

文章编号 1004-924X(2014)06-1403-07

光镊系统随机漂移建模和误差补偿

王自强^{1,2}, 钟敏成¹, 周金华¹, 孔凡让², 李银妹^{1*}

(1. 中国科学技术大学 光学与光学工程系, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026)

摘要:针对光镊系统本身噪声对测量精度的影响,提出了一种光镊系统随机漂移误差的有效补偿方法。首先,介绍了时间序列分析法和卡尔曼滤波技术,基于时间序列分析法建立了光镊的随机漂移误差模型;然后,用基于时间序列模型的卡尔曼滤波方法来减小该漂移误差。采用提出的方法对光镊设备实测数据的误差进行了补偿,结果表明:数据的误差方差由补偿前的 188.90 nm^2 减小为 8.41 nm^2 。计算补偿前后的艾伦方差可知,系统在平均时间为 1 s 时可使最小位移误差从 0.7 nm 降低到 0.1 nm。得到的结果显示:提出的滤波方法有效地抑制了光镊系统的漂移误差,将其用于双光镊对准可提高捕获光和探测光的对准精度,进而提高光镊系统的性能指标。

关键词:光镊; 随机漂移; 误差补偿; 卡尔曼滤波; 艾伦方差

中图分类号:Q-337;TP319 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20142206.1403

Modeling and compensation of random drift error for optical tweezer system

WANG Zi-qiang^{1,2}, ZHONG Min-cheng¹, ZHOU Jin-hua¹, KONG Fan-rang², LI Yin-mei^{1*}

(1. *Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*

2. *Department of Precision Machinery & Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)*

** Corresponding author, E-mail: liyinmei@ustc.edu.cn*

Abstract: In consideration of the effect of noise in an optical tweezer on its measuring accuracy, an effective compensation method for the random drift error of the optical tweezer was proposed. Firstly, the time series analysis and Kalman filter methods were introduced. Then the random drift error of the tweezer was modeled by time series analysis method and the Kalman filter was proposed to decrease this drift error. The testing error from an optical tweezer test setup was compensated. The compensating result shows that the error variance is reduced from 188.90 nm^2 to 8.41 nm^2 . The data analysis with the Allan variance method demonstrates that the minimum error is reduced from 0.7 nm to 0.1 nm for an averaging time of 1 s. The experiment shows that the method mentioned above can effectively compensate the random drift error of the optical tweezer. It can be used in aligning the

收稿日期:2013-08-16;修订日期:2013-10-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 21073174);国家重大科学研究计划资助项目(No. 2011CB910402);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. WK2030380002)

double optical tweezers and can improve the accuracy of initial alignment for a capturing light and a detecting light in the double optical tweezer and can enhance the equipment performance.

Key words: optical tweezer; random drift; error compensation; Kalman filter; Allan variance

1 引言

光镊即单光束梯度力阱,它能够三维捕获和操控半径从几十微米到几纳米的单个粒子。捕获的对象可以是活细胞^[1]、金属粒子甚至是量子点^[2]。光镊可以用来测量皮牛顿力和纳米级位移,并已广泛应用于研究分子马达的动力学特性、蛋白质折叠和 RNA 的三级结构^[3]。

在光镊检测生物大分子的研究中,通常是将生物大分子偶联到标准小球上,通过观察小球的运动情况来研究生物大分子特性。在实验过程中,要实现高精度测量,必须要降低噪声。光镊实验研究过程中的噪声主要来自三个方面:首先,由于生物大分子的研究都在液体环境下,因此手柄小球受到液体布朗运动的影响会产生随机噪声;其次,实验设备的不稳定带来的系统噪声,例如激光器、压电转镜、压电平台、显微镜、光学调整架等会受到温度以及安装位置的影响;第三,实验环境如振动、空气对流等带来的噪声。为了实现高精度探测,需要尽可能地降低外界噪声对系统的影响^[4-9]。将设备安装在气浮光学平台,并封装光路、控制实验温度可以抑制外界环境对光镊系统的影响。但在具体实验中,很难保证物镜长时间不发生轴向漂移,并且避免温度变化所导致的光学元件的位置变化及光阱变化。光镊中的漂移给实验带来了额外误差。为了提高光镊在轴向方向的捕获稳定性,研究人员采用双光镊对持实现了更稳定的光阱^[10]。这种光镊装置的双光镊初始对准对光镊力稳定性的影响非常大;因此,在对准过程中得到精确的两个光阱的位置非常重要,但漂移的存在会影响两个光镊的对准精度。此外,在捕获光和探测光独立的方式下,捕获光和探测光的对准也面临着同样的问题^[11]。

为了提高光镊系统的探测精度,需要采用硬件或者软件的方式处理光阱的漂移信号。硬件建设可以提升光阱的探测精度。最近,研究人员通过减去一个基准小球的运动来补偿光镊设备的漂

移,从而实现一个碱基对长度(0.34 nm)的分辨率^[3]。此外,采用双光阱差分探测,也能达到0.21 nm 的分辨率^[4]。尽管这两种差分探测可以提高光阱的分辨能