

激光光纤传输中远端相位噪声的测量与控制

谢勇^{1,2,3} 李刘锋^{1,2,3} 王春^{1,2,3} 陈李生^{1,2}

(¹中国科学院武汉物理与数学研究所波谱与原子分子物理国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)
(²中国科学院原子频标重点实验室, 湖北 武汉 430071; ³中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 在稳频激光的光纤传输中, 光纤本身引入的相位噪声影响到激光频率的稳定性, 造成激光光谱的展宽。介绍了光纤相位噪声的测量及如何通过反馈控制在光纤远端消除这一噪声。建立了消除光纤相位噪声的实验系统, 测量了一段 30 m 裸光纤引入的相位噪声, 并采用反馈控制在光纤的远端消除这一噪声, 将光纤造成的 1 kHz 谱线展宽减小到 1 Hz 以下。还分析了将相位检测中解调出来的噪声电压转换成相位噪声的问题。

关键词 激光技术; 光纤噪声消除; 稳频激光; 相位噪声

中图分类号 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP48.050602

Measurement and Feedback Control of Phase Noise at Remote Site of Optical-Fiber Laser Transmission Line

Xie Yong^{1,2,3} Li Liufeng^{1,2,3} Wang Chun^{1,2,3} Chen Lisheng^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics,

Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China

² Laboratory of Atomic Frequency Standards, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China

³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract When a frequency stabilized laser pulse transmits through an optical fiber, the phase noise generated by the optical fiber affects the stability of the laser frequency, resulting in a broadened laser spectrum. The measurement and feedback control of phase noise at the remote site of an optical fiber are introduced. Experimental setups are introduced for the measurement and active cancellation of the phase noise due to optical fiber. Using feedback control, the original 1 kHz spectral line broadening introduced by the optical fiber is reduced to less than 1 Hz. The method to convert the demodulated voltage noise to phase noise in the process of phase detection is also discussed.

Key words laser technique; fiber noise cancellation; frequency stabilized laser; phase noise

OCIS codes 140.3510; 140.3460; 140.3518

1 引言

激光稳频实验获得的高稳定、窄线宽的光源, 需要通过光纤送至其他实验室, 用来探测原子的跃迁谱线等具体的光谱研究。在光纤传输的过程中, 外界噪声、振动以及光纤本身引入的相位噪声都将影响到激光频率的稳定性, 造成激光光谱的展宽, 从而影响到激光光谱实验的分辨率。所以, 在激光的光纤传输过程中, 消除光纤引入的相位噪声是非常有必要的。L. S. Ma 等^[1]首先提出了利用光纤远端的反射信号来提取相位噪声, 并通过声光调制器(AOM)对入射光进行移频来精确抵消这一噪声, 从而达到在近端消除光纤噪声的目的。该研究将 25 m 光纤引入的 1.2 kHz 的光频谱展宽减小到 0.95 mHz。德国 J. Alnis 等^[2]工作也采用了类似的原理, 利用光纤远端面产生的后向反射光所携带的噪声信息和另一个稳定的频率参考进行相位探

收稿日期: 2010-12-06; 收到修改稿日期: 2011-01-02

作者简介: 谢勇(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光光纤传输方面的研究。E-mail: pippo_xy@163.com

导师简介: 陈李生(1972-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为激光物理、激光光谱以及激光干涉测量, 具体从事原子分子光谱、激光稳频、精密激光干涉仪以及相关光机电系统等方面的研究与应用。E-mail: lchen@wipm.ac.cn(通信联系人)

测,将获得的误差信号经过处理后送至声光调制器,用来压制传输过程中光纤引入的相位噪声。最近 Y. Jiang 等^[3]也报道了采用光纤双向传输相位伺服控制方法的工作。这一研究也是利用光纤远端端面反射光带有的噪声信息,在光纤的近端面进行位相噪声的探测和控制,并且将 300 m 光纤引入的 2 kHz 的光谱展宽减小到了 2.5 mHz。

