

用于光频传递的通信波段窄线宽激光器研制及应用

焦东东 高静 刘杰 邓雪 许冠军 陈玖朋 董瑞芳 刘涛 张首刚

Development and application of communication band narrow linewidth lasers

Jiao Dong-Dong Gao Jing Liu Jie Deng Xue Xu Guan-Jun Chen Jiu-Peng Dong Rui-Fang Liu Tao Zhang Shou-Gang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 190601 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.190601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.190601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铯玻色子的“魔术”波长光晶格装载实验研究

Experimental research on loading strontium bosons into the optical lattice operating at the magic wavelength

物理学报.2015, 64(13): 130601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130601>

基于光纤的光学频率传递研究

Study of optical frequency transfer via fiber

物理学报.2015, 64(12): 120602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120602>

单模激光增益模型的能量随机共振

Energetic stochastic resonance in gain-noise model for single-mode laser

物理学报.2015, 64(3): 034210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034210>

周期力调制噪声驱动下单模激光系统的多重随机共振

Stochastic multi-resonance of the single-mode laser system driven by the noise with periodic force modulation

物理学报.2015, 64(2): 024211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024211>

振动不敏感球形光学参考腔研究

Study of a spherical vibration-insensitive optical reference cavity

物理学报.2014, 63(9): 090601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.090601>

用于光频传递的通信波段窄线宽激光器 研制及应用*

焦东东¹⁾²⁾³⁾ 高静¹⁾³⁾ 刘杰¹⁾²⁾³⁾ 邓雪¹⁾³⁾ 许冠军¹⁾³⁾ 陈玖朋¹⁾²⁾³⁾
董瑞芳¹⁾³⁾† 刘涛¹⁾³⁾‡ 张首刚¹⁾³⁾

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)

3) (中国科学院时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

(2015年3月22日收到; 2015年5月12日收到修改稿)

通信波段窄线宽激光器在基于光纤的光学频率传递中有着重要应用. 本文报道了1550 nm超窄线宽光纤激光器的研制及其在光学频率传递中的初步应用结果. 利用一台激光光源, 分别锁定到两个参考腔上(精细度分别为344000和296000), 锁定后经拍频比对测得单台激光线宽优于1.9 Hz, 秒级频率稳定度为 1.7×10^{-14} , 优于国内同类报道. 将研制的超窄线宽激光器用于光纤光学频率传递, 在50 km光纤盘上实现了 $7.5 \times 10^{-17}/s$ 的传递稳定度, 较采用商用光纤激光器提高了3.2倍.

关键词: 时间频率, 窄线宽激光, 光学频率传递

PACS: 06.30.Ft, 42.60.Mi, 42.62.Eh

DOI: 10.7498/aps.64.190601

1 引言

窄线宽激光具有极高的频率稳定性, 在重力波探测^[1,2]、高分辨率光谱学^[3]、高精度原子钟研制^[4,5]以及时间频率传递等^[6]领域有着重要应用. 在目前传递精度最高的光纤时间频率传递领域, 通信波段窄线宽激光器是实现超远距离超高精度光学频率传递的重要保证. 目前商用通信波段激光器的线宽最小为百Hz量级, 不能满足频率传递的要求, 因此需要研制具有超高稳定度的通信波段窄线宽激光器.

在通信波段窄线宽激光研制方面, 国内外研究小组不断取得突破. 2012年美国JILA实验室将长度为210 mm的单晶硅参考腔置于温度为124 K的工作环境中, 将中心波长为1.5 μm 的光纤激光器

线宽压窄到约40 mHz^[7]. 国内华东师范大学、中国计量院、中科院武汉数物所、华中科大、中科院国家授时中心等单位开展了窄线宽激光器方面的研究. 在1.5 μm 通信波段, 中国计量院2012年采用外部光反馈技术将两台中心波长为1550 nm的半导体激光器锁定到同一个光学参考腔上, 通过拍频测得激光的线宽约4.4 Hz^[8], 但该结果不包含参考腔的贡献. 2013年采用PDH稳频技术将中心波长为1542 nm的光纤激光器秒级稳定度提高到 3×10^{-13} ^[9].

