

基于光纤噪声抑制系统的 $1.5\ \mu\text{m}$ 超稳激光系统比对

王朝阳^{1,2}, 金尚忠¹, 李 焯^{2,3}, 林弋戈^{2*}, 方占军²

¹中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018;

²中国计量科学研究院时间频率计量研究所, 北京 100029;

³清华大学精密仪器系, 北京 100084

摘要 搭建了一套光纤相位噪声抑制系统。通过环外自拍频, 得到噪声本底的秒级频率稳定度为 6.8×10^{-18} , 2000 s 平均时间后达到 2.3×10^{-19} 。利用该系统可实现窄线宽激光频率在 1.6 km 实际光纤链路中的传输, 传输后环外自拍频信号的秒级频率稳定度可达 1.2×10^{-17} 。基于连接两个实验室的 808 m 实际光纤链路, 将此系统应用于 $1.5\ \mu\text{m}$ 超稳激光的比对, 通过拍频测量得到激光线宽为 (0.54 ± 0.15) Hz, 秒级频率稳定度为 1.2×10^{-15} 。

关键词 激光光学; 光纤相位噪声抑制; 超稳激光; 频率稳定度; 窄线宽

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0404001

Comparison of $1.5\ \mu\text{m}$ Ultra-Stable Laser Systems Based on Fiber Noise Suppression System

Wang Zhaoyang^{1,2}, Jin Shangzhong¹, Li Ye^{2,3}, Lin Yige², Fang Zhanjun²

¹College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

²Division of Time and Frequency, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

³Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract A fiber phase noise suppression system is built. By out-of-loop self-beat frequency, the noise floor of 6.8×10^{-18} is obtained in the average time of 1 s, and it falls down to 2.3×10^{-19} after the average time of 2000 s. The laser frequency with narrow linewidth is transferred in a 1.6 km fiber link when we use the proposed system, and the frequency stability of out-of-loop self-beat frequency signal is 1.2×10^{-17} in the average time of 1 s. Based on the 808 m fiber link which connects the two laboratories, the laser linewidth of (0.54 ± 0.15) Hz and the frequency stability of 1.2×10^{-15} in average time of 1 s can be obtained in beat frequency measurement when we apply the proposed system to the comparison of $1.5\ \mu\text{m}$ ultra-stable laser systems.

Key words laser optics; fiber phase noise suppression; ultra-stable laser; frequency stability; narrow linewidth

OCIS codes 060.3510; 140.3425; 120.4800

1 引 言

近年来, 基于离子或光晶格囚禁原子的光学频率标准得到了快速的发展, 目前最好的光学频率钟的频率不确定度已达到 10^{-18} 量级^[1-4]。在光钟系统和光学频率传递中, 窄线宽激光技术发挥的作用尤为重要^[5-10]。对于光钟系统, 窄线宽激光系统体积庞大, 且通常对环境条件的要求很高, 常被放置到独立的房间, 所以窄线宽激光需要通过光纤传输到物理系统附近, 或通过长距离光纤传输实现优质窄线宽频率信号的共享或异地

收稿日期: 2016-11-22; 收到修改稿日期: 2016-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(91336212, 91436104)、国家重点研发计划(2016YFF0200200)

作者简介: 王朝阳(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学频率信号传递方面的研究。E-mail: wzlw1991@163.com

导师简介: 金尚忠(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤测温、LED 照明和红外检测技术等方面的研究。

E-mail: jinsz@cjlu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: linyige@nim.ac.cn

