

基于 ^{87}Rb 原子光频标可移动光生微波信号源的研究*

吴莉珍¹⁾ 张宝林^{1)†} 刘珍峰²⁾ 陈景标³⁾⁴⁾⁵⁾ 张首刚¹⁾⁶⁾ 于得水¹⁾⁷⁾

1) (中国科学院国家授时中心, 西安 710600)

2) (浙江法拉第激光科技有限公司, 温州 325000)

3) (微米纳米加工技术全国重点实验室, 北京 100871)

4) (北京大学电子学院量子电子学研究所, 北京 100871)

5) (合肥国家实验室, 合肥 230088)

6) (中国科学院大学, 北京 100049)

7) (时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600)

摘 要

本文利用集成化光学频率梳实现了从 ^{87}Rb 原子光频标到高稳定微波频标的转换. 首先, 设计并搭建了一套集成化 ^{87}Rb 原子光频标装置, 采用调制转移光谱技术将 780 nm 激光频率锁定到 ^{87}Rb 原子的 $5S_{1/2}(F=2) - 5P_{3/2}(F'=3)$ 跃迁上. 实验测得该稳频激光的秒级频率稳定度为 9.9×10^{-14} , 激光线宽约为 37.1 kHz. 在此基础上, 将集成化光纤光学频率梳的载波包络偏移频率 f_{ceo} 与重复频率 f_r 同时参考至氢钟, 实现了 ^{87}Rb 原子 $5S_{1/2}(F=2) - 5P_{3/2}(F'=3)$ 跃迁绝对频率的测量. 进一步, 在不依赖氢钟的条件下, 基于 ^{87}Rb 原子光频标锁定光学频率梳并产生微波信号, 实现了光频稳定度向微波频段的有效传递, 其稳定度与光频稳定度一致. 当采样时间为 10 s 时, 微波信号的稳定度可以达到 1.6×10^{-13} , **短期稳定度接近商业铯喷泉钟的水平**. 该光生微波装置的结构简单, 集成化程度高, 具备良好的可搬运应用潜力, 可为高性能微波频率参考及便携式原子钟系统提供技术支撑.

关键词: 调制转移光谱; 光学频率梳; 光生微波; 光频标

PACS: 52. 70. Gw, 43. 58. Hp, 95. 55. sh, 42. 50. -p

基金: 中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDB0920000)和中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(批准号: YSBR-085)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangbaolin@ntsc.ac.cn

1 引 言

光学频率是目前可测量物理量中精度最高的物理量之一, 基于原子跃迁构建的光学频率标准已成为高精度时间频率测量的重要研究方向^[1,2]. 按照工作介

质和实验条件的不同，光学频率标准主要可分为冷原子光钟和热原子光钟两类^[3]。当前，冷原子光钟的系统不确定度已经达到 $10^{-18} \sim 10^{-19}$ 量级，稳定度也可达到与不确定度相当的水平，但冷原子光钟系统复杂，所需不同波长的激光器数目多，功耗大，这极大限制了其在实验室外的应用^[4,5]。相比之下，热原子光钟的装置结构简单，大多仅需一路激光，集成化程度高，近年来其频率稳定度也已经进入 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ 量级^[6-9]。随着光学频率梳技术的发展，热原子光频标不仅可作为稳定的光学频率参考，还可通过光频—微波频率转换产生高稳定微波信号，在守时，导航，国防及现场计量等领域具有重要应用场景^[10,11]。

热原子光钟通常采用对一阶多普勒频移不敏感的调制转移光谱 (modulation transfer spectroscopy, MTS) 技术与双光子技术实现稳频^[6,7,12]。MTS 技术具有误差信号零背景，鉴频斜率陡峭，信噪比高，对激光光强波动不敏感等优势。近年来，国内外关于 MTS 稳频技术的研究已从实验室单波长高精度锁定向小型化，集成化和多波长协同锁定方向发展：北京大学陈景标团队通过气室温度-调制频率联合优化，将 ^{87}Rb 原子 MTS 的频率稳定度提升至 $1.5 \times 10^{-13} @ 1\text{s}$ ，同时实现 PID 控制器，电光调制器等核心器件的便携式集成^[13,14]，该团队进一步提出的双光学跃迁 MTS 技术，在单一 ^{87}Rb 原子系统中同时实现 780 nm 与 795 nm 激光的 10^{-14} 量级稳频，开创了多波长光频基准的新范式，为可搬运多波段光频系统提供了核心支撑^[9]。法国 FEMTO-ST 研究所 Boudot 团队成功实现了基于 $(6\text{ mm})^3$ 微型 ^{87}Rb 原子气室的 MTS 稳频，将激光线宽压窄至 6.9 kHz，系统体积较传统方案缩小 80%，验证了微型化气室与 MTS 技术结合的工程化可行性^[15]。

光学频率梳的问世为光学频率—微波频率之间的高精度转换提供了关键工具^[16,17]。通过锁定与控制光梳的载波包络偏移频率 f_{ceo} 和重复频率 f_{r} ，光梳可产生一系列频率间隔严格相等且相干的光学梳齿，实现了光频与微波频之间的转