本文以1550.12 nm商用光纤激光器(NKT Koheras E15)作为光源, 采用10 cm长的超低膨胀系数玻璃(ULE)参考腔作为频率参考, 通过激光器内部压电陶瓷PZT和外部声光频移器AOM相结合的控制方式实现了激光器线宽压窄. 为了评估激光稳频效果, 实验中我们利用声光频移器将第

* 国家自然科学基金委重大科研仪器设备研制专项(批准号: 61127901)、国家自然科学基金(批准号: 11273024, 61025023)、国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11403031)、中组部“青年拔尖人才支持计划”项目(批准号: 组厅字[2013]33号)、中科院科技创新“交叉与合作团队”项目(批准号: 中科院人教字(2012)119号)和中国科学院重点部署项目(批准号: KJZD-EW-W02)资助的课题.

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

‡ 通信作者. E-mail: taoliu@ntsc.ac.cn

独立光源, 直接利用了第一套窄线宽激光的输出光作为光源, 激光频率控制器件仅利用了声光调制器AOM2.

实验中采用的两台光学参考腔结构与安装方式基本一致, 腔体与腔镜材料均为超低膨胀玻璃 (ultra-low expansion glass, ULE), 腔长约 100 mm, 外径约 100 mm, 放置在真空度约为 5×10^{-7} Pa 的真空腔室中. 经有限元分析, 参考腔最佳支撑点处震动敏感度为 $2 \times 10^{-11}/g$. 其中, CAV1 及相关光学系统放置在隔离度约 20 dB 的商用主动隔振台上, 并对参考腔采用单点测温、缠绕加热丝的办法进行了温度控制, 温度稳定度约 10 mK. 由于条件限制, CAV2 及光学系统置于光学面包板上, 未作主动隔振及控温.

3 实验结果及分析

窄线宽激光系统的频率稳定性主要由频率参考源和频率控制系统决定. 因此, 为了评估窄线宽激光系统的稳频能力, 本文首先对第一套窄线宽激光系统中自制的频率伺服系统控制带宽进行了测量评估. 其次, 测量了两个参考腔的精细度, 针对两个参考腔的工作方式, 采用了不同方法进行了测量. 再次, 对两套窄线宽激光系统间传递光纤引入的噪声而导致激光线宽的展宽进行了测量. 最后, 通过对第二套窄线宽激光的频率控制信号直接测量获得了激光线宽及频率稳定度.

3.1 激光频率伺服系统

实验中, 我们通过对激光器压电陶瓷 PZT 和外部声光调制器 AOM 的伺服控制, 实现了较好的频率锁定. 但受器件限制, PZT 主要实现 < 10 kHz 的低频噪声抑制, AOM 可以实现百 kHz 量级的高频噪声抑制. 首先仅利用 PZT 实现锁定, 再利用 PZT 和 AOM 共同实现窄线宽激光系统的锁定. 在两种状态下通过动态信号分析仪 SR785 测量对应的误差信号电压噪声谱, 利用测定的频率电压转换系数将其换算成频率噪声谱. 具体的测量结果如图 2 所示, 可以看出仅用 PZT 锁定时, 3.5 kHz 以内的频率噪声得到明显抑制; 当同时利用 PZT 和 AOM 共同锁定时, 50 kHz 以内的噪声得到更明显的抑制, 低频噪声也较仅 PZT 锁定时降低了近 20 dB. 由此可见, AOM 对扩展控制带宽的贡献较为明显. 此外, 图中 50 Hz 及其高次谐波主要来自测试系统电源噪声. 综上, 我们窄线宽激光系统的

频率伺服控制系统对 50 kHz 以下的噪声有着很好的抑制能力, 从而为实现窄线宽激光提供了有力保证.

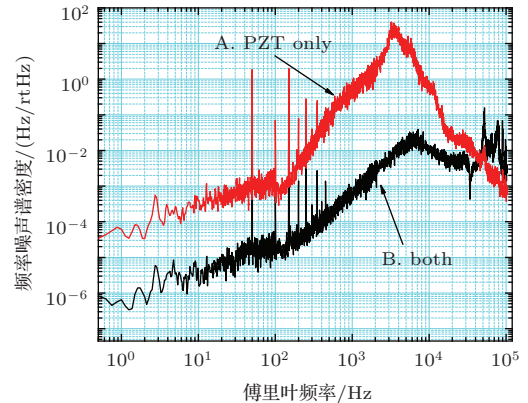


图2 (网刊彩色) A. 仅 PZT/B. PZT 和 AOM 同时锁定时误差信号的频率噪声谱

Fig. 2. (color online) Frequency noise PSD of the error signal when the laser is locked by PZT only (A) and both methods (B).

