶光学腔的亚40 mHz线宽激光器。Nature Photonics, 6: 687, 2012年。[13] D. G. Matei, T. Legero, S. Häfner, C. Grebing, R. Weyrich, W. Zhang, L. Sonderhouse, J. M. Robinson, J. Ye, F. Riehle, and U. Sterr. 1.5 μm线宽低于10 mHz的激光器。Physical Review Letters, 118: 263202, 2017年。[14] Zhi-Ang Chen, Hao-Ran Zeng, Wen-Wei Wang, Han Zhang, Run-Qi Lei, Jian-Zhang Li, Cai-Yin Pang, She-Song Huang, and Xibo Zhang. 基于10厘米长硅腔的激光器，在低于5 K的温度下不稳定度达到4×10^{-17}。《科学通报》, 2025年。[15] Sebastian Häfner, Stephan Falke, Christian Grebing, Stefan Vogt, Thomas Legero, Mikko Merimaa, Christian Lisdat, and Uwe Sterr. 8×10^{-17} 采用长室温腔的激光频率分数不稳定度。《光学快报》, 40: 2112-2115, 2015年。[16] Xian-Qing Zhu, Xiaomin Zhai, Yong Xie, Yuan Miao, Hai-Wei Yu, De-Quan Kong, Wen-Lan Song, Yiwen Zhang, Hu Yi, Xing-Yang Cui, Xiao Jiang, Baoyu Yang, Jianjun Jia, Juan Yin, Shengkai Liao, Rong Shu, Cheng-Zhi Peng, Ping Xu, Han- Ning Dai, Yu-Ao Chen, and Jian-Wei Pan. 面向空间应用的可运输式硅单晶超稳腔。《光学》, 12: 1342, 2025年。[17] Garrett D. Cole, Silvio Koller, Christian Greve, Geoffrey P. Barwood, Christoph Deutsch, Paul Gaynor, Mher Ghulinyan, Patrick Gill, Richard Hendricks, Ian Hill, Stefan Kundermann, Roland Le Goff, Steve Lecomte, Christophe Meier, Giancarlo Pepponi, Stéphane Schilt, Christian Stenzel, Robert Sütterlin , Kai Voss, and Anton Zhukov. 朝着基于抗振立方体的可部署于太空的激光稳定系统迈进

采用晶体涂层的腔体。《光学快报》, 32(4): 5380- 5396, 2023年。[18] B. Argence, E. Prevost, T. Lévèque, R. Le Goff, S. Bize, P. Lemonde, and G. Santarelli. 面向空间应用的超稳光学腔原型。《光学快报》, 20: 25409-25420, 2012年。[19] Chengwen Xing, Yue Li, Tianyao Xu, Zhichao Li, Fanchao Meng, and Xiongfei Yin. 用于空间引力波探测的法布里-珀罗腔稳激光器频率噪声仿真与实验研究。《IEEE 光子学期刊》, 17(1): 3100107, 2025年。[20] J. Cao, S. Wang, J. Yuan, D. Liu, H. Shu, and X. Huang. 在多通道腔上实现多波长稳频，用于可搬运光学钟。《光学快报》, 28(8):11852-11860, 2020年。[21] David R. Leibrandt, James C. Bergquist, and Till Rosenband. 加速度灵敏度低于10^{-12} g^{-1}的腔稳激光器。《物理评论 A》,《光学快报》, 87:023829, 2013年。[22] Qun-Feng Chen, Alexander Nevsky, Marco Vehicledace, Stephan Schiller, Thomas Legero, Sebastian Häfner, Andre Uhde, and Uwe Sterr. 