

激光与光电子学进展

基于超冷铷原子的双波长激光光纤相位噪声抑制

廖文敏, 张思慧, 段玉青, 王杰*, 武海斌

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200241

摘要 以超冷铷原子系统冷却光的基频光作为探测光, 主动补偿激发铷原子赫兹线宽能级跃迁的激光在光纤传输中引入的附加相位噪声。在不影响原有被传输亚赫兹线宽激光(1299 nm)的情况下, 将相近波长的宽线宽基频光(1166 nm)从光纤输出端反向注入, 实施外差拍频探测并主动反馈补偿。当两个波长激光的光纤传输噪声基本一致时, 可极大地抑制亚赫兹线宽激光在光纤传输中由于温度和振动等因素引起的各种相位噪声。主动补偿后传输激光的线宽从锁定前的 14.6 Hz 压窄到锁定后的 11.6 mHz, 光频传输的 1000 s 稳定度从 1.6×10^{-16} 提升到 6.5×10^{-19} , 满足当前最高精度和稳定度光钟的光频传输需求。所发展的光频传送方案可作为被传输激光器功率不足或空间受限时的替代方案, 也可用在单点对多点近距离传输网络中简化源端发送装置。

关键词 光纤链路; 光纤相位噪声; 窄线宽; 相位噪声抑制; 光钟

中图分类号 TN929.11; O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231135

Dual-Wavelength Laser Fiber Phase Noise Suppression Based on Ultra-Cold Erbium Atoms

Liao Wenmin, Zhang Sihui, Duan Yuqing, Wang Jie*, Wu Haibin

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract The additional phase noise of a sub-Hz linewidth laser transmitted in the fiber to excite the Hz-linewidth transition of erbium is actively compensated for using the fundamental laser of the cooling laser in the ultracold erbium atom system. To perform heterodyne beat detection and implement the compensation feedback without affecting the power of the original sub-Hz linewidth laser (1299 nm), we injecte the broad-linewidth fundamental laser of the cooling light at a similar wavelength (1166 nm) from the output end of the fiber. The phase noise of the narrow-linewidth laser caused by temperature and vibration in fiber transmission is suppressed when the noise of the two lasers is almost the same. The linewidth of the beat frequency signal of the transmitted laser is narrowed from 14.6 Hz to 11.6 mHz and the stability of the optical-frequency transmission link is improved from 1.6×10^{-16} to 6.5×10^{-19} in 1000 s, meeting the optical-frequency transfer needs of a start-of-the-art optical clock. This optical-frequency transfer scheme can be used as an alternative where the power of the transmitted laser is insufficient or physical space is limited. The scheme is also applicable for simplifying the source setup on branching optical-fiber networks.

Key words fiber link; fiber phase noise; narrow linewidth; phase noise suppression; optical clock

1 引言

近年来镧系金属因其在时间频率基准、光钟^[1-4]、偶极量子气体^[5]、新奇物理相变^[6]等方面的研究受到广泛关注。铷原子最外层有两个电子, 未满足的内壳层使其跃迁能级极其丰富^[7], 其自然线宽范围从几十 μ Hz 到几十 MHz 不等。相关研究表明, 铷原子具有超窄线宽能级, 其在光学频率基准方面具有潜在应用价值^[8], 是继铯、镱等中性原子光钟^[9-11]外的具有竞争力的光钟

原子选择。美国国家标准与技术研究院(NIST)Ban等^[12]于2005年在理论上预测铷原子1299 nm跃迁的自然线宽为2.1 Hz。2021年, Patscheider等^[13]通过测量上能级寿命, 得到铷原子1299 nm的线宽约为0.9 Hz。Hz量级的1299 nm窄线宽跃迁使得铷原子在光学频率基准方面具有潜在应用价值, 且与其他的窄跃迁波长相比, 其波长处于光纤通信波段窗口, 更适合在现有光纤通信网络中传输。

基于原子或离子的窄线宽跃迁, 目前国际上实现的

收稿日期: 2023-04-21; 修回日期: 2023-04-27; 录用日期: 2023-05-06; 网络首发日期: 2023-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(11925401, 11734008)、国家自然科学基金青年基金(12104158)