3.2 光学参考腔精细度测量

由于光学参考腔的精细度是反映参考腔鉴频能力以及最终锁频结果的重要指标, 实验中有必要对光学参考腔的精细度进行准确测量. 光学参考腔的精细度与腔镜反射率、腔线宽以及腔内光子平均寿命等实验参数关系式^[10]为

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} = \frac{\Delta\nu_{\text{FSR}}}{\Delta\nu_c} = 2\pi\tau \cdot \Delta\nu_{\text{FSR}}, \quad (1)$$

其中, $\Delta\nu_{\text{FSR}}$ 为光学参考腔的自由光谱区, 且 $\Delta\nu_{\text{FSR}} = c/2nL$, $\Delta\nu_c$ 为光学参考腔腔线宽, R 为腔镜反射率, τ 为光学参考腔内光子平均寿命, 实验中使用的光学参考腔腔长 $L = 10$ cm, 对应自由光谱区 $\Delta\nu_{\text{FSR}} = 1.5$ GHz.

首先, 通过测量腔内平均光子寿命得到光学参考腔 CAV1 的精细度. 实验中, 将激光锁定到参考腔 CAV1 上, 然后用声光开关 AOM1 关断 CAV1 入射光, 同时利用快速光电探测器测量参考腔透射光信号, 测量结果如图 3 (a) 所示. 由于光电探测器时延可能是影响光子寿命测量的主要干扰因素, 实验中还测量了探测器响应曲线, 测量结果如图 3 (b) 所示, 其中, 光电探测器响应时间为 0.7 μs , 远小于光子衰荡时间, 可以忽略不计. 利用 e 指数衰减函数拟合透射光信号得到平均光子寿命为 36.5 μs , 对应的光学参考腔 CAV1 精细度为 344000.

对于参考腔 CAV2, 我们通过测量参考腔的线宽得到腔精细度. 实验中, 首先将激光频率锁定到

参考腔 CAV1, 再通过声光调制器 AOM2 将激光移频后注入光学参考腔 CAV2, 并与之共振. 在 CAV2 共振点处, 通过快速线性扫描 AOM2 的驱动信号源 RF2 的输出频率, 采用低噪声光电探测器测量参考腔透射峰信号, 得到的测量结果如图 4 所示, 频率扫描范围为 50 kHz, 利用洛伦兹拟合得到参考腔线宽 5.06 kHz, 对应的腔精细度为 296000. 与 CAV1 的测量结果相比, 两套光学参考腔精细度测量结果较为一致, 在其他实验条件一致的条件下, 两台窄线宽激光器的频率稳定度也应较为接近.

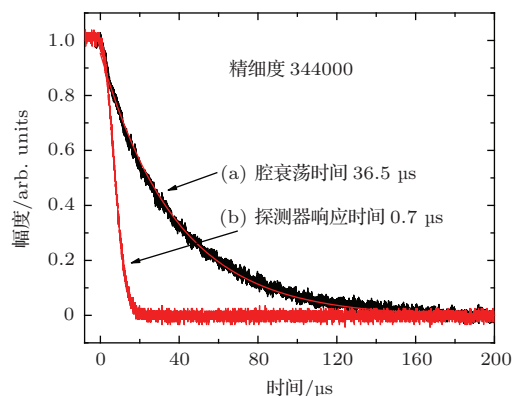


图 3 (网刊彩色) (a) 光学参考腔透射光衰减信号; (b) 探测器响应时间

Fig. 3. (color online) (a) Ring-down signal of the cavity transmission; (b) response time of photodetector.

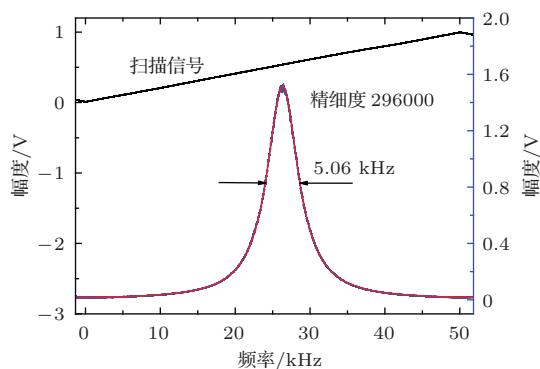


图 4 (网刊彩色) 参考腔线宽测量

Fig. 4. (color online) Measurement of cavity linewidth.