光纤相位噪声压制的最终目标是在光纤的近端面进行相位噪声的探测和控制是最终目的。但是在光纤远端探测和控制噪声是实现这一目标的重要一步,因为在光纤的远端面进行相位噪声探测和控制相对简便,信噪比高,可以仔细地研究相位调制的机理,便于对噪声做定量的测量,并可与近端控制的结果作定量比较,为实现在光纤近端压制噪声打下基础。本文主要是建立光纤远端相位噪声测量与控制系统,定量的测量出由光纤本身引入的相位噪声,并通过反馈控制对这一噪声进行压制。并且探讨了将双平衡混频器输出的电压转换成相位噪声的问题。

2 基本原理

如果忽略激光本身的噪声,在进入光纤前激光的光场可以表示为

$$E = E_0 \cos \omega t. \quad (1)$$

经过光纤后,引入相位噪声,其出射光场为

$$E = E_0 \cos[\omega t + \phi_f(t)], \quad (2)$$

式中 ϕ_f 为相位噪声。利用 AOM 对激光器出来的光进行移频,移频量为 Ω ,通过光纤后,激光的出射光场为

$$E = E_0 \cos[(\omega + \Omega)t + \phi_f(t)]. \quad (3)$$

在光纤传输的过程中,要对光纤进行噪声压制,首先要获得光纤噪声信号,然后对这个噪声信号进行处理,通过调制光的频率的方法来抵消光纤引入的相位噪声^[1,2]。

在光纤远端进行相位噪声测量和压制的原理如图 1 所示。激光器输出的光分为两路,一路通过 AOM 进行移频后,耦合到光纤,另一路作为参考和光纤出来的光进行拍频,光外差信号中含有光纤引入的相位噪声。将光电探测获得的拍频信号与另一个稳定的微波参考信号进行相位比较,得到误差信号并经过处理后送至 AOM,用来压制光纤传输过程中引入的相位噪声。

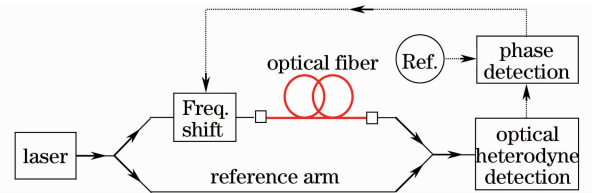


图 1 在光纤远端进行噪声控制的原理图

Fig. 1 Schematics of the noise cancellation at the remote site of the optical fiber

3 实验设计

光纤传输中远端噪声控制实验图如图 2 所示。实验中使用的激光器为氦氖激光器,波长为 632 nm,功率为 2 mW;声光调制器的移频为 80 MHz,频率由压控振荡器(VCO)提供;光纤为 30 m 的非保偏光纤。激光分为两路,一路直接作为参考光,另一路首先通过一个 AOM 进行移频(移频频率为 Ω)。移频后的光通过光纤,然后与参考光进行拍频。拍频信号中含有频率为 Ω 的成分,该成分包含了光纤产生的相位噪声。将拍频信号与另一个参考信号 Ω' (约 80 MHz)通过双平衡混频器(DBM)进行混频,混频后得到频率为 $\Delta = \Omega - \Omega'$ 的信号。用同一信号源驱动 AOM 和混频器的本振(LO)端口,在混频器的中频(IF)端口可以测量到光纤引入的相位噪声。另一方面,为消除光纤相位噪声,采用一个独立的稳定信号源(80 MHz)作为 LO,而 IF 端口的相位误差信号经由低通滤波器(LPF)和环路滤波器,然后对 AOM 的移

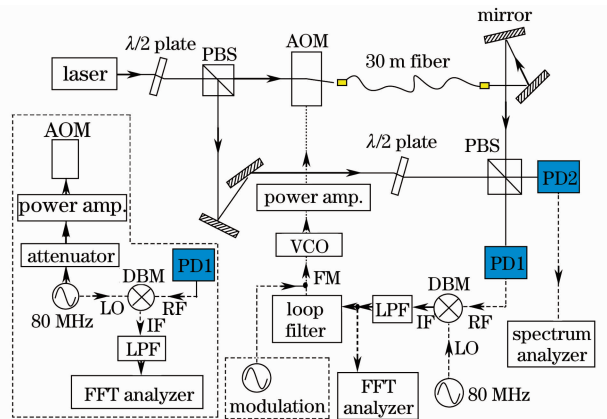


图 2 在光纤远端进行噪声压制实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for the noise cancellation at the remote site of the optical fiber