通信作者: *jwang@lps.ecnu.edu.cn

最高精度的光钟不确定度优于 10^{-18} 量级,并且有望成为下一代时间频率基准,在计量学、基础物理研究、空间科学、大地测量等领域发挥重要作用。NIST 的铝离子光钟和镱原子光钟的不确定度分别为 0.94×10^{-18} ^[14] 和 1.4×10^{-18} ^[15],美国 joint institute for laboratory astrophysics (JILA) 的锶光钟不确定度为 2.0×10^{-18} ^[16]。不同光钟的频率对比不确定度最高达到 5.9×10^{-18} ^[17],光钟系统的最高稳定度达到 5×10^{-19} (积分时间 $\tau=3600$ s)^[18] 和 3.2×10^{-19} (积分时间 $\tau=220000$ s)^[15]。世界各国科学家正在将光钟的不确定度和稳定度逐步推向更高水平,同时,为了将光钟扩展到光频对比等实际应用,高精度的光学分频器和高稳定度的光频传送也必不可少,而且其指标应优于上述水平,从而最大程度发挥当前光钟的性能。在光学分频器或光学频率合成方面,目前的光学分频精度已达到 10^{-21} ^[19]。

光频传送链路方面,主要有自由空间传送和光纤传送两种方式。在自由空间传送方面,2022 年中国科技大学实现了 113 km 自由空间时频传送以适应山区和星地网络等更苛刻的环境需求^[20]。在基于光纤的光频传输方面,国外实现了数百 km 到上千 km 的光频传送,最远在 2220 km 光纤上完成了稳定度为 7×10^{-17} (平均时间 30~200 s) 的光频比对^[21]。国内,2015 年,华东师范大学实现了 50 km 长的盘绕光纤稳定光学频率传输,频率秒级稳定度可达 2×10^{-17} ^[22]。同年,国家授时中心建立了 100 km 光纤的光学频率传递系统,秒级稳定度达到 5×10^{-15} ^[23]。2022 年,中国科学院精密测量科学与技术创新研究院波谱与原子分子物理国家重点实验室实现了 60 km 光纤链路中频率信号的高质

量传输,频率秒级稳定度达到 2.4×10^{-17} ^[24]。

除了长距离光频传输,在搭建冷原子窄线宽光谱精密测量或光钟相关实验系统时,由于整个系统庞大复杂,通常需要使用光纤将窄线宽激光传输至超稳腔、光学频率梳和冷原子系统等多个平台^[25-27]。光纤的等效长度及折射率容易受到环境因素(振动、温度、气流等)的影响,即使是几 m 到十几 m 的光纤,其相位噪声也是需要考虑的^[28-29]。同时,对于单点到多点的传输,很容易遇到窄线宽激光功率不足或空间受限的情况。

基于此,本文搭建超冷铯原子窄线宽光谱精密测量系统,其中,1299 nm 跃迁为赫兹量级窄线宽跃迁,1166 nm 为铯原子 583 nm 冷却光的基频光。为了抑制超稳窄线宽激光在光纤传输中引入的位相噪声并避免传统光纤噪声抑制系统的额外功率损耗和空间占用,采用相近波长的宽线宽单频激光(1166 nm)作为探测光,从光纤输出端反向注入,探测拍频信号并利用声光调制器(AOM)进行主动反馈补偿。由于两个波长激光共用同一组光纤和 AOM,在抑制 1166 nm 激光噪声的同时,也会将窄线宽激光(1299 nm)的光纤传输噪声抑制。该光频传送方案也可用在单点对多点近距离传输网络中简化源端发送装置。

2 基本原理

传统单波长光纤相位噪声抑制的原理如图 1(a) 所示,利用部分反射镜(PR)使激光在光纤中往返双程传输,并结合迈克尔孙干涉仪系统实现外差拍频,得到光纤传输过程中引入的相位噪声,利用 AOM 对激光进行相位补偿,从而实现光频信号的高质量传输。