3.3 光纤噪声测量

如图 1 所示, 将锁定于参考腔 CAV1 上的窄线宽激光通过一根长 5 m、直径 0.9 mm 的单模光纤导入 CAV2, 该段光纤受外界气流与震动影响, 引入了一定的相位噪声, 等效于激光线宽的展宽. 实验中利用参考光比对的办法对光纤导致激光线宽的展宽进行了测量. 利用动态信号分析仪 SR785 测量得到的结果如图 5 所示. 为方便, 图中将信号

中心频率从 280.014799 MHz (约两参考腔之间的共振频率差) 移至 0 Hz. 利用洛伦兹拟合, 得到光纤传递导致的激光线宽展宽为 0.27 Hz.

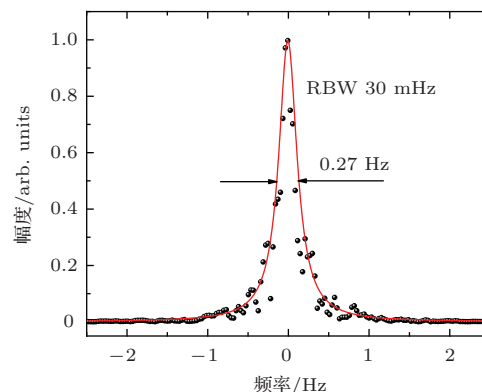


图 5 (网刊彩色) 光纤传递光拍频测量结果

Fig. 5. (color online) Beat-note measurement of fiber noise.

3.4 窄线宽激光器线宽以及频率稳定度评估

如图 1 所示, 与传统利用两台激光拍频获得激光线宽及频率稳定度的方法不同, 本文通过分析第二套窄线宽激光的频率控制信号, 获得激光的线宽及频率稳定度 [11]. 实验中, 首先将激光器锁定到参考腔 CAV1 上, 将第一套窄线宽激光的输出激光通过光纤传递到第二套参考腔 CAV2 处. 利用声光调制器 AOM2 补偿 CAV1 与 CAV2 之间的共振频率差, 并通过动态调节 AOM2 的衍射频率将其一级衍射光频率锁定到 CAV2 共振频率上. 在忽略光纤噪声的前提下, AOM2 衍射频率的变化等于两套窄线宽激光的频率差值. 因此, 测量该声光调制器的射频驱动频率等效于两激光间的拍频.

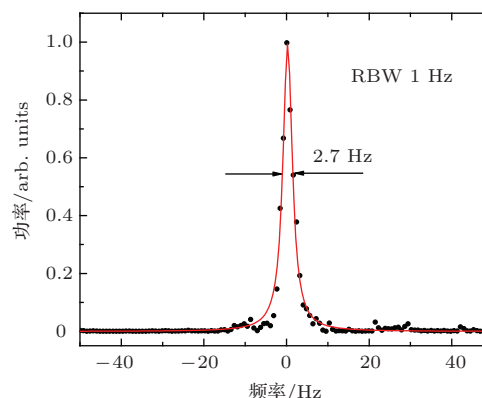


图 6 (网刊彩色) 稳频激光控制信号噪声功率谱

Fig. 6. (color online) Noise spectrum of laser frequency control signal.

实验中, 在两套激光锁定后, 将 AOM2 射频驱动信号源的输出信号分出一路连接到频谱分析仪

罗德施瓦茨 FSC3 以及频率计数器安捷伦 53230 A, 通过频谱分析仪测得结果如图 6 所示. 为方便, 图中将信号中心频率从 280.014799 MHz 移至 0 Hz 处. 通过洛伦兹拟合得到信号线宽约为 2.7 Hz. 如两台激光系统频率稳定度相当, 则单台激光线宽为 1.9 Hz. 利用频率计数器测量 AOM2 射频驱动信号源的输出信号, 去除线性漂移后, 经阿伦方差处理计算, 其秒级稳定度 2.5×10^{-14} , 输出信号频率稳定度如图 7 所示. 如两台激光系统性能一致, 则单台激光的秒级稳定度为 1.7×10^{-14} .