频进行修正,从而抵消光纤引入的相位噪声^[5~9]。图中虚线所围的部分为相位噪声校准时加入的信号调制。

图2中左侧虚线框所围部分为探测由光纤引入的相位噪声的实验装置。将80 MHz本振信号分成两路,一路通过衰减器和功率放大器控制声光调制器。另一路送至混频器的LO端和光电探测器输出的拍频信号进行混频,混频信号通过低通滤波器后用动态信号分析仪(FFT)进行测量。

4 光纤引入的相位噪声的测量

为了探测由光纤本身引入的相位噪声,将图2中80 MHz本振信号分为两路,一路输入到DBM的LO端,另一路暂时替代VCO来控制声光调制器。图2左侧虚线所围部分为实验设置。通过衰减器调节两路信号的功率;保证LO端的功率为7 dBm,同时确保AOM(功放输入端)的信号功率与原来VCO的输出功率相同,为4 dBm。这样拍频信号中只含有光纤引入的相位噪声,拍频信号和80 MHz本振信号进行混频后,IF输出通过低通滤波器后得到正比于光纤相位噪声 ϕ_f 的电压信号,进行快速傅里叶分析后得到由光纤引入的相位噪声的频谱成分。图3为用动态信号分析仪直接测量的IF端噪声电压的功率谱密度。从图中可以看出光纤引入的相位噪声中低于4 kHz的成分较明显。下面详细介绍如何将IF端噪声电压功率谱密度转换成以dBc/Hz为单位的相位噪声功率谱密度。

为了定量标度光纤引入相位噪声的大小,下面详细介绍如何将IF端口输出的噪声电压转换成相位噪声。由单一频率的信号对激光进行相位调制

$$E = E_0 \cos[(\omega + \Omega + \beta \sin 2\pi f_m)t], \quad (4)$$

式中 E_0 为初始光场复振幅, ω 为激光的频率, f_m 为调制频率, β 为相位调制的幅度,又称为调制指数。将(4)式按贝塞耳函数展开,可得到

$$E = E_0 J_0(\beta) \cos[(\omega + \Omega)t] + E_0 J_1(\beta) \cos[(\omega + \Omega + 2\pi f_m)t] - E_0 J_1(\beta) \cos[(\omega + \Omega - 2\pi f_m)t] + \text{高阶项}. \quad (5)$$

如果调制指数 $\beta \ll 1$ (小信号调制),则含有 $J_n(\beta)$ ($n > 1$)的高阶项可忽略不计,这时载波左右各有一个比较强的边带,高阶边带都可忽略。 $P_s = |E_0|^2$ 是载波功率,而 $|E_0|^2 [J_1(\beta)]^2$ 就是单边带功率 P_{SSB} 。当 $\beta \ll 1$ 时, $J_1(\beta) = \beta/2$,单边带功率可简化为