换。因此，光梳已成为不同光频间的频率比对，原子跃迁频率精确测量以及高稳定光生微波产生的核心装置^[18]。面向可搬运和工程化应用需求，光纤光学频率梳近年来在集成化，高重复频率，轻量化和稳定锁定等方面取得了显著进展。南京大学徐飞团队提出的单短线形腔偏振复用谐波锁模光纤激光器，实现了 2.3 GHz 重复频率输出，自由运转下重复频率差抖动仅 0.03%，显著提升了可搬运双梳测量的速率^[19]。基于非线性光学环镜 (NALM) 锁模的掺铒九字腔光纤光梳，可通过周期极化铌酸锂 (PPLN) 晶体倍频，光梳频谱可以覆盖 780 nm 波段，结合本地晶振锁定 f_r/f_{ceo} ，使梳齿稳定度远优于 ^{87}Rb 原子频标，为轻量化光梳基准奠定了基础^[20, 21]。此外，美国加州大学圣塔芭芭拉分校 Bowers 团队联合 Vahala 团队与 NIST 团队，基于砷化铝镓 (AlGaAs) 非线性材料，在同一芯片上集成光梳发生器与倍频器，突破了传统自参考技术多器件，大体积的瓶颈，实现了芯片级光梳的低功耗自参考^[22, 23]。

本文围绕基于 ^{87}Rb 原子光频标的可搬运光生微波信号源开展系统研究。首先，采用 MTS 技术将 780 nm 半导体激光器锁定于 ^{87}Rb 原子的 D_2 跃迁谱线，通过优化光功率，调制频率和气室温度等关键参数，确定系统最佳工作点，并采用双激光异频拍频法实验测量 ^{87}Rb 原子光频标的频率稳定度。随后，搭建集成化光纤光学频率梳系统，实现重复频率与载波包络偏移频率的稳定锁定，并对光梳锁定性能进行评估。在此基础上，通过 ^{87}Rb 原子光频标与光梳梳齿之间的拍频，完成了 ^{87}Rb 原子 D_2 跃迁绝对频率的精确测量，进一步在不依赖氢钟的条件下，利用 ^{87}Rb 原子光频标锁定光学频率梳并产生高稳定光生微波信号。该研究为热原子光频标在可搬运微波频率参考，现场光频计量和高性能时间频率系统中的应用提供了可行性技术方案。

2 基于 MTS 的 780 nm 激光稳频系统

2.1 MTS实验装置

本系统选用的 780 nm 半导体激光器(来自浙江法拉第激光科技有限公司)最大输出功率约为 56 mW, 自由运转线宽小于 100 kHz, 具备良好的频率调谐特性与功率稳定性. 激光器, MTS 稳频光路与控制电路进行了高度集成, 总体积仅为 10.2 L. 图 1(a)展示了 ^{87}Rb 原子的 MTS 稳频原理图: 激光器输出激光经半波片(HWP)与偏振分光棱镜(PBS)后分为两束, 一束作为探测光(0.8 mW), 另一束作为泵浦光(1.5 mW), 二者功率可以通过旋转 HWP 进行调节. 泵浦光经电光调制器(EOM)实现相位调制, 调制信号由直接数字频率合成器(DDS)提供. 调制后的泵浦光与未调制的探测光在 ^{87}Rb 原子气室中反向传播, 并与 ^{87}Rb 原子 D_2 线 $5S_{1/2}(F=2) - 5P_{3/2}(F'=3)$ 超精细能级跃迁(图 1(b))发生近共振相互作用, 从而产生类似简并四波混频的非线性光学过程. 气室温度由热敏电阻监测, 通过温度控制器闭环调节加热电流, 以保证气室温度的长期稳定. 通过四波混频效应, 泵浦光的调制信息转移至探测光, 携带调制信息的探测光由光电探测器(PD, Thorlabs PDA8A2)转换为电信号. 该信号通过混频器解调后得到具有零背景的色散型误差 MTS 信号. 该误差信号经由比例 - 积分 - 微分(PID)控制器, 反馈至激光器压电陶瓷(PZT)与注入电流模块, 实现对激光频率的快速与慢速联合闭环控制, 从而将激光频率稳定锁定在 ^{87}Rb 原子 D_2 线跃迁频率附近.

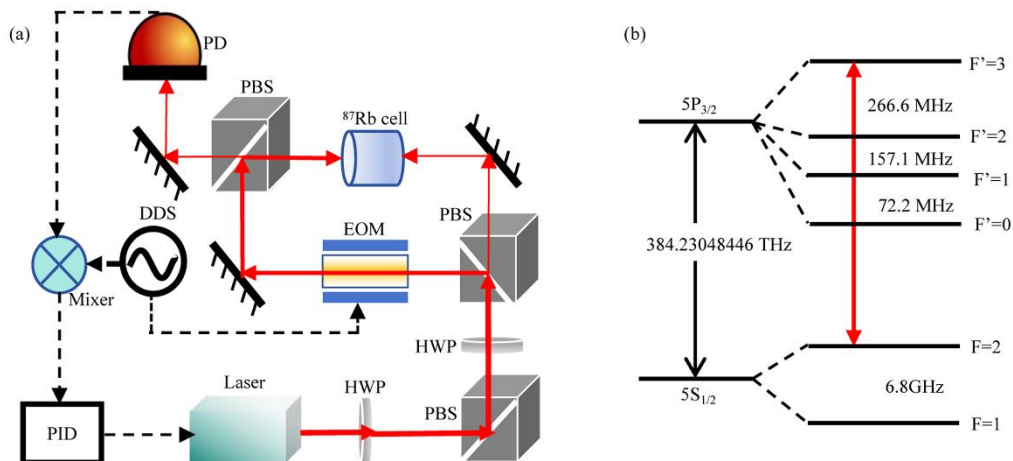


图 1 (a) ^{87}Rb 原子的 MTS 锁定示意图. (b) ^{87}Rb 原子跃迁能级图.

Fig. 1. (a) Schematic diagram of MTS locking of ^{87}Rb atoms. (b) Energy level diagram of ^{87}Rb atomic transitions.