一种紧凑、坚固且可运输的超稳激光器，分数频率不稳定度为1×10^{-15}。《科学仪器评论》, 85:113107, 2014年。[23] Zhao-Yang Tai, Lu-Lu Yan, Yan-Yan Zhang, Xiao-Fei Zhang, Wen-Ge Guo, Shou-Gang Zhang, and Hai-Feng Jiang. 可运输的1555 nm超稳激光器，线宽低于0.185 Hz。《中国物理快报》, 34: 090602, 2017年。[24] Xinyun Huang, Xianqing Zhu, Xiaolu Zou, Bowei Wang, Yi Hu, Xingyang Cui, Ping Xu, Hanning Dai, Yuao Chen, and Xiao Jiang. 基于模式收敛算法的高精细度法布里-珀罗腔自动耦合。《光学快报》, 33: 20419-20432, 2025年。[25] Yanmei Hao, Ruming Hu, Baolin Zhang, Mengyan Zeng, Huaqing Zhang, Zixiao Ma, Yao Huang, Qunfeng Chen, Kelin Gao, and Hua Guan. 利用可运输超稳腔提高40Ca^{+} 光学钟的稳定性。《光学快报》, 32:4081-4092, 2024年。[26] Benjamin Kraus, Sofia Herbers, Constantin Nauk, Uwe Sterr, Christian Lisdat, and Piet O. Schmidt. 利用光热噪声与光致双折射噪声之间的抵消，实现超稳可运输紫外钟激光器。《光学快报》, 50: 658-661, 2025年。[27] Dongdong Jiao, Mengfan Wu, Jing Gao, Han Zhang, Junlong Liu, Guanjun Xu, Qi Zang, Jie Cui, Ruifang Dong, Tao Liu, Bo Qu, and Shougang Zhang. 全自控高精细度光学参考腔的研制。《中国物理快报》, 42: 013701, 2025年。[28] Rui Xiao, Yanqi Xu, Yan Wang, Huanyao Sun, and Qunfeng Chen. 基于30 厘米光学腔的可运输超稳激光器，拍频不稳定度为 2×10^{-16}。《应用物理B》, 128: 220, 2022年。[29] Xiaotong Chen, Yanyi Jiang, Bo Li, Hongfu Yu, Haifeng Jiang, Tao Wang, Yuan Yao, and Longsheng Ma. 利用立方体间隔件上的10厘米长腔体实现6×10^{-16} 的激光频率不稳定度。《中国光学快报》, 18: 030201, 2020 年。[30] Sebastian Häfner, Sofia Herbers, Stefan Vogt, Christian Lisdat, and Uwe Sterr. 可运输探测激光系统不稳定度为 mod $\sigma_y=3\times10^{-16}$。《光学快报》，28:16407-16416，2020年。[31] Sofia Herbers、Sebastian Häfner、Sören Dörscher、Tim Lücke、Uwe Sterr 和 Christian Lisdat。 不稳定度为 1.6×10^{-16} 的可运输式钟激光系统。《光学快报》，47:5441- 5444，2022年。[32] S. Vogt、C. Lisdat、T. Legero、U. Sterr、I. Ernsting、A. Nevsky 和 S. Schiller。展示一种可运输的 1 Hz 线宽激光器。《应用物理B》，104: 741-745，2011年。[33] Dongdong Jiao、Xue Deng、Jing Gao、Linbo Zhang、Guanjun Xu、Tao Liu、Ruifang Dong 和 Shougang Zhang。通过 1700公里运输测试的高抗振亚赫兹超稳激光器。《红外物理与技术》，130: 104608，2023年。[34] G. Xu、D. Jiao、L. Chen、L. Zhang、R. Dong、T. Liu 和 J. Wang。可运输式光学腔的振动模式。《光学快报》，29(5):24264-24277，2021年。[35] Tianshu Wang、Peng Lin、Fang Dong、Xianzhu Liu、Wanzhuo Ma 和 Qiang Fu。