比对。不同光钟体系的比对,同样需要光纤高质量传输窄线宽激光频率作为实验基础。

随着光通信技术的发展,光纤传递光学频率信号的能力得到大幅提升,因此可利用光纤传输窄线宽激光频率^[11-15]。外界因素的影响会使经过光纤传输后的窄线宽激光相位发生随机变化,且传输后激光的线宽增加,频率的稳定度变差,因此通常需要抑制传输过程中引入的噪声,以达到复现信号的目的。1994年, Ma等^[13]提出了一种光纤传输高稳定度光学频率信号的方法,将25 m长光纤的相位噪声产生的附加线宽控制在毫赫兹量级,实现了利用光纤传输高稳定度光学频率信号。2008年, Jiang等^[14]利用长度为86 km的城市光纤来传输具有亚赫兹线宽的1542 nm超稳激光,激光频率秒级稳定度可达到 1×10^{-16} 量级,实现了具有较高频率稳定度的激光远距离传输。2015年, Ma等^[15]利用实验室内长度为50 km的盘绕光纤传输波长为1556 nm的激光,光纤引入的频率秒级稳定度为 2×10^{-17} ,16 h后稳定度可达 8×10^{-20} 量级。实验中,光纤相位噪声抑制技术为光钟系统的比对和高稳定度光学频率信号的应用提供了极大的帮助。

为了确定超稳激光系统的性能指标,分析了抑制光纤相位噪声的基本原理,并基于中国计量科学研究院(NIM)昌平院区内两个实验室之间长度为808 m的实际光纤链路,建立了光纤相位噪声抑制系统,实现了不同实验室间的两套1.5 μm超稳激光系统的比对,为未来光钟系统的比对做技术准备。

2 基本原理

光纤相位噪声抑制系统的原理框图如图1所示,图中带箭头的虚线代表微波信号,带箭头的实线代表空间光信号;弯曲的实线代表光纤。

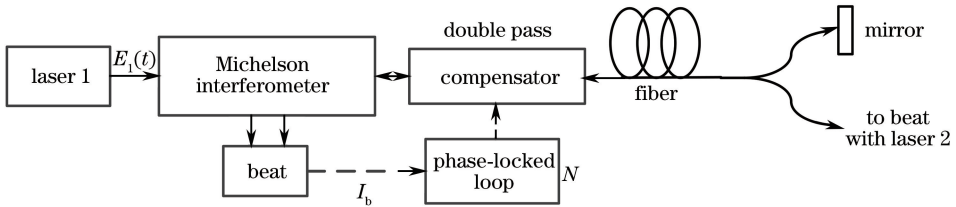


图1 光纤相位噪声抑制系统的原理框图

Fig. 1 Schematic of fiber phase noise suppressing system

激光器1输出的激光光场满足

$$E_1(t) \propto \cos(\Omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

式中 Ω 为激光频率, t 为时间, φ_0 为激光的初相位。激光器输出的激光通过迈克耳孙干涉仪系统分为两路激光,一路激光作为参考光,另一路激光经相位补偿器件后通过光纤传输。激光在光纤中传输时引入相位噪声 φ_f ,光纤末端的激光频率信号被分为两部分:一部分被反射镜返回,另一部分输出到远端与激光器2产生的激光进行拍频,可以认为激光频率在光纤中往返时产生的相位噪声相同^[13],即返回后得到的相位噪声为 $2\varphi_f$ 。此时,返回光再次被相位补偿器件调制后与参考光在光电探测器上进行拍频,拍频后的光强信号^[16]为

$$I_b \propto 1 + \cos(2\omega t + \Delta\varphi + 2\varphi_c + 2\varphi_f), \quad (2)$$