2.2 实验参数的系统优化

为获得最佳的稳频效果，需要对影响 MTS 信号质量的关键参数进行优化. 泵浦光与探测光功率，EOM 调制频率，相位，调制深度及 ^{87}Rb 原子气室温度等参数，均会对 MTS 信号特征产生显著影响^[13,14]. 首先开展光功率优化实验：固定 ^{87}Rb 原子气室温度，激光调制频率等参数，逐步调整泵浦光与探测光的输出功率，实时采集 MTS 信号的峰峰值与信噪比. 实验结果表明，当泵浦光功率为 1.5 mW，探测光功率为 0.8 mW，MTS 信号的峰峰值最大且背景噪声最低. 泵浦光功率过高，会引发原子系综的功率展宽效应，导致跃迁谱线展宽，误差信号斜率降低，进而降低锁定精度. 探测光功率过低，光电转换后的电信号幅值过小，易被噪声淹没，导致信噪比下降，无法实现稳定的频率锁定. 图 2(a) 给出了 ^{87}Rb 原子 D_2 跃迁对应的 MTS 信号与饱和吸收谱(SAS)，MTS 信号呈现明显的零背景色散线型，其过零点与原子跃迁共振位置相对应，验证了锁定点选择的准确性.

在光功率优化的基础上，进一步对 ^{87}Rb 原子气室温度与激光调制频率进行联合优化. ^{87}Rb 原子气室温度决定了气室内的原子密度，直接影响原子与激光场之间的相互作用强度，同时温度升高还可能增强原子间碰撞效应，引起碰撞展宽和频移，从而改变谱线的线型与线宽. 激光调制频率则决定了调制边带相对于原子共振频率的位置，进而影响四波混频效率和解调后误差信号的提取效率，二者存在明显的耦合效应，需要通过实验扫描确定最佳参数组合. 实验中，在 $30^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 范围内逐步调节 ^{87}Rb 原子气室温度，同时在 4.93 MHz~4.98 MHz 范围内扫描激光调制频率，对不同参数组合下的 MTS 误差信号进行采集. 通过对误差信号过零点附近进行线性拟合，获得相应的过零点斜率，每个数据点取 10 次测量结果的平均值，以降低随机误差的影响. 以过零点斜率的绝对值作为评价

指标，得到不同气室温度和调制频率下的优化结果。如图 2(b) 所示，MTS 误差信号斜率随气室温度升高呈现先增大后减小的趋势。当 ^{87}Rb 原子气室温度为 55 $^{\circ}\text{C}$ ，激光调制频率为 4.955 MHz 时，MTS 误差信号的斜率最大，信噪比最优，可实现激光频率的稳定可靠锁定。

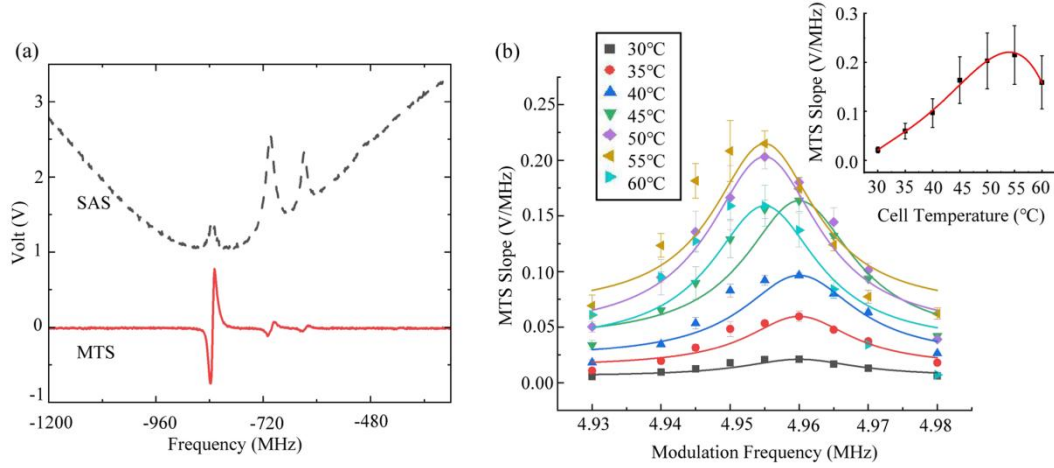


图 2 (a) ^{87}Rb 原子 5S_{1/2} (F=2) - 5P_{3/2} (F'=3) 跃迁的 MTS (实线) 与饱和吸收谱 (SAS, 虚线)

信号。 (b) 不同调制频率和温度下 MTS 的过零误差信号斜率 (通过线性拟合获得)。

Fig. 2. (a) Spectra signals of ^{87}Rb 5S_{1/2} (F=2) - 5P_{3/2} (F'=3) MTS (solid line) and saturated absorption spectroscopy (SAS, dashed line). (b) Slope of the error signal at zero-crossing (obtained from linear fitting) for MTS under different modulation frequencies and temperatures.

2.3 稳频结果

为定量表征 780 nm 激光器的稳频性能，本研究搭建了基于异频拍频的测试系统：实验中选择两台结构完全相同且独立的 780 nm 激光器，并分别采用 MTS 技术锁定至 ^{87}Rb 原子 D₂ 线跃迁。两路稳频激光经光纤耦合后输入高速光电探测器 (PD, Thorlabs PDA10A2)，在探测器上产生射频拍频信号。拍频信号经射频放大后输入频谱分析仪 (Keysight N9020A-513) 和频率计数器 (Keysight 53230A)，分别用于线宽测量和频率稳定度评估。一方面，通过频谱分析仪采集拍频信号的频谱分布，并采用洛伦兹函数进行拟合，可获得两台激光器的综合线宽信息，如图 3(a) 所示。拟合结果表明，拍频信号的半高全宽 (FWHM) 为 52.4 kHz。由于两台激光器独立锁定且性能一致，单台激光器的线宽可由综合线宽除以 $2^{1/2}$ 得到，