$$P_{SSB} = |E_0|^2 (\beta/2)^2. \quad (6)$$

这样得到 P_{SSB}/P_s ,实际上就可确定 β ,即在 f_m 处的相位调制(或相位噪声调制)以弧度为单位的幅值。

用频谱分析仪测量的单边带相位调制强度为

$$L_{PN} = 10 \lg(P_{SSB}/P_s), \quad (7)$$

式中 L_{PN} 的单位为dBc。同时用FFT测量DBM的IF信号电压 V_{IF} 。小相移情况下 V_{IF} 正比于相移,结合(6)式有

$$P_{SSB}/P_s = k\beta^2 = k'V_{IF}^2. \quad (8)$$

在千赫兹范围内系数 k' 与测量频率无关,但是和平衡混

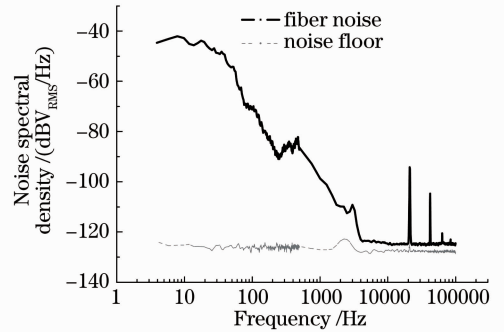


图3 通过FFT探测的完全由光纤引入的相位噪声频谱
Fig. 3 Spectral density of phase noise introduced by optical fiber

为了定量标度光纤引入相位噪声的大小,下面详细介绍如何将IF端口输出的噪声电压转换成相位噪声。由单一频率的信号对激光进行相位调制

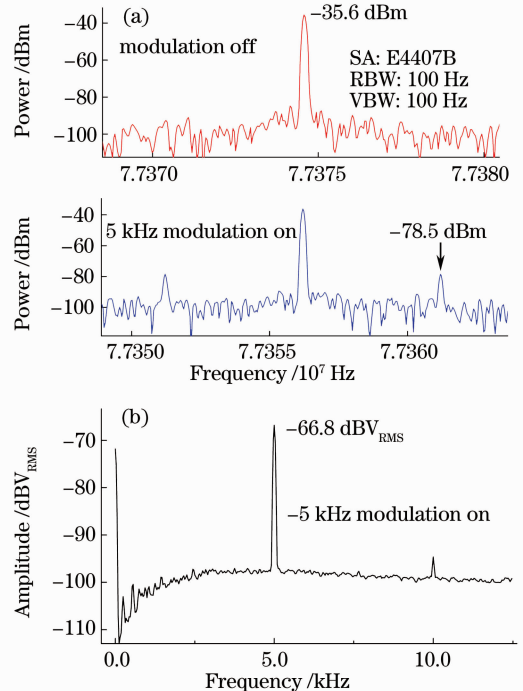


图4 (a)边带功率 P_{SSB} 的信号和载波功率 P_s 的信号,
(b)同一调制边带的幅值 V_{SSB}

Fig. 4 (a) Carrier and side band powers directly measured by a RF spectrum analyzer, (b) the same sideband measured by dynamic signal analyzer after demodulation

频器的特性及 LO 和 RF 端口的功率电平有关。一般功率 P 及电压 V_{IF} 都采用相应的分贝值, 则(8)式可改写为

$$L_{PN} = L_0 + 20\lg[V_{IF}/(1V)]. \quad (9)$$

由测得的调制信号的单边带功率的分贝值 L_{PN} 和 V_{IF} 的分贝值 $20\lg[V_{IF}/(1V)]$ (V_{IF} 单位为 V, 是信号的有效值) 就可得到校准系数的分贝值 L_0 。

校准完后测量相位噪声, 将 FFT 模式设为 PSD, 测量出噪声谱密度 $S_V(f)$ 的分贝值 $L_{S_V}(f)$, 单位为 $\text{dBV}_{\text{rms}}^2/\text{Hz}$, 则有

$$L_{PN}(f) = L_{S_V}(f) + L_0, \quad (10)$$

式中 L_{PN} 单位为 dBc/Hz 。校准时和测相噪时混频器 LO 和 RF 端的功率要保持不变, 因为校准系数 k' 是和这两个功率有关的, 如果两个功率变了, 需重新校准^[10,11]。

根据上面介绍的方法, 我们进行了将混频器 IF 端噪声电压转换为相位噪声的实验。首先通过 AOM 加入 5 kHz 的小信号调制, 相关的实验设置如图 2 所示。通过反馈将 VCO 与混频器 LO 端的参考信号锁相, 然后在频谱分析仪上测量载波功率 P_S 和调制后的单边带功率 P_{SSB} 。另一方面用 FFT 测量混频器 IF 端调制信号幅度。注意 FFT 测量模式采用 Harmonic 模式。图 4 为相应的测量结果。载波 P_S 的功率为 -35.6 dBm , 边带 P_{SSB} 的功率为 -78.5 dBm , 而同一调制边带经过混频器解调后并由动态信号分析仪测得的幅值 V_{SSB} 为 $-66.8 \text{ dBV}_{\text{RMS}}$ 。这样就得到了校准系数的分贝值 L_0 , 使我们能对 FFT 在混频器 IF 端的测量结果进行校准, 得到相位噪声。