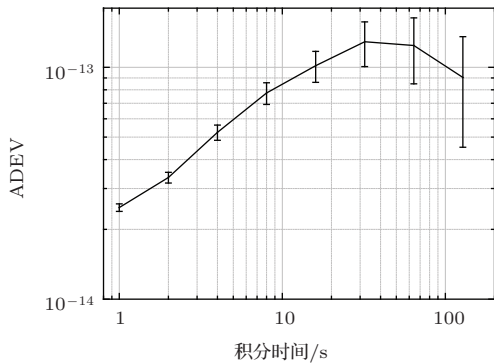


图 7 (网刊彩色) 激光频率稳定度曲线

Fig. 7. (color online) Relative Allan deviation of laser frequency.

由图 7 可以看出, 激光频率中长期稳定度逐渐恶化, 分析可能是由于以下原因: 光学参考腔 CAV2 直接放置在光学面包板上, 没有采用主动隔振, 也未采取温度控制措施; 实验室温度不够稳定, 十几分钟内周期性起伏可达 1°C , 导致系统中波片等器件引入了较大的锁定点漂移; 两套窄线宽激光间的短光纤引入了一定的频率噪声. 下一步拟对光学参考腔采取隔音隔振控温等措施, 降低中长期漂移; 此外还将进一步降低光纤噪声, 并提高激光频率反馈控制能力.

3.5 窄线宽激光在光学频率传递中的应用

在基于光纤的光学频率传递中, 各种环境因素, 如温度和振动等, 会使传输光场的相位产生波动, 等效于激光的频率噪声, 为了补偿光纤传输链路的相位噪声, 1994 年 Ma 等提出了多普勒噪声抑制的方法 [12]. 光纤相位噪声的测量主要基于相干探测技术. 特别是在千公里级远程传递中, 光源的相干性对光纤噪声的准确测量以及光纤噪声的有效抑制至关重要. 实验中, 将自主研发的窄线宽激光器应用于光学频率传递, 替代了商用光纤激光器, 光学频率传输链路的频率传递稳定度有了较大提高.

光纤光学频率传递原理如图 8 所示, 首先将激光分为两束, 一束光作为参考光, 另一束光经过相位补偿器件后通过光纤到达远端, 远端的一部分光被反射并原路返回, 与本地端的参考光进行拍频比对. 通过伺服控制系统处理后, 利用相位补偿器件补偿传递链路引入的相位噪声. 通常, 将远端输出光与本地参考光拍频比对, 可以实现光纤光学频率传递精度的评估.

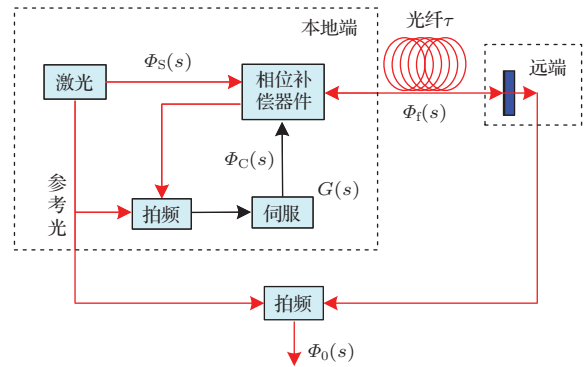


图 8 (网刊彩色) 光纤光学频率传递的原理示意图 ($\Phi_s(s)$, 激光相位噪声; $\Phi_c(s)$, 环路相位噪声补偿; $\Phi_0(s)$, 传递链路相位噪声; τ , 传递光在光纤中的延迟时间; $\Phi_f(s)$, 传递链路在 τ 时间时的相位噪声; $G(s)$, 传递环路相位噪声的传递函数)

Fig. 8. (color online) Principle of optical frequency transfer via optical fiber. ($\Phi_s(s)$, laser phase noise; $\Phi_c(s)$, loop phase noise compensation; $\Phi_0(s)$, phase noise of transfer link; τ , delay time of transmitted light in the fiber; $\Phi_f(s)$, phase noise of transfer link at τ ; $G(s)$, transfer function of transmitting loop phase noise).