即约为 37.1 kHz，实现了窄线宽激光输出。另一方面，通过频率计数器连续采集拍频频率随时间的变化数据并计算 Allan 偏差，以评估系统的频率稳定度。图 3(b) 给出了两台 MTS 稳频激光器拍频信号的 Allan 偏差，结果显示，两台激光器的综合频率稳定度可达 1.4×10^{-13} @1 s，考虑到两台激光器独立锁定且性能相当，单台激光器的频率稳定度可由综合稳定度除以 $2^{1/2}$ 得到，即 9.9×10^{-14} @1 s。该稳定度水平满足高精度光频应用对激光频率稳定性的要求，为后续与光学频率梳的集成应用提供了稳定的光学参考^[14, 22]。

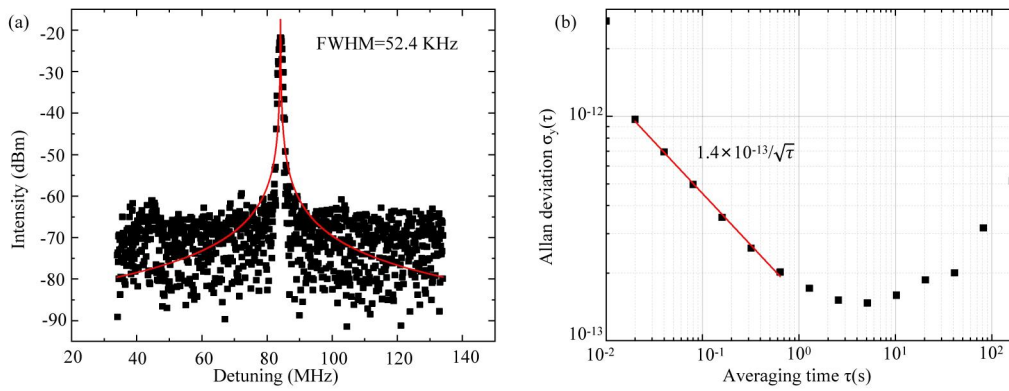


图 3 (a) 基于 MTS 稳频的两台 780 nm 激光器之间的拍频谱。(b) 两台光钟之间拍频信号的 Allan 偏差。

Fig. 3. (a) Spectrum of beat note between MTS-stabilized 780 nm lasers. (b) Allan deviation of beat note between two optical clocks.

3 光纤飞秒光学频率梳系统

3.1 光梳系统结构

为将 ^{87}Rb 原子光频标的光学频率转换为可直接应用于时间频率系统的微波频率信号，需要借助光学频率梳建立光学频率与微波频率之间的精密相干连接。光学频率梳主要由锁模激光器与频率控制系统两部分构成。本系统采用基于非线性放大环境 (NALM) 锁模技术的掺铒九子腔光纤激光器^[24]，工作波长为 $1.5 \mu\text{m}$ ，具备低噪声，自启动锁模能力强和易于光纤化集成等特点。锁模激光器输出的脉冲激光经过倍频后可覆盖 ^{87}Rb 原子 D_2 线跃迁所在的 780 nm 波段。相邻两个脉冲之间的时间间隔为光频梳重复频率 f_r 的倒数。由于激光脉冲在腔内传输过程

中受到色散和非线性效应的影响，脉冲载波相位相对于包络相位会产生逐脉冲滑移，从而形成载波包络偏移频率 f_{ceo} 。通过光电探测器直接探测锁模激光器输出的脉冲序列获取 f_r 信号， f_{ceo} 信号则可以通过 $f-2f$ 自参考方法获得^[16]， ^{87}Rb 原子频标与光梳梳齿之间进行拍频，可获得拍频信号 f_{beat} 。整套光梳系统的结构如图 4 所示，其中图 4(a) 为原子光频标绝对频率测量实验的光路布局，图 4(b) 为基于 ^{87}Rb 原子光频标的光生微波信号产生实验的光路布局。

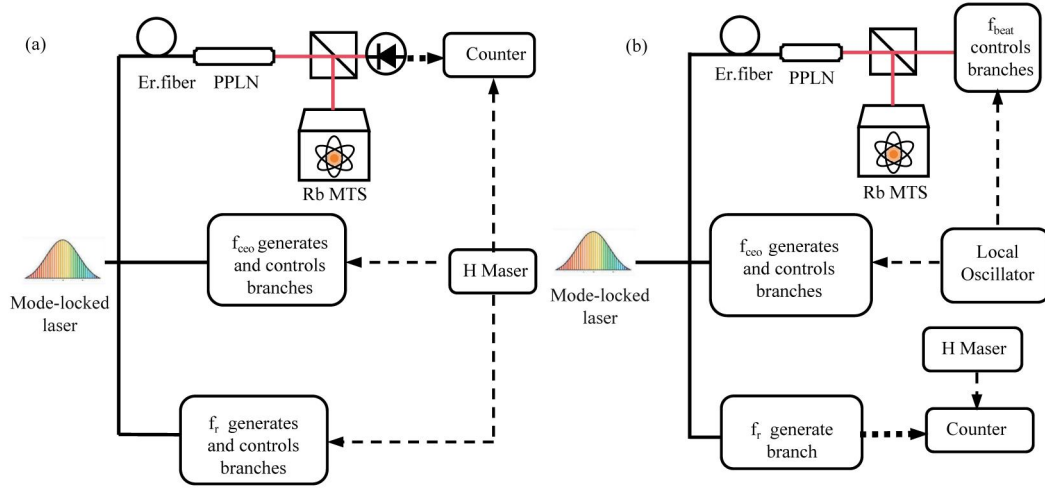


图 4 (a) 基于光纤飞秒光学频率梳的 780 nm 光频标绝对频率测量实验装置示意图。(b) 便携式光生微波信号产生的实验装置示意图。Er.fiber: 掺铒光纤, PPLN: 周期极化铌酸锂晶体, H Maser: 氢钟, Local Oscillator: 本地晶体振荡器, Counter: 频率计数器。

Fig.4. (a) Schematic diagram of the experimental setup for the absolute frequency measurement of the 780 nm optical frequency standard based on a fiber femtosecond optical frequency comb. (b) Schematic diagram of the experimental setup for portable photogenerated microwave signal generation. Er.fiber, erbium-doped fiber; PPLN, periodically poled lithium niobate crystal; H Maser, hydrogen maser; Local Oscillator, local crystal oscillator; Counter, frequency counter.