5 远端相位噪声的控制

将测量到的相位噪声经过放大和处理, 然后用来调整 AOM 的移频量, 将拍频信号锁相在一个稳定的微波参考信号上, 实现了对光纤相位噪声的压制。图 5 比较了光纤噪声压制前后相位噪声测量结构的变化。图中纵坐标已经根据第 4 节介绍的方法将混频器 IF 端的噪声电压转换为以 dBc/Hz 为单位的相位噪声。

在 4 kHz 傅里叶频率以下光纤相位噪声的压制效果比较明显。FFT 测量的结果表明: 未进行噪声压制时, 在 4 kHz 内相位噪声明显, 噪声功率密度由 $-100 \text{ dBc}/\text{Hz}$ 增加到 10 Hz 处的 $-20 \text{ dBc}/\text{Hz}$ 。对光纤相位噪声进行压制后, 在 10 Hz~10 kHz 范围内测得的相位噪声低于 $-80 \text{ dBc}/\text{Hz}$, 绝大部分相位噪声密度都低于 $-100 \text{ dBc}/\text{Hz}$ 。在 10 Hz 以内, 有高于 $-80 \text{ dBc}/\text{Hz}$ 的相位噪声信号, 这可能是反馈环路在 10 Hz 以下的增益还不够, 也可能是测量过程中电缆的振动以及动态信号分析仪滤波窗口造成的, 这方面还需要进行仔细的测量和分析。在 50 Hz 和 150 Hz 等少数频率处存在高于 $-90 \text{ dBc}/\text{Hz}$ 的噪声尖峰, 是由于电源中的干扰造成的。在高于 30 kHz 的频率段, 反馈控制引入了额外的噪声, 由于在这一频率范围还未对环路增益和相移进行优化, 在 30~100 kHz 的频率段产生了振荡。

为了进一步验证相位噪声的控制结果, 用频谱分析仪探测 PD2 输出的拍频信号。图 6 比较了锁定前后的信号。图 6 中的大图是频谱仪分辨率带宽为 30 Hz 时的测量结果。在未进行光纤噪声压制时, 拍频信号的半峰全宽(FWHM)为 1 kHz 左右, 信号幅度低于 1 mV。图 6 中小图为光纤噪声压制后, 当频谱分析仪的分辨率带宽为 1 Hz 时探测到的拍频信号。此时拍频信号 FWHM 为 1.09(2) Hz。这一结果显然受限于频谱分析仪的 1 Hz 分辨率带宽。以上测量结果表明, 通过远端相位噪声控制, 30 m 的光纤引入的 1 kHz 的谱线展宽减小到 1 Hz 以下。由于频谱分析仪的有限分辨率带宽, 进行光纤噪

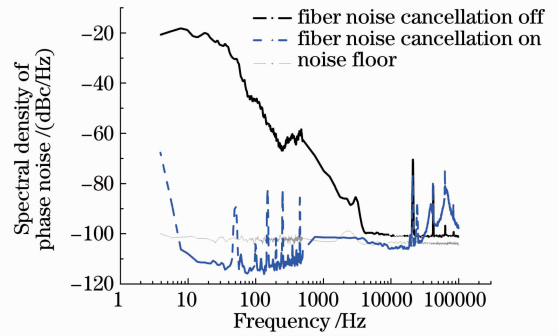


图 5 光纤噪声压制前后相位噪声的变化

Fig. 5 Spectral densities of phase noise with and without fiber noise cancellation