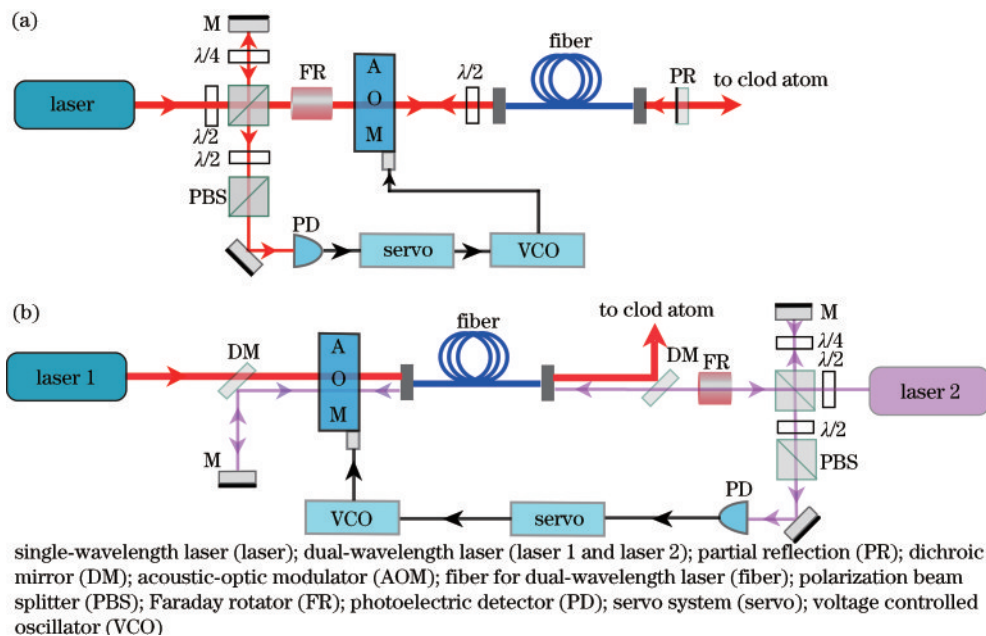


图 1 光纤相位噪声抑制系统的原理图。(a)传统单波长光纤相位噪声抑制系统的原理框图;(b)双波长光纤相位噪声抑制系统的原理框图

Fig. 1 Schematic of fiber phase noise suppression system. (a) Schematic of traditional single-wavelength fiber phase noise suppression system; (b) schematic of dual-wavelength fiber phase noise suppression system

基于传统单波长光纤相位噪声抑制的原理,发展了双波长光纤光频传递相位噪声抑制方法,如图 1(b)所示。laser 1 为窄线宽激光器,为抑制其在光纤传输中的相位噪声,引入另一波长的激光 laser 2,从光纤输出端反向注入,通过探测 laser 2 的外差拍频信号并实施相位补偿。

源端 2 (laser 2) 的出射光场为

$$E_0 = A_0 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad (1)$$

式中: ω 为激光频率; t 为时间; φ_1 为激光的初始相位。源端 2 发出的光经偏振分光棱镜 (PBS) 后分为两路,一路作为参考光,另一路传入输入光纤,其光场为

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1 + \varphi_f), \quad (2)$$

式中: φ_f 为光纤单程传输激光信号时引入的附加相位。激光经过 AOM 后,光场可表示为

$$E_2 = A_2 \cos(\omega t + \Delta + \varphi_1 + \varphi_f + \varphi_c), \quad (3)$$

式中: Δ 代表 AOM 的调制频率; φ_c 为调制相位。经过 laser 1 反射且 laser 2 透射的双色镜 (DM) 和 0° 反射镜后原路径返回与参考光拍频,由于激光在光纤中往返传输时速度极快且引入的附加相位与传输方向无关^[29],所以可认为双程传输中光纤引入的附加相位都为 φ_f 。因此,与光场为 $E_0 = A_0 \cos(\omega t + \varphi_1)$ 的参考光在光电探测器 (PD) 处拍频的光场可表示为

$$E_3 = A_3 \cos(\omega t + 2\Delta + \varphi_1 + 2\varphi_f + 2\varphi_c). \quad (4)$$

两束光拍频后的信号相位为 $2\varphi_f + 2\varphi_c$ 。因此为了消除光纤相位噪声 φ_f ,需要对 AOM 所提供的相位进行调制,即由伺服控制系统产生一个对应的相位 $-\varphi_c$,AOM 进行动态补偿,使 $2\varphi_f + 2\varphi_c = 0$,则 laser 2 传输引入的附加相位得到抑制。

当两个波长的光在光纤中相位噪声基本一致时,抑制 laser 2 相位噪声即等同于抑制 laser 1 的相位噪声,从而实现窄线宽激光 laser 1 的高质量传输。