3.2 ^{87}Rb 原子光频标绝对频率测量

首先，将光纤光梳的 f_r 与 f_{ceo} 同时锁定在同一台氢钟参考源上。为评估光学频率梳的锁定效果，分别采用频谱仪(Keysight N9020A-513)与通过相位噪声分析仪(Microchip 53100A)对锁定后的光梳进行频谱特性与频率稳定度测试。图 5(a)和图 5(b)分别给出了 f_{ceo} 及 $f_r - f_{\text{ceo}}$ 信号频谱与 f_r 的信号频谱。信号均表现出尖锐的峰形，清晰的信号结构以及较低的杂散分量，表明光梳锁定状态良好。图 5(c)展示了锁定后 f_r 与 f_{ceo} 的相位噪声功率谱密度，结果显示在 1 Hz 至 100

kHz 频带内，二者的相位噪声均得到有效抑制。图 5(d) 进一步给出了 f_r 与 f_{ceo} 的 Allan 偏差曲线，从时域上定量表征了锁定后光梳的频率稳定性性能。

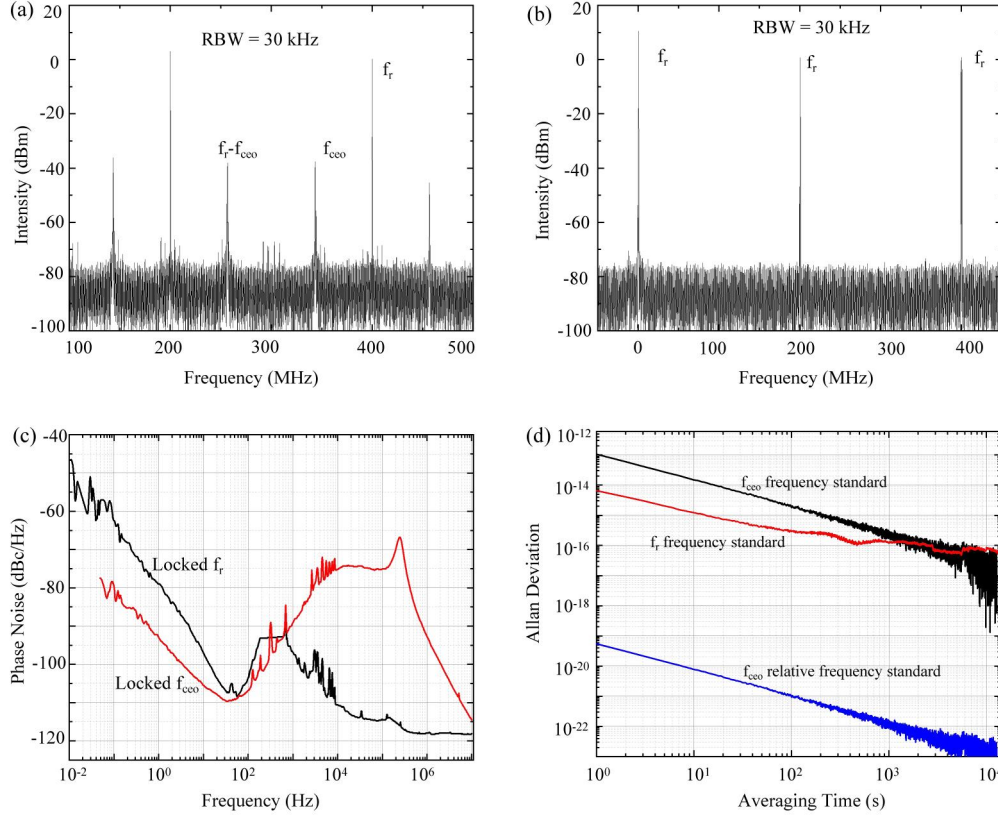


图 5 (a) 光纤光梳的 f_{ceo} 及 $f_r - f_{ceo}$ 信号频谱，分辨率带宽(RBW)为 30 kHz. (b) 光纤光梳的 f_r 频谱，RBW 为 30 kHz. (c) 锁定后 f_r 和 f_{ceo} 的相位噪声曲线. (d) 氢钟参考下 f_{ceo} 和 f_r 的频率稳定度。

Fig. 5. (a) Spectrum of the f_{ceo} and $f_r - f_{ceo}$ signal of the fiber frequency comb, with a resolution bandwidth (RBW) of 30 kHz. (b) Spectrum of the f_r of the fiber optical frequency comb, with an RBW of 30 kHz. (c) Phase noise curves of f_r and f_{ceo} after locking. (d) Frequency stability of f_{ceo} and f_r referenced to the hydrogen maser.