式中 ω 为调制信号的频率; $\Delta\varphi$ 为参考光与传输返回后激光的相位差,是一个固定值; φ_c 为调制相位。

微波信号 I_b 与标准频率源输出的信号 $V\cos(2\omega t)$ 混频后通过低通滤波器,得到的误差信号为

$$N \propto \Delta\varphi + 2\varphi_c + 2\varphi_f. \quad (3)$$

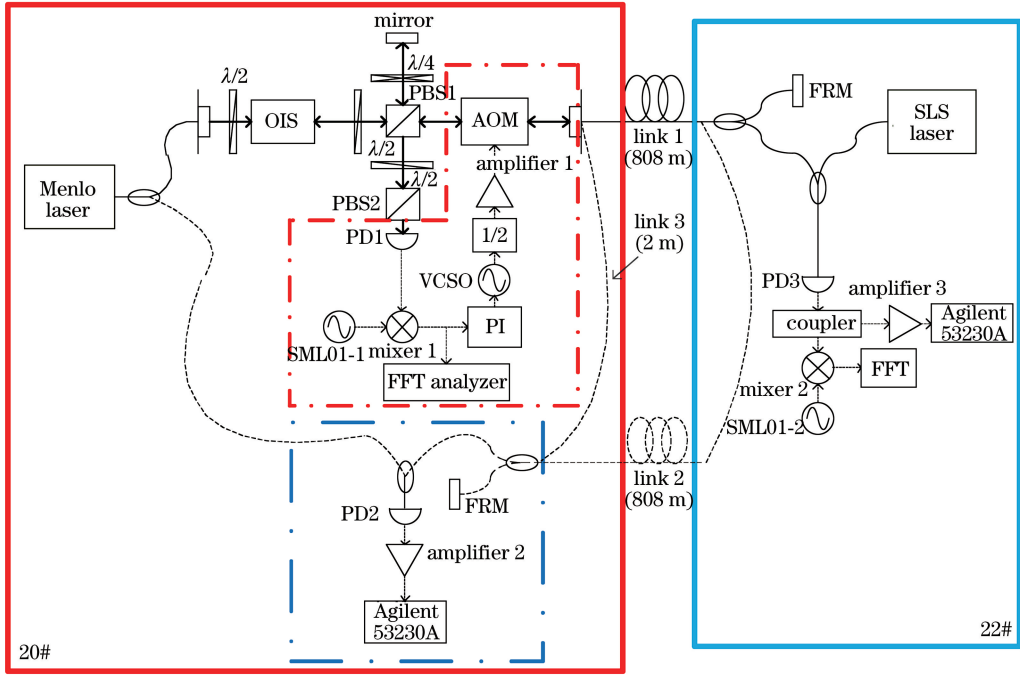
令 $2\varphi_c + 2\varphi_f = 0$,则光纤引入的相位噪声得到补偿,激光的相位差恒定且保持相干性,将相位信息反馈到相位补偿系统即可达到锁相的目的。

3 实验结果

3.1 光纤相位噪声抑制系统

两套超稳激光系统分别放置在NIM昌平院区的20、22号楼内的实验室,20号楼内的Menlo激光器附近搭建了光纤相位噪声抑制系统,两楼间已铺设两条平行的长度为808 m的单模通信光纤。搭建的光频传

输实验系统示意图如图 2 所示,图中带箭头的虚线代表微波信号,带箭头的实线代表空间光信号,弯曲的实线和虚线代表光纤,实线框分别为 20、22 号楼的实验室,Link 1 和 Link 2 为两条平行铺设的长度为 808 m 的单模通信光纤,Link 3 为一段长度约为 2 m 的短光纤。



OIS: optical isolator; PBS: polarization beam splitter; AOM: acousto-optical modulator; PD: photo detector; FFT: fast Fourier transform; PI: proportional-integral controller; VCSO: voltage-controlled surface acoustic wave oscillator; FRM: Faraday rotator mirror; 20#: laboratory of No. 20 building; 22#: laboratory of No. 22 building

图 2 光频传输实验系统示意图

Fig. 2 Diagram of optical frequency transfer experimental system

Menlo 激光系统产生的窄线宽激光先经过光学隔离器,防止返回光进入激光器而对激光器产生损害。偏振分束棱镜(PBS1)可对输出光进行比例分光:将功率较弱的一束光作为参考光,参考光被反射镜反射且两次经过 1/4 波片调整偏振态后进入光电探测器(PD1);较强的光经过调制频率为 80 MHz 的声光调制器(AOM)的移频处理后,再通过 Link 1 传输到 22 号楼内的光钟实验室,传输过程中引入光纤相位噪声 φ_f 。在 Link 1 光纤末端,激光被一个分光比为 4:6 的光纤耦合器分成两束:功率较大的光被法拉第反射镜反射后原路返回,该过程中产生的相位噪声为 $2\varphi_f$;另一束光作为应用端在 Link 1 的远端输出,用于超稳激光系统的比对。返回光再次通过 AOM,总的移频量为 160 MHz。返回光与参考光在 PD1 上拍频,产生包含相位噪声为 $2\varphi_f$ 、中心频率为 160 MHz 的外差拍频信号,通过相位补偿电路可实现对外差拍频信号的相位噪声的实时抑制,从而实现激光频率的高精度传递。