3 实验

3.1 双波长光纤光频传递相位噪声抑制系统

双波长光纤光频传递相位噪声抑制系统实验装置示意图如图 2 所示,其中,1299 nm 为亚赫兹线宽激光 (Menlo Systems),对应于铷原子窄线宽能级跃迁,采用入射端为 FC/APC 出射端为 FC/UPC 的 8 m 单模保偏光纤 (Corning PM13-U25D) 将亚赫兹窄线宽激光传输至冷原子系统。1166 nm 的激光是铷原子 583 nm 冷却光的基频光 (Toptica SHG pro)^[30],用于光纤相位噪声的探测和反馈抑制,同一根光纤中 1166 nm 和 1299 nm 的光纤耦合效率均达到 75% 以上。为评估方案的可行性和锁定效果,也搭建了 1299 nm 的噪声探测和反馈系统,光路部分如图 2 虚线框所示,实际双波长反馈中省略该光路部分及相应测试电路,以简化源端光路装置。

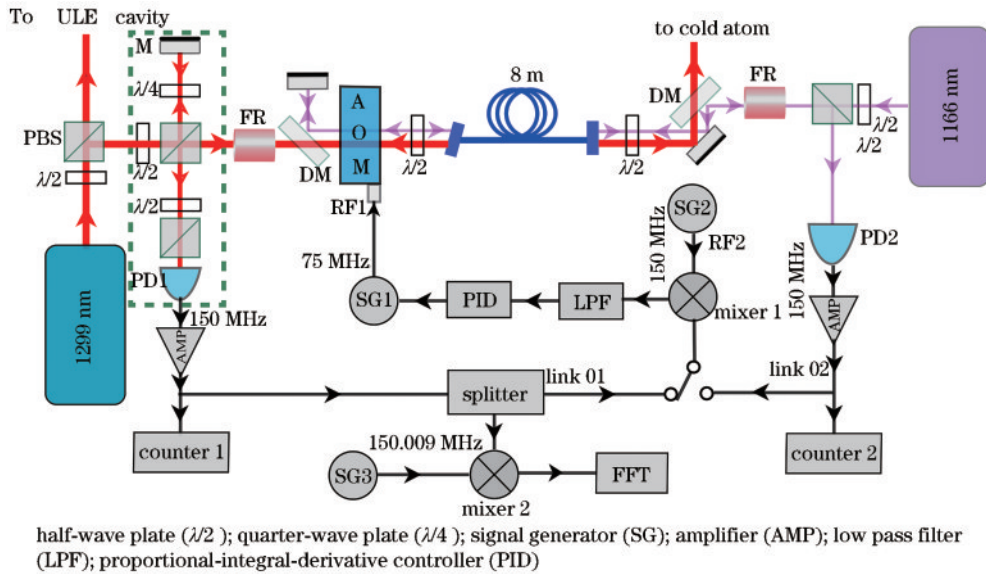


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental apparatus of the system

1299 nm 的激光经过 PBS 后较弱的反射光作为参考光,两次经过 $1/4$ 波片 ($\lambda/4$) 后进入 PD1,较强的透射光经过 FR、DM 和 AOM 后传入输入光纤。AOM 由信号发生器 SG1 驱动,驱动频率 RF1 为 75 MHz,负一级衍射光进入光纤后在 FC/UPC 端 (右端) 有 4% 的光按原路径返回,在 PD1 探测到包含相位噪声为 $2\varphi_f$ 、

中心频率为 150 MHz 的返回光与参考光的外差拍频信号。拍频信号放大后,分出一半功率经过 link 01 输入混频器 mixer 1,与信号发生器 SG2 产生的 150 MHz 信号混频得到误差信号。误差信号经过低频低通滤波 LPF 输入 PID,反馈至 AOM 驱动的频率调制端进行补偿,实现 $2\varphi_f + 2\varphi_c = 0$,从而抑制光纤所引入的相位

噪声。另一半信号输入 mixer 2, 与 150.009 MHz 的信号转换得到 9 kHz 低频信号, 输入动态信号分析仪 FFT(SR785)中测量线宽。

1166 nm 激光反向注入来进行光纤相位噪声探测和反馈补偿, 是双波长抑制系统的关键部分。1166 nm 的激光经过 FR 和 DM 后, 从光纤 FC/UPC 端进入。值得一提的是, 有 4% 的端面反射光原路径返回作为参考光, 因此不再需要额外搭建参考臂。大部分的 1166 nm 激光经光纤传输后经过 AOM、DM 后原路返回。PD2 探测得到参考光和引入光纤相位噪声的返回光的外差拍频信号, 经功率放大后通过 link 02 替换 link 01 完成反馈锁定。