在光梳锁定的基础上，我们开展了 ^{87}Rb 原子光频标绝对频率的测量实验。将经 MTS 稳频的 780 nm 激光器与光梳梳齿进行拍频，通过频率计数器连续采集拍频频率 f_{beat} ，结合已知的锁定频率 f_r 与 f_{ceo} ，可建立以下频率关系：

$$f_{beat} = \nu_0 - Nf_r - f_{ceo} \quad (1)$$

其中 ν_0 为 ^{87}Rb 原子跃迁绝对频率， N 为参与拍频的光梳梳齿序号。图 6(a) 给出了 f_{beat} 的测量结果，根据式 (1) 计算得到 ^{87}Rb 原子光频标的绝对频率为 384228115108.22 kHz，与北京大学已报道结果的偏差小于 100 kHz^[11]，该偏差主要来源于 ac Stark 频移，原子间碰撞频移以及实验参数未完全一致等因素。

图 6(b) 为拍频信号 f_{beat} 的 Allan 偏差, 由于氢钟的稳定度一般在 $E-14$ 量级, 优于 ^{87}Rb 原子光频标, 拍频结果反映了 ^{87}Rb 原子光频标的频率稳定度. 在 AC Stark 频移, 碰撞频移, 剩余幅度调制噪声等因素作用下, ^{87}Rb 原子光频标的稳定度约在几十秒后开始上翘. 本系统已经完成对 Rb 原子气室恒温控制, 我们认为激光功率波动是限制 ^{87}Rb 原子光频标的主要因素.

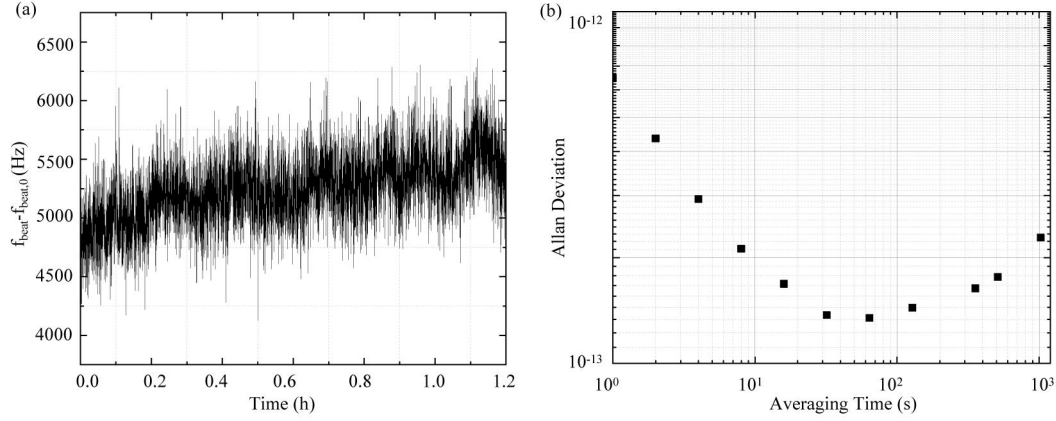


图 6 (a) ^{87}Rb 原子 MTS 频率标准与光纤光学频率梳梳齿之间的拍频信号 ($f_{\text{beat}} - f_{\text{beat},0}$) 测量结果, 其中光学频率梳的重复频率 (f_r) 和载波包络偏移频率 (f_{ceo}) 均锁定至氢钟, $f_{\text{beat},0} = 2.6953 \text{ MHz}$. (b) f_{beat} 信号的 Allan 偏差曲线.

Fig. 6. (a) Measurement result of the beat note signal ($f_{\text{beat}} - f_{\text{beat},0}$) between the ^{87}Rb atomic MTS frequency standard and the comb teeth of the fiber optical frequency comb, with both f_r and f_{ceo} of the optical frequency comb locked to a hydrogen maser. $f_{\text{beat},0} = 2.6953 \text{ MHz}$. (b) Allan deviation curve of the f_{beat} signal.

3.3 光生微波信号生成

光梳的重复频率 f_r 约为 200 MHz , 可直接作为微波频率信号输出. 为了简化系统装置, 我们通过锁定 f_{beat} 和 f_{ceo} 来锁定光梳的梳齿, 从而实现对 f_r 的锁定, 并将 f_r 作为光生微波的信号输出. 与绝对频率测量实验不同, 在光生微波信号产生实验中, 为了构建不依赖氢钟的可移动系统, 仅通过一套集成化 ^{87}Rb 原子 MTS 光频标与光梳来产生高稳定微波信号. 如图 4(b) 所示, 实验中将 f_{ceo} 与 f_{beat} 均锁定在光梳的本地晶振参考上, 则 f_r 可表示为:

$$f_r = (v_0 - f_{\text{beat}} - f_{\text{ceo}}) / N \quad (2)$$

由于梳齿序号 $N \sim 2 \times 10^6$, f_{beat} 与 f_{ceo} 对 f_r 造成的稳定度影响在 10^{-16} 量级, 优于 ^{87}Rb

原子光频标的稳定度水平，因此，**在本实验条件下**，本地晶振噪声对光生微波频率稳定度的影响可以忽略。图 7(a) 和图 7(b) 分别给出了本地晶振参考下 f_{beat} 和 f_{ceo} 的频率稳定度曲线，两者均表现出良好的锁定性能，验证了本地晶振作为参考源实现光梳锁定的有效性。