理想情况下, 光纤传递链路引入的相位噪声 $\Phi_f(s) = 0$, 可得到传递环路相位噪声的传递函数 $G(s) = 0$, 则光源相位噪声与光纤光学频率传递链路相位噪声的关系如 (2) 式所示 [6]:

$$\Phi_0(s) = (1 - e^{-\tau s})\Phi_s(s). \quad (2)$$

从 (2) 式可以看出, 在传递光纤长度一定时, 光纤光学传递链路导致的相位噪声与激光光源的相位噪声成正比. 因此, 研制具有较低相位噪声的窄线宽激光器对提高光学频率的传递精度有着重要意义.

基于光纤的光学频率传递实验系统与文献 [13] 中类似, 这里不再赘述细节. 实验测量结果如图 9 所示, 首先采用商用光纤激光器作为传递光源时, 在 50 km 实验室光纤上实现闭环锁定, 利用安捷伦 53230A 频率计数器在自动模式下测得, 光纤光学频率传递的秒级稳定度为 2.4×10^{-16} . 将传递光源更换为自主研发的 Hz 量级窄线宽激光器后, 同等条件下测得的秒级稳定度为 7.5×10^{-17} , 传递稳定度提高了 3.2 倍. 相关实验结果在其他文章中具体介绍.

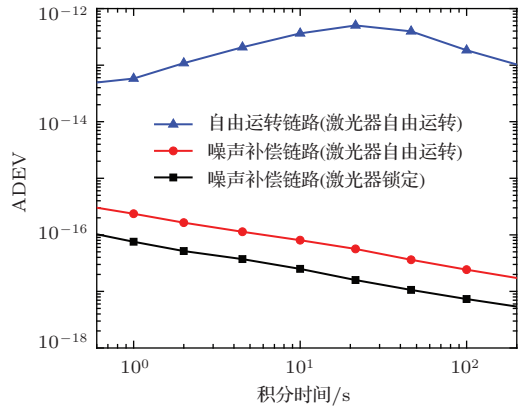


图9 (网刊彩色) 50 km 光纤盘频率传递稳定度 (ADEV)
 Fig. 9. (color online) Transfer stability (ADEV) of optical frequency transfer via 50 km fiber spool.

4 结 论

本文介绍了国家授时中心通信波段超窄线宽激光器的研制进展及其在基于光纤的光学频率传递中的初步应用. 实验中利用一台激光光源分别锁定到两个性能相近的光学参考腔上, 锁定后通过对第二套窄线宽激光的频率控制信号测量, 得到单台激光线宽优于 1.9 Hz, 秒级稳定度优于 1.7×10^{-14} , 优于国内同类报道. 将研制的超窄线宽激光器用于光纤光学频率传递, 在 50 km 实验室光纤盘上实现了 $7.5 \times 10^{-17}/s$ 的传递稳定度, 较采用商用光纤激光器提高 3.2 倍. 文中还对窄线宽激光系统及测量结果的主要影响因素进行了测试分析, 并对下一步工作提出改进意见.

参考文献

- [1] Harry G M, Armandula H, Black E, Crooks D R M, Cagnoli G, Hough J, Murray P, Reid S, Rowan S, Sneddon P, Fejer M M, Route R, Penn S D 2006 *Appl. Opt.* **45** 1569
- [2] Willke B, Danzmann K, Frede M, King P, Kracht D, Kwee P, Puncken O, Savage R L, Schulz B, Seifert F, Veltkamp C, Wagner S, We els P, Winkelmann L 2008 *Class. Quantum Grav.* **25** 114040
- [3] Rafac R J, Young B C, Beall J A, Itano W M, Wineland D J, Bergquist J C 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2462
- [4] Boyd M M, Zelevinsky T, Ludlow A D, Foreman S M, Blatt S, Ido T, Ye J 2006 *Science* **314** 1430
- [5] Weyers S, Lipphardt B, Schnatz H 2009 *Phys. Rev. A* **79** 031803
- [6] Jiang H F 2010 *Ph. D. Dissertation* (France: University Pairs 13)
- [7] Kessler T, Hagemann C, Grebing C, Legero T, Sterr U, Riehle F, Martin M J, Chen L, Ye J 2012 *Nat. Photon.* **6** 687
- [8] Zhao Y, Wang Q, Meng F, Lin Y G, Wang S K, Li Y, Lin B K, Cao S Y, Cao J P, Fang Z J, Li T C, Zang E J 2012 *Opt. Lett.* **37** 4729
- [9] Suo R, Meng F, Fang F, Li T C 2013 *The 4th China Satellite Navigation Conference* Wuhan, China, May 15-17, 2013 p141
- [10] Black E D 2001 *Am. J. Phys.* **69** 79
- [11] Jiang Y Y 2012 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: East China Normal University) (in Chinese) [蒋燕义 2012 华东师范大学博士论文 (上海: 华东师范大学)]
- [12] Ma L S, Jungner P, Ye J, Hall J L 1994 *Opt. Lett.* **19** 1777
- [13] Liu J, Gao J, Xu G J, Jiao D D, Yan L L, Dong R F, Jiang H F, Liu T, Zhang S G 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 120602 (in Chinese) [刘杰, 高静, 许冠军, 焦东东, 闫露露, 董瑞芳, 刘涛, 张首刚 2015 物理学报 **64** 120602]