实验中所有用到的信号发生器都以铷钟的 10 MHz 信号作为频率参考。另外, 为准确记录 PD 探测到的 150 MHz 拍频信号, 使用双平衡混频器将 PD1 和 PD2 探测的信号分别与另一信号发生器(图中未标出)输出的 107 MHz 信号混频, 各自得到 43 MHz 信号, 经过带

通滤波输入 Menlo Systems 自带的频率计数器 counter 1 和 counter 2 中, 评估光频传输的稳定度。

3.2 实验结果与分析

为了对比分析双波长相位噪声抑制系统的锁定结果, 分别采用 1299 nm(link 01)和 1166 nm(link 02)进行主动反馈补偿, 多次测量锁定前后被传输的 1299 nm 拍频信号的线宽。表 1 为 6 次测量锁定前后 1299 nm 的拍频信号线宽的平均值及标准差。采用 1299 nm 激光进行相位噪声探测和反馈锁定(即 link 01 连接)时, 锁定前后洛伦兹拟合得到的 1299 nm 外差拍信号线宽分别为 13.8(2.5) Hz 和 0.43(0.04) mHz。而用 1166 nm 双波长反馈链路 link 02 时, 锁定前后拟合得到的 1299 nm 外差拍信号线宽分别为 14.6(2.8) Hz 和 11.6(1.3) mHz, 其中, 一组典型的测量及其拟合结果如图 3 所示。实验结果表明, 两种锁定方式都可以将光纤引入的附加相位噪声从几十 Hz 压窄至 mHz 量级。从线宽角度看, 虽然采用 1166 nm 锁定的效果差于 1299 nm 激光锁定

表 1 6 次测量拍频信号线宽的平均值及标准差

Table 1 Average and standard deviation of beat frequency signal linewidth measured 6 times

Phase noise suppression system		Resolution bandwidth (RBW) of FFT	Linewidth	Standard deviation
1299 nm	Unlock	4 Hz	13.8 Hz	2.5 Hz
	Lock	0.2441 mHz	0.43 mHz	0.04 mHz
1166 nm	Unlock	4 Hz	14.6 Hz	2.8 Hz
	Lock	7.813 mHz	11.6 mHz	1.3 mHz