空间激光通信技术的进展与展望。《中国工程科学》，22(3): 92-99，2020年。[36] Takuma Nakamura、Yifan Liu、Naijun Jin、Haotian Cheng、Charles McLemore、Nazanin Hoghooghi、Peter Rakich、Franklyn Quinlan。从超高噪声到超稳：光电激光锁定的优化。https://arxiv.org/abs/2505.14956，2025年。[37] D. R. Gozzard、L.A. Howard、B.P. Dix-Matthews、S.F.E. Karpathakis、C. T. Gravestock 和 S. W. Schediwy。基于载波相位的视距动态无线时间比对技术研究。《仪器仪表学报》，45(9): 177-188，2024年。[38] Liang Zhang、Liangkui Qi、Jianhua Liu 和 Qingqing Wu。基于热评价指标的乘客舱动态热环境实验研究。《科学进展》，103(3):1-21，2020年。[39] Rong Guo、Lu Li、Ziyi Sun 和 Xiang Xue。低温条件下增程式电动汽车乘员舱与电池加热的综合热管理策略。《应用热工程》，228: 120502，2023年。[40] Edward A. Whittaker、Manfred Gehrtz 和 Gary C. Bjorklund。激光电光相位调制中的残余幅度调制。《美国光学学会会刊B辑》，2(8): 1320-1326，1985年。[41] Andrew D. Ludlow。锶光晶格钟：以亚赫兹精度进行光学光谱学。博士论文，美国：科罗拉多大学，2008年。[42] Li Zhenqian、Peng Jiankang、Ru Yuan、Wan Lingfeng、Lu Zongyu、Li Liufeng 和 Chen Lisheng。空间引力波探测中稳频激光器的发展。《中国基础科学》，6: 36-43，2024年。[43] Yafeng Huang、Di Hu、Meifeng Ye、Yating Wang、Yanli Li、Ming Li、Yinnan Chen、Qiuzhi Qu、Lingke Wang、Liang Liu 和 Tang Li。长期频率稳定度为 1.1×10^{-14} 的全光纤超稳激光器。《中国光学快报》，21(3): 031404，2023年。[44] Zhenqian Li、Zongyu Lu、Lingfeng Wan、Yuan Ru、Lisheng Chen 和 Liufeng Li。基于现场可编程门阵列锁频系统、具有 2.1×10^{-16} 频率稳定度的超稳掺钕钇铝石榴石 1064 nm 激光器。《中国光学快报》，23(1): 011402，2025年。

[45] Chengzhi Yan、Haosen Shi、Yuan Yao、Hongfu Yu、Yanyi Jiang 和 Longsheng Ma。具有亚赫兹线宽和 10^{-16} 频率不稳定度的自动长期稳频激光器。《中国光学快报》，20: 07020，2022年。[46] Jiayu Bu、Dongdong Jiao、Guanjun Xu、Linbo Zhang、Jing Gao、Mengfan Wu、Qi Zang、Xue Deng、Qi Zang、Tao Liu、Ruifang Dong 和 Shougang Zhang。超稳激光器的快速自动重锁方法。《红外物理与技术》，134: 104915，2023年。[47] Gurmail S. Paddan 和 Michael J. Griffin。车辆全身振动评估。《声学与振动杂志》，253(1): 195-213，2002年。[48] David Eager、Md Imam Hossain、Anna Lidfors Lindqvist 和 Shilei Zhou。基于 6 轴的城市公交车座椅振动分析

加速度计和陀螺仪传感器。《科学报告》，14：29865，2024年。[49] Igju Jeon、Woosong Jeong、Chang min Ahn 和 Jungwon Kim。利用自零差探测将 10^{-15} 级激光稳定化至光纤热噪声极限。《光学快报》，50：1057-1060，2025年。[50] Quan Zhao、Shaohua Li 和 Guizhend Feng。准零刚度车辆振动隔离系统的设计与测试。《振动与冲击》，40(6)：55-63，2021年。[51] Jingshu Zhou、Chaohui Liu 和 Feng Xu。车载状态下光电经纬仪的减振与防护研究。《光子学杂志》，1：244-248，2007年。