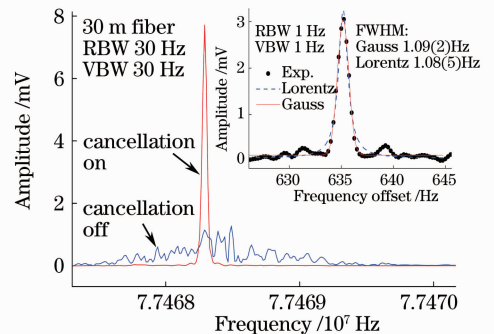


图 6 光纤噪声压制前后的拍频信号对比

Fig. 6 Heterodyne beat with and without fiber noise cancellation

声压制后的实际谱线宽度可能要远小于1 Hz。通过二次混频可将拍频信号的频率降至100 kHz以内,这样就可采用动态信号分析仪在更高的频谱分辨率下进行测量,进一步验证噪声压制的效果。

6 结 论

主要讨论如何探测由光纤本身引入的相位噪声,介绍了一种在激光光纤传输远端相位噪声的控制系统,来控制光纤引入的相位噪声,将30 m光纤引入的谱线展宽减小到1 Hz以下。下一步工作将会研究环路滤波器在几十千赫兹处的相位补偿,也会采用几种长度在100 m左右的光纤,包括保偏和非保偏光纤。同时进行光纤噪声近端压制,利用光纤的远端面反射回的带有光纤噪声信息的光信号和参考光进行拍频,将得到的拍频信号采用和远端噪声压制一样的控制系统进行处理,可以实现在光纤近端进行噪声压制。

参 考 文 献

- 1 L. S. Ma, P. Jungner, J. Ye *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]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(21): 1777~1779
- 2 J. Alnis, A. Matveev, N. Kolachevsky *et al.*. Subhertz linewidth diode lasers by stabilization to vibrationally and thermally compensated ultralow-expansion glass Fabry-Pérot cavities[J]. *Phys. Rev. A.*, 2008, **77**(5): 053809
- 3 Y. Jiang, S. Fang, Z. Bi *et al.*. Nd:YAG lasers at 1064 nm with 1-Hz linewidth[J]. *Appl. Phys. B.*, 2010, **98**(1): 61~67
- 4 Wang Lixia, Jiang Yanyi, Bi Zhiyi *et al.*. Laser frequency stabilization based on control of intermode beat note[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1198~1202
王丽霞, 蒋燕义, 毕志毅等. 基于纵模拍频控制的激光稳频技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1198~1202
- 5 E. D. Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. *Am. J. Phys.*, 2001, **69**(1): 79~87
- 6 Sun Xutao, Liu Jiqiao, Zhou Jun *et al.*. Confocal Fabry-Perot interferometer for frequency stabilization of laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1005~1008
孙旭涛, 刘继桥, 周 军等. 激光稳频的共焦法布里-珀罗干涉仪[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 1005~1008
- 7 Liu Guohong, Li Yongmin, Wang Yaoting *et al.*. All solid state continuous wave stabilized single frequency 1053 nm Nd:YLF laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1732~1734
刘国宏, 李永民, 王垚廷等. 全固态高功率连续单频稳频 1053 nm Nd:YLF 激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1732~1734
- 8 Wang Jing, Yang Baodong, He Jun *et al.*. Influence of the bandwidth of feedback loop in frequency stabilization of external-cavity diode laser by polarization spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 425~430
王 婧, 杨保东, 何 军等. 采用偏振光谱对外腔半导体激光器稳频时反馈环路带宽的影响[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 425~430
- 9 Li Bincheng, Gong Yuan. Review of cavity ring-down techniques for high reflectivity measurements [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 021203
李斌成, 龚 元. 光腔衰荡高反射率测量技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(2): 021203
- 10 M. Smith. Phase noise measurement using the phase lock technique[DB]. AN1639, Motorola. Inc. 1999
- 11 Wei Haoming, Xing Tingwen, Li Yun *et al.*. Measurement errors in 632.8 nm high precision phase-shifting Fizeau interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041202
魏豪明, 邢廷文, 李 云等. 632.8 nm 高精度移相菲佐干涉仪测量误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(4): 041202