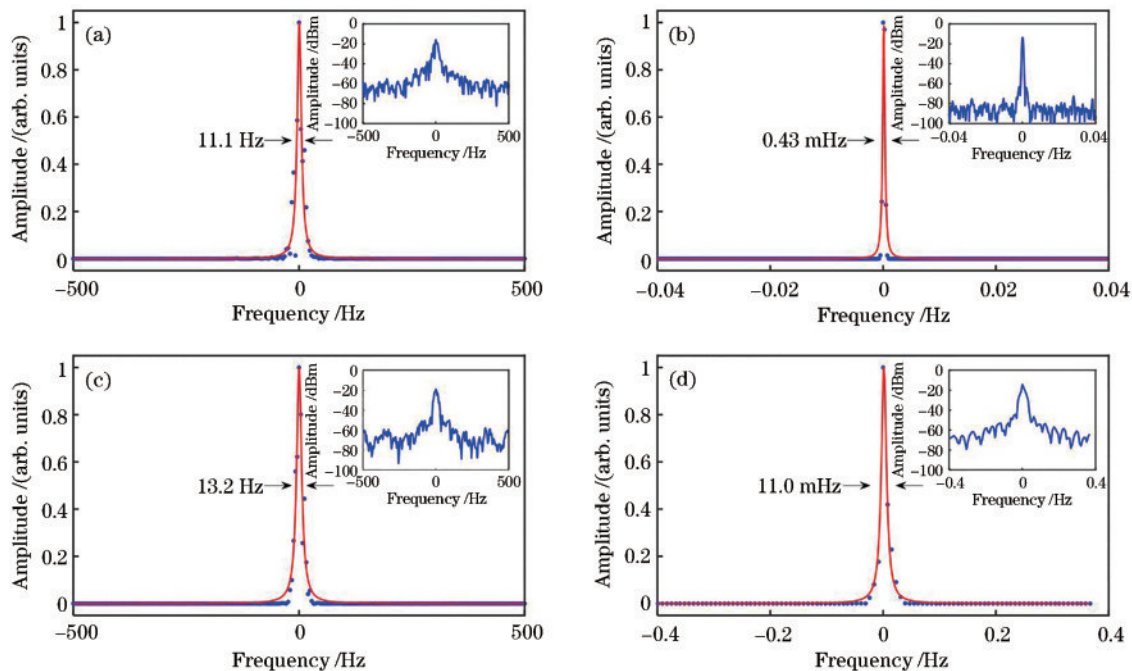


图 3 典型的光纤相位噪声抑制系统拍频信号线宽测试数据和洛伦兹拟合结果。(a)单波长相位噪声抑制系统锁定前;(b)单波长相位噪声抑制系统锁定后;(c)双波长相位噪声抑制系统锁定前;(d)双波长相位噪声抑制系统锁定后

Fig. 3 Typical linewidths and Lorentz fit results of beat signals of fiber phase noise suppression system. (a) Before locking the single-wavelength fiber phase noise suppression system; (b) after locking the single-wavelength fiber phase noise suppression system; (c) before locking the dual-wavelength fiber phase noise suppression system; (d) after locking the dual-wavelength fiber phase noise suppression system

效果,但仍然远远低于原子跃迁的自然线宽(2.1 Hz)和被传输激光器的线宽(0.8 Hz),可有效抑制光纤噪声引入的退相干和线宽展宽。

图 4 为光纤传输稳定性测试结果,频率计采样时间为 1 s,使用艾伦方差(ADEV)来表征测量结果。图 4 中线(1)、(2)分别对应使用 1299 nm 激光系统锁定前后光频传输的稳定性,秒级频率稳定度从 9.5×10^{-16} 提高到 1.4×10^{-16} ,千秒稳定度从 1.6×10^{-16} 提高到 1.3×10^{-19} 。当采用 1166 nm 激光系统锁定时,线(3)表示 1299 nm 激光光频的传输稳定度,秒级稳定度为 3.6×10^{-17} ,千秒级稳定度为 6.5×10^{-19} 。线(4)、(5)分别对应锁定前后 1166 nm 激光传输稳定性,秒级频率稳定度从锁定前的 9.5×10^{-16} 提高到锁定后的 3×10^{-17} ,千秒稳定度从锁定前的 2.8×10^{-16} 提高到锁定后的 3.1×10^{-20} 。为了更好地对比,将数据绘制成表格,具体如表 2 所示。其中,单一波长锁定时,(5)比(2)稳定性更高,可能原因是,1166 nm 激光的参考臂由光纤 FC/UPC 端反射所得,这部分光路与经过光纤和 AOM 返回的信号臂完全重合,参考臂光程中的空气扰动对信号臂造成相同影响,相互抵消,而 1299 nm 激光的参考臂与信号臂不完全重合,不共享的参考光路部分因空气扰动造成微小的相位差异。

就双波长光纤噪声抑制方案而言,其频率传输千秒稳定度 6.5×10^{-19} 略差于单波长噪声抑制的千秒

稳定度 1.3×10^{-19} ,这源自两个波长在光纤传输的色散差异,减小波长差距可进一步改善锁定系统。稳定度指标满足当前国际上最高稳定度光钟需求($9.8 \times 10^{-19}@1000 \text{ s}$)^[18]。另外,该测试的光路并未使用隔音罩隔离空气扰动,如采用隔音保温罩测试效果预期会更好^[31]。该光频传送方案也可用在单点对多点近距离传输网络中简化源端发送装置。相比于西澳大利亚大学提出的单点到多点传输^[32],本方案避免了同一波长的光在光纤中多次往返引起的干扰。

4 结 论

实现了一种基于超冷铷原子的双波长光纤光频传递的相位噪声抑制。与通常的用于亚赫兹激光传输的光纤相位噪声抑制技术不同,在不影响被传输窄线宽激光(1299 nm)传输功率的情况下,采用相近波长的宽线宽单频激光(1166 nm)从同一光纤输出端反向注入,探测携带有光纤相位噪声的拍频信号进而实施反馈补偿,抑制窄线宽激光的光纤传输噪声。窄线宽激光在 8 m 光纤传输时,锁定后的拍频信号线宽从 14.6 Hz 压窄到 11.6 mHz,频率传输秒级稳定度可达 3.6×10^{-17} ,千秒稳定度可以达到 6.5×10^{-19} 。光频传输指标优于最高精度光钟的不确定度(9.4×10^{-19})^[14]和光钟千秒稳定度(9.8×10^{-19})^[18],满足钟跃迁激光传输需求,证明了所提双波长光纤相位抑制系统的可行性。另外,用于光纤噪声抑制的参考光由光纤 FC/UPC 端(平头端)的端面反射获得,因此无需另外搭建参考臂。本方案可发展至其他被传输激光功率不足或空间受限的场合,也可用在单点对多点近距离传输网络中简化源端发送装置。进一步,若两束光的波长更加接近,减小色散差异,将得到最佳的抑制效果。