自行搭建的光纤相位噪声抑制系统的相位补偿电路结构如图 2 中的点划线框内所示。PD1 得到的微波信号与标准频率源(SML01-1)输出的信号通过混频器 1 进行混频,再经低通滤波后输出包含频率差与相位关系的误差信号。利用比例积分(PI)伺服控制器对误差信号进行调整,产生的输出电压用来控制压控声表面波振荡器(VCSO),VCSO 输出的信号经过二分频(1/2)后进入功率放大器,从功率放大器输出的信号可用来驱动 AOM。此相位锁定环路可使 AOM 实现对光纤相位噪声的补偿,即实现 $2\varphi_c + 2\varphi_f = 0$,达到相位噪声抑制的目的。

为了评估上述光纤相位噪声抑制系统的噪声本底,使用 Link 3 代替 Link 1,在 20 号楼内将传输后的激光频率引回虚线框内的测量系统中,Link 3 输出的激光频率与本地直接输出的激光频率在 PD2 处拍频,进行光纤相位噪声抑制系统的环外自拍频测量。为了实现锁定参数的优化,将图 2 中混频器 1 输出的误差信号输入到傅里叶变换(FFT)分析仪,通过调节 PI 参数,在 FFT 分析仪上观察误差信号,并将低频噪声的信号幅度优化到最低。利用频率计(Agilent 53230A)对 PD2 处的频率值进行计数,计数时间为 24 h,频率波动的峰峰值为 15.6 mHz。通过 Alavar 软件计算拍频信号的阿伦偏差,结果如图 3 中三角形所示,频率秒

级稳定度为 6.8×10^{-18} , 2000 s 平均时间后达到 2.3×10^{-19} 。拍频信号的阿伦偏差即为光纤相位噪声抑制系统和环外拍频测量系统的噪声本底。环外拍频测量系统使用全光纤结构, 这部分没有主动噪声抑制的环外光纤会引入一定的噪声, 使得测量得到的系统噪声本底有所提高^[15]。

为了测量实际光纤传输系统的性能, 将 Link 1 和 Link 2 在 22 号楼内连接, 总长度为 1.6 km, 用以将传输到 22 号楼应用端的激光频率再传回本地并与本地直接输出的激光频率在 PD2 上实现环外自拍频, 锁定参数的优化方法如上所述。抑制光纤相位噪声后, 对 PD2 处的频率值进行计数, 计数时间为 24 h, 频率波动的峰峰值为 20.3 mHz。计算得到频率秒级稳定度可达 1.2×10^{-17} , 证明所搭建的光纤相位噪声抑制系统能够在实际链路中高质量地传递激光频率。图 3 中三角形代表在长度为 2 m 的短光纤环外拍频测量得到的系统噪声本底, 方块代表噪声补偿后的 1.6 km 实际光纤链路环外拍频信号的阿伦偏差, 圆点为两套 1.5 μm 超稳激光系统的拍频信号的阿伦偏差。