Development and application of communication band narrow linewidth lasers*

Jiao Dong-Dong¹⁾²⁾³⁾ Gao Jing¹⁾³⁾ Liu Jie¹⁾²⁾³⁾ Deng Xue¹⁾³⁾ Xu Guan-Jun¹⁾³⁾
 Chen Jiu-Peng¹⁾²⁾³⁾ Dong Rui-Fang¹⁾³⁾† Liu Tao¹⁾³⁾‡ Zhang Shou-Gang¹⁾³⁾

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

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

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

(Received 22 March 2015; revised manuscript received 12 May 2015)

Abstract

Ultra-stable lasers at optical communication wavelengths have important applications in developing optical frequency transfer via optical fibers. We report the recent development of a 1550 nm stable laser system built at National Time Service Center and its preliminary application in optical frequency transfer via laboratory fibers.

In the experiment, the conventional Pound-Drever-Hall(PDH) frequency stabilization technology is implemented to achieve the ultra-stable laser at the wavelength of 1550 nm. The output of a single laser source is split and locked onto the resonant frequency of two independent reference cavities, of 344000 and 296000 respectively. The frequency of the laser source is actively stabilized to the first reference cavity by piezo and external frequency shifters simultaneously and the total control bandwidth is measured to be 50 kHz. Then the laser frequency is shifted and stabilized to the second reference cavity by an acousto-optical modulator. A 5 m long single-mode fiber is used to bring the first laser beam to the second reference cavity which unfortunately induces unexpected phase noise by environmental distortions. The laser linewidth broadened is determined to be 0.27 Hz by the beat note measurement between the input and output beams of the fiber. To evaluate the frequency stability of the laser, the frequency control signal within the control bandwidth of the second stable laser system is analyzed by a spectrum analyzer and a frequency counter. The control signal shows a Lorentz linewidth of 2.7 Hz and a frequency stability of $2.5 \times 10^{-14}/s$, corresponding to a single laser linewidth of 1.9 Hz with a frequency stability of $1.7 \times 10^{-14}/s$ if the two stable lasers have similar frequency stability.

Applying this ultra-stable laser system as the laser source for the fiber-based optical frequency transfer, a short-term frequency transfer stability of $7.5 \times 10^{-17}/s$ is demonstrated through a 50 km-long fiber spool, while a frequency transfer stability of $2.4 \times 10^{-16}/s$ is achieved by a similar setup except that the laser source is a kHz-level linewidth laser. In the experiment an Agilent 53232 A frequency counter is applied to record the beat note signal in the auto mode.

In the end, we discuss the possible improvements of the stable laser system, including the miniaturization of the optical setup, optimization of the control bandwidth and shortening of the response time of control loop.

Keywords: time and frequency, narrow linewidth laser, fiber optical frequency transfer

PACS: 06.30.Ft, 42.60.Mi, 42.62.Eh

DOI: 10.7498/aps.64.190601

* Project supported by the Major Scientific Instruments and National Development Funding Projects of China (Grant No. 61127901), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11273024, 61025023), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11403031), the Fund from the First "Youth Top-Notch Talent" Program of Organization Department of the CPC Central Committee (Grant No. [2013]33), the Fund for the "Cross and Cooperative" Science and Technology Innovation Team Project of the CAS, China (Grant No. (2012)119), and the Key Deployment Project of the Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. KJZD-EW-W02).

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

‡ Corresponding author. E-mail: taoliu@ntsc.ac.cn