参 考 文 献

- [1] Hinkley N, Sherman J A, Phillips N B, et al. An atomic clock with 10^{-18} instability[J]. *Science*, 2013, 341(6151): 1215-1218.
- [2] Ludlow A D, Boyd M M, Ye J, et al. Optical Atomic Clocks[J]. *Review of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637-701.
- [3] Huntemann N, Sanner C, Lipphardt B, et al. Single-ion atomic clock with 3×10^{-18} systematic uncertainty[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 063001.
- [4] Porsev S G, Safronova U I, Safronova M S. Clock-related properties of Lu^+ [J]. *Physical Review A*, 2018, 98(2): 022509.
- [5] Norcia M A, Ferlaino F. Developments in atomic control using ultracold magnetic lanthanides[J]. *Nature Physics*, 2021, 17(12): 1349-1357.
- [6] Norcia M A, Politi C, Klaus L, et al. Two-dimensional supersolidity in a dipolar quantum gas[J]. *Nature*, 2021, 596(7872): 357-361.

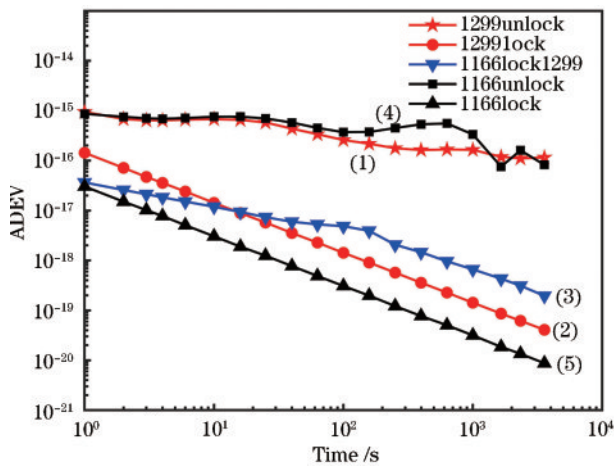


图 4 拍频信号的艾伦方差

Fig 4 Allan deviation of beat frequency signal

表 2 光频传输稳定性测试结果

Table 2 Test condition of frequency transmission stability

Item	Test condition	Stability (ADEV)	
		1 s	1000 s
(1)	Unlock _{1299 nm}	9.5×10^{-16}	1.6×10^{-16}
(2)	PD _{1299 nm} Lock _{1299 nm}	1.4×10^{-16}	1.3×10^{-19}
(3)	Lock _{1166 nm}	3.6×10^{-17}	6.5×10^{-19}
(4)	PD _{1166 nm} Unlock _{1166 nm}	9.5×10^{-16}	2.8×10^{-16}
(5)	PD _{1166 nm} Lock _{1166 nm}	3×10^{-17}	3.1×10^{-20}