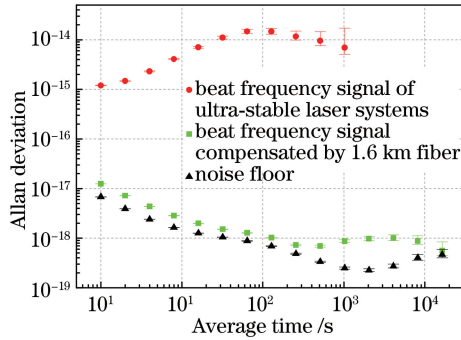


图 3 拍频信号的阿伦偏差

Fig. 3 Allan deviation of beat frequency signal

3.2 两套超稳激光系统拍频

一套稳定的激光系统(SLS)超稳激光系统放置在 22 号楼内的光钟实验室中, 利用波长计将两套 1.5 μm 激光系统的输出频率差调节至光电探测器的响应范围内(小于 250 MHz)。Menlo 激光系统输出的窄线宽激光频率经过上述光纤相位噪声抑制系统后通过 Link 1 传输至 22 号楼, 再在图 2 中 PD3 处与 SLS 激光系统产生的激光进行拍频。实验装置如图 2 中的 20 #、22 # 内的实线部分、点划线部分以及 Link 1 所示。通过频谱仪, 观察到 PD3 处两套系统的拍频频率为 185.322 MHz, 信噪比约为 50 dB。该频率信号通过定向耦合器被分为两部分, 一部分用来测量拍频线宽, 另一部分通过放大器 2 放大后直接用频率计计数。

4 分析与讨论

为了实现更高分辨率的测量, 两套超稳激光系统产生的频率为 185.322 MHz 的拍频信号与 SML01-2 产生的频率为 185.330 MHz 的信号通过混频器的混频后, 产生频率为 8.2105 kHz 的低频信号, 将该低频信号送入 FFT 分析仪, 得到拍频信号的典型谱线如图 4 所示。图中横坐标的频率值减去了 8.2105 kHz, 显示范围为 40 Hz, 此时 FFT 分析仪的分辨率带宽(RBW)设置为 0.25 Hz, 纵坐标采用线性坐标并经过归一化处理。连续测量得到 6 组拍频数据, 通过计算得到拍频信号的半峰全宽为 (0.77 ± 0.21) Hz(不确定度表示 1 倍标准偏差)。根据两套激光系统的出厂测试报告, 发现它们具有相同的线宽水平, 将拍频谱线的线宽除以 $\sqrt{2}$, 得到单套激光系统的激光线宽为 (0.54 ± 0.15) Hz(不确定度表示 1 倍标准偏差)。此测量结果表明两套商品激光系统达到了 0.5 Hz 的线宽指标。

为了评估两套系统的频率稳定性, 使用频率计对 PD3 处的拍频值进行计数, 计数时间为 4000 s。拍频信号的总频率漂移约 1 kHz, 平均漂移率为 0.25 Hz/s。去除线性漂移后, 得到频率波动的峰峰值约为 40 Hz, 去除线性漂移后的频率变化如图 5 所示。

使用图 5 所示的频率测量值计算得到阿伦偏差值, 结果如图 3 中红色圆点所示, 其秒级频率稳定度为 1.2×10^{-15} 。由于两台激光器各自锁定在不同法布里-珀罗(F-P)腔上, 没有绝对频率参考, 所以长期的阿伦偏差值变差^[17]。

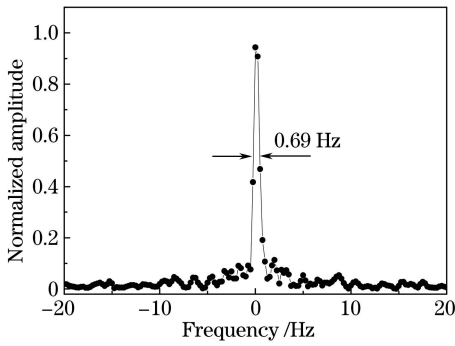


图 4 两套超稳激光系统通过噪声补偿后的 808 m 光纤链路的典型拍频结果

Fig. 4 Typical beat frequency result of 808 m fiber link after noise compensation by two ultra-stable laser systems