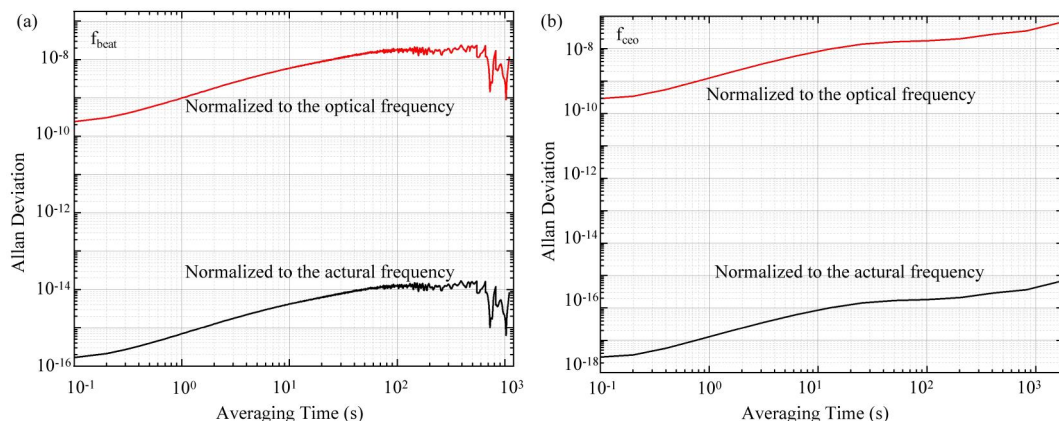


图 7 (a) 本地晶振参考下拍频信号 f_{beat} 的频率稳定度。 (b) 本地晶振参考下载波包络偏移频率 f_{ceo} 的频率稳定度。

Fig.7. (a) Frequency stability of the beat signal f_{beat} with the local crystal oscillator as reference. (b) Frequency stability of the carrier-envelope offset frequency f_{ceo} referenced to the local crystal oscillator.

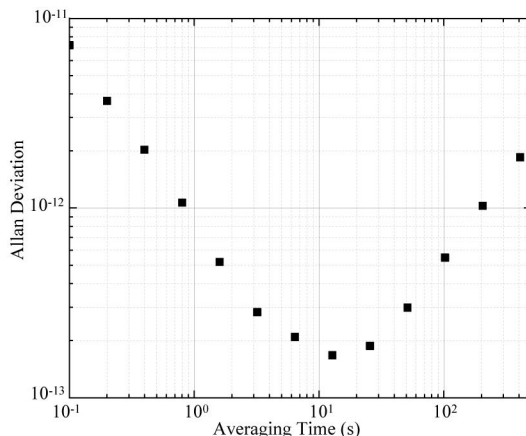


图 8 基于 780 nm MTS 稳频激光器和光纤光学频率梳产生的光生微波信号的 Allan 偏差。
Fig.8. Allan deviation of the photogenerated microwave signal generated based on the 780 nm MTS-stabilized laser and the fiber optical frequency comb.

为了评估光生微波信号的性能，将相位噪声分析仪参考至氢钟，测量了光生微波信号的频率稳定度。如图 8 所示，当采样时间为 10 s 时，光生微波信号的频率稳定度达到 1.6×10^{-13} ，与 780 nm MTS 稳频激光器的稳定度水平一致。该结果表明，光频标的频率稳定度能够通过光学频率梳有效传递至微波频段，同

时说明光生微波链路引入的附加噪声较低，具备作为可移动高稳定微波频率参考的应用潜力。

本实验中，光生微波信号直接输出为光梳重复频率 f_r ，其数值约 200 MHz。实际工程使用场景下，可借助 DDS 分频方案将该 200 MHz 信号转换为工程应用中常用的 10 MHz 或 100 MHz 标准射频参考信号，转换过程不会劣化信号本身的稳定度指标^[25]。

4 总结

本文基于 MTS 技术，将 780 nm 激光器锁定至 ^{87}Rb 原子 D_2 线 $5S_{1/2}(F=2) - 5P_{3/2}(F'=3)$ 跃迁，实现了一套集成化 ^{87}Rb 原子光频标系统。实验测得该光频标的秒级频率稳定度为 9.9×10^{-14} ，线宽约为 37.1 kHz。进一步结合光纤光学频率梳，在重复频率 f_r 和载波包络偏移频率 f_{ceo} 均锁定至氢钟的条件下，测得 ^{87}Rb 原子光频标的绝对频率为 384228115108.22 kHz，该结果与已有实验测量结果符合较好。在此基础上，进一步将光梳的载波包络偏移频率 f_{ceo} 与拍频信号 f_{beat} 锁定至本地晶振参考，当采样时间为 10 s 时，成功产生了稳定度达 1.6×10^{-13} 的高质量微波信号，与 780 nm 光频标自身稳定度一致，说明光学频率稳定度能够通过光纤光学频率梳有效传递至微波频段。整套系统集成化程度高，验证了基于热原子光频标构建可搬运高稳定光生微波信号源的可行性。

下一步，我们将通过在系统中加入激光功率稳定装置与 EOM 温控装置等手段，抑制光频移的漂移与剩余幅度噪声等，提升光生微波信号的长期稳定度，同时，我们还将进一步优化系统的鲁棒性以使其适应不同的振动与温湿度环境，并进行搬运性能的测试使其达到商用条件。