- [7] Frisch A. Dipolar quantum gases of erbium[D]. Innsbruck: University of Innsbruck, 2014.
- [8] Kozlov A, Dzuba V A, Flambaum V V. Prospects of building optical atomic clocks using Er i or Er iii[J]. Physical Review A, 2013, 88(3): 032509.
- [9] Nemitz N, Ohkubo T, Takamoto M, et al. Frequency ratio of Yb and Sr clocks with 5×10^{-17} uncertainty at 150 seconds averaging time[J]. Nature Photonics, 2016, 10(4): 258-261.
- [10] Nicholson T L, Campbell S L, Hutson R B, et al. Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6896.
- [11] 卢晓同, 常宏. 光晶格原子钟研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(3): 0327004.
Lu X T, Chang H. Research progress of optical lattice atomic clock[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(3): 0327004.
- [12] Ban H Y, Jacka M, Hanssen J L, et al. Laser cooling transitions in atomic erbium[J]. Optics Express, 2005, 13(8): 3185-3195.
- [13] Patscheider A, Yang B, Natale G, et al. Observation of a narrow inner-shell orbital transition in atomic erbium at 1299 nm[J]. Physical Review Research, 2021, 3(3): 033256.
- [14] Brewer S M, Chen J S, Hankin A M, et al. $^{27}\text{Al}^+$ quantum-logic clock with a systematic uncertainty below 10^{-18} [J]. Physical Review Letters, 2019, 123(3): 033201.
- [15] McGrew W F, Zhang X, Fasano R J, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level[J]. Nature, 2018, 564(7734): 87-90.
- [16] Bothwell T, Kedar D, Oelker E, et al. JILA SrI optical lattice clock with uncertainty of 2.0×10^{-18} [J]. Metrologia, 2019, 56(6): 065004.
- [17] Beloy K, Bodine M I, Bothwell T, et al. Frequency ratio measurements at 18-digit accuracy using an optical clock network[J]. Nature, 2021, 591(7851): 564-569.
- [18] Campbell S L, Hutson R B, Marti G E, et al. A Fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock[J]. Science, 2017, 358(6359): 90-94.
- [19] Yao Y, Jiang Y Y, Yu H F, et al. Optical frequency divider with division uncertainty at the 10^{-21} level[J]. National Science Review, 2016, 3(4): 463-469.
- [20] Shen Q, Guan J Y, Ren J G, et al. Free-space dissemination of time and frequency with 10^{-19} instability over 113 km[J]. Nature, 2022, 610(7933): 661-666.
- [21] Schioppo M, Kronjäger J, Silva A, et al. Comparing ultrastable lasers at 7×10^{-17} fractional frequency instability through a 2220 km optical fibre network[J]. Nature Communications, 2022, 13: 212.
- [22] Ma C Q, Wu L F, Jiang Y Y, et al. Optical coherence transfer over 50-km spooled fiber with frequency instability of 2×10^{-17} at 1s[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(8): 084209.
- [23] 刘杰, 高静, 许冠军, 等. 基于光纤的光学频率传递研究[J]. 物理学报, 2015, 64(12): 120602.
Liu J, Gao J, Xu G J, et al. Research on optical frequency transfer based on optical fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(12): 120602.
- [24] 方鹏程, 蔡桢荻, 孙焕尧, 等. 60 km 实地光纤链路光频传输[J]. 光学学报, 2022, 42(23): 2306006.
Fang P C, Cai Z D, Sun H Y, et al. Optical frequency transmission of 60 km field optical fiber link[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(23): 2306006.
- [25] 王朝阳, 金尚忠, 李焯, 等. 基于光纤噪声抑制系统的 1.5 μm 超稳激光系统比对[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0404001.
Wang Z Y, Jin S Z, Li Y, et al. Comparison of 1.5 μm ultra-stable laser systems based on fiber noise suppression system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0404001.
- [26] Tai Z Y, Yan L L, Zhang Y Y, et al. Transportable 1555-nm ultra-stable laser with sub-0.185-Hz linewidth[J]. Chinese Physics Letters, 2017, 34(9): 090602.
- [27] 曹群, 邓雪, 臧琦, 等. 基于本地测量的双向光学相位比对方法[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0504004.
Cao Q, Deng X, Zang Q, et al. Bidirectional optical phase comparison method based on local measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0504004.
- [28] 徐永存. 光纤相位噪声对传输窄线宽激光的影响及抑制技术的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
Xu Y C. Study on the influence of fiber phase noise on the transmission of narrow linewidth laser and its suppression technology[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [29] Ma L S, Jungner P, Ye J, et al. Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path[J]. Optics Letters, 1994, 19(21): 1777-1779.
- [30] 徐萍, 张思慧, 宋瑞, 等. 基于碘分子调制转移谱与光学腔的 583 nm 激光稳频实验[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(23): 2314001.
Xu P, Zhang S H, Song R, et al. Frequency stabilization experiment of 583 nm laser based on iodine molecular modulation transfer spectrum and optical cavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(23): 2314001.
- [31] 王朝阳. 光纤传递光学频率标准信号的研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2017.
Wang Z Y. Study on the fiber transmission of optical frequency standard signal[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2017.
- [32] Schediwy S W, Gozzard D, Baldwin K G H, et al. High-precision optical-frequency dissemination on branching optical-fiber networks[J]. Optics Letters, 2013, 38(15): 2893-2896.