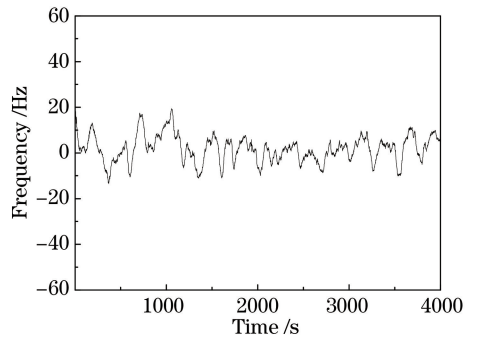


图 5 去除线性漂移后的频率变化

Fig. 5 Frequency fluctuation after removing linear drift

5 结 论

基于光纤相位噪声抑制的基本原理,通过实际光纤链路直接传输激光频率,实现了不同实验室内两套 $1.5 \mu\text{m}$ 超稳激光系统的比对。在室内通过一段 2 m 短光纤传输窄线宽激光频率,环外自拍频信号的秒级频率稳定度可达到 6.8×10^{-18} , 2000 s 平均时间后达到 2.3×10^{-19} , 此结果即为光纤相位噪声抑制系统和环外拍频测量系统的噪声本底。通过 1.6 km 实际光纤链路传输激光频率后,在本地实现环外自拍频,得到拍频信号的秒级频率稳定度达 1.2×10^{-17} , 此结果证明自行搭建的光纤相位噪声抑制系统能够在实际光纤链路中高质量地传递窄线宽激光频率。基于连接两个实验室的 808 m 实际光纤链路,将该光纤相位噪声抑制系统应用于两套商品 $1.5 \mu\text{m}$ 超稳激光系统的比对,两套激光系统拍频的结果证明两套激光系统的线宽均在 0.5 Hz 量级,秒级频率稳定度为 1.2×10^{-15} 。该实验可为将来中国计量科学研究院两院区间窄线宽光学频率的传递和光钟的比对提供参考。

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] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, *et al.* An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level [J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 71-75.
- [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] 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.
- [5] Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, *et al.* Making optical atomic clocks more stable with 10^{-16} level laser stabilization[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(3): 158-161.
- [6] Kessler T, Hagemann C, Grebing C, *et al.* A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(10): 687-692.
- [7] Häfner S, Falke S, Grebing C, *et al.* 8×10^{-17} fractional laser frequency instability with a long room-temperature cavity [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 2112-2115.
- [8] Jiang Yanyi. Narrow linewidth lasers: Application to optical clocks[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.
蒋燕义. 超窄线宽激光及其在光钟中的应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [9] Lin Baike, Cao Shiyong, Zhao Yang, *et al.* A compact iodine-stabilized solid-state laser at 532 nm[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0902002.
林百科, 曹士英, 赵 阳, 等. 小型化碘稳频 532 nm 固体激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0902002.
- [10] Fan Xialei, Jin Shangzhong, Zhang Shu, *et al.* Active suppression of residual amplitude modulation in laser frequency

- stabilization by multi-frequency mixing[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0402001.
- 范夏雷, 金尚忠, 张 枢, 等. 多频率合成主动抑制激光稳频的剩余幅度调制[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0402001.
- [11] Foreman S M, Ludlow A D, de Miranda M H G, *et al.* Coherent optical phase transfer over a 32-km fiber with 1 s instability at 10^{-17} [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(15): 153601.
- [12] Droste S, Ozimek F, Udem T, *et al.* Optical-frequency transfer over a single-span 1840 km fiber link[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(11): 110801.
- [13] 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.
- [14] Jiang H, Kéfélian F, Crane S, *et al.* Long-distance frequency transfer over an urban fiber link using optical phase stabilization[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2008, 25(12): 2029-2035.
- [15] 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 1 s[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(8): 084209.
- [16] Xu Yongcun. The influence of optical fiber phase noise on transmission of narrow-linewidth laser and the technique of phase noise cancellation[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009: 10-11.
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: 10-11.
- [17] Li Y, Lin Y G, Zhao Y, *et al.* Stable narrow linewidth 689 nm diode laser for the second stage cooling and trapping of strontium atoms[J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(7): 074208.