参考文献

- [1] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W 2002 *Nature* 416 233
- [2] Lu X T, Cao J, Chang H 2025 *Acta Phys. Sin.* 74 200601 (in Chinese)
[卢晓同, 曹进, 常宏 2025 *物理学报* 74 200601]
- [3] Ludlow A D, Boyd M M, Ye J, Peik E, Schmidt P O 2015 *Rev. Mod. Phys.* 87 637
- [4] Marshall M C, Rodriguez Castillo D A, Arthur-Dworschack W J, Aepli A, Kim K, Lee D, Warfield W, Hinrichs J, Nardelli N V 2025 *Phys. Rev. Lett.* 135 033201
- [5] Zhang B L, Ma Z X, Huang Y, Han H L, Hu R M, Wang Y Z, Zhang H Q, Tang L Y, Shi T Y 2026 *Phys. Rev. Lett.* 136 053202
- [6] Martin K W, Phelps G, Lemke N D, Bigelow M S, Stuhl B, Wojcik M, Holt M, Coddington I, Bishop M W 2018 *Phys. Rev. Appl.* 9 014019
- [7] Miao J, Shi T, Zhang J, Chen J B 2022 *Phys. Rev. Appl.* 18 024034
- [8] Yang Q H, Hu Z Y, Liu T Y, Miao J, Chang P Y, Pan D, Li Z W, Wei X L, Chen J B 2025 *Photonics Res.* 13 2384
- [9] Miao J, Chen J M, Pan D, Yu D S, Yang Q H, Chen J B 2025 *Photonics Res.* 13 721
- [10] Xie X P, Bouchand R, Nicolodi D, Giunta M, Hänsel W, Lezius M, Joshi A, Datta S, Alexandre C, Lours M, Tremblin P A, Santarelli G, Holzwarth R, Le Coq Y 2017 *Nat. Photon.* 11 44
- [11] Chen Z D, Liu T Y, Yang R A, Yang Q H, Wang Y, Miao J, Chen J M, Pan D, Cao S Y 2026 *Phys. Rev. Appl.* 25 014004
- [12] Wu H Y, Wen Z Q, Wang C, Liu Z F, Chen J B, Zhang S G, Yu D S 2025 *Chin. Phys. B* 34 114201
- [13] Lee S, Moon G, Park S E, Hong H G, Lee J H, Seo S, Kwon T Y, Lee S B 2023 *Opt. Lett.* 48 1020
- [14] Lian J Q, Yang Q H, Liu T Y, Pan D, Miao J, Chen Z D, Chen J M, Chen J, Bai L, Liu Z D, Chen J B 2025 *Chin. Opt. Lett.* 23 041201
- [15] Gusching A, Millo J, Ryger I, Vicarini R, Abdel Hafiz M, Passilly N, Boudot R 2023 *Opt. Lett.* 48 1526

- [16] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stentz A, Windeler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 Science 288 635
- [17] Diddams S A, Jones D J, Ye J, Cundiff S T, Hall J L, Ranka J K, Windeler R S, Holzwarth R, Udem T, Hänsch T W 2000 Phys. Rev. Lett. 84 5102
- [18] Diddams S A, Vahala K, Udem T 2020 Science 369 6501
- [19] Wang G R, Ding Z X, Xu F 2025 Photonix 1, 01004
- [20] Shao X D, Yan Y, Han H N, Wei Z Y 2024 Astron. Tech. Instrum. 1 105
- [21] Zhu E, Zhu M W, Jiang T W, Li Z X, Ding S S, Shang J M, Ma J X, Yu S, Luo B 2023 Appl. Opt. 62 6039
- [22] Kuyken B, Billet M, Leo F, Yvind K, Pu M H 2020 *Opt. Lett.* 45 603
- [23] Chang L, Xie W Q, Shu H W, Yang Q F, Shen B Q, Boes A, Peters J D, Jin W, Xiang C, Liu S T, Moille G, Yu S P, Wang X J, Srinivasan K, Papp S B, Vahala K, Bowers J E 2020 Nat. Commun. 11 1331
- [24] Chen X, Li M K, Rao B J, Yang X G, Hu Z Y, Dong R F, Zhang S G 2025 Photonics 12 195
- [25] Fortier T M, Kirchner M S, Quinlan F 2011 Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division Nat. Photon. 5 425

Research on a Mobile Optically Generated Microwave Signal Source Based on ^{87}Rb Atomic Optical Frequency Standard*

Wu Lizhen¹⁾ Zhang Baolin^{1) †} Liu Zhenfeng²⁾ Chen Jingbiao³⁾⁴⁾⁵⁾ Zhang Shougang¹⁾⁶⁾ Yu
Deshui¹⁾⁷⁾

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

2) (Zhejiang Faraday Laser Technology Co., Ltd., Wenzhou 325000, China)

3) (National Key Laboratory of Micro-Nano Processing Technology, Beijing 100871, China)

4) (Institute of Quantum Electronics, School of Electronics, Peking University, Beijing
100871, China)

5) (Hefei National Laboratory, Hefei 230088, China)

6) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

7) (Time Standards and Key Laboratory of Applications (Chinese Academy of Sciences),
Xi'an 710600, China)

Abstract

This paper demonstrates the conversion of a ^{87}Rb atomic optical frequency standard to a highly stable microwave frequency standard using an integrated optical frequency comb. First, an integrated ^{87}Rb atomic optical frequency standard was designed and constructed. The frequency of a 780 nm laser was locked to the $5S_{1/2}(F=2) - 5P_{3/2}(F'=3)$ transition of ^{87}Rb atoms using modulation transfer spectroscopy. The stabilized laser achieved a frequency stability of 9.9×10^{-14} at 1 s and a linewidth of approximately 37.1 kHz. On this basis, the carrier-envelope offset frequency f_{ceo} and repetition frequency

f_r of the integrated fiber optical frequency comb were simultaneously referenced to a hydrogen maser, enabling absolute frequency measurement of the $^{87}\text{Rb } 5S_{1/2}(F=2) - 5P_{3/2}(F'=3)$ transition. Furthermore, without relying on a hydrogen maser, the optical frequency comb was locked based on the ^{87}Rb atomic optical frequency standard to generate a microwave signal, thereby effectively transferring the optical frequency stability to the microwave domain, with the generated microwave stability consistent with that of the optical frequency standard. At an averaging time of 10 s, the frequency stability of the microwave signal reached 1.6×10^{-13} . The short-term stability is close to the level of commercial cesium fountain clocks. The optically generated microwave device features a simple structure and a high degree of integration, showing good potential for transportable applications and providing technical support for high-performance microwave frequency references and portable atomic clock systems.

Keywords: Modulation transfer spectroscopy; Optical frequency comb; Optically generated microwave; Optical frequency standard

*Project funded by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDB0920000) and the Young Team Program in the Field of Basic Research of the Chinese Academy of Sciences (Approval No. YSBR-085).

† Corresponding author. E-mail: zhangbaolin@ntsc.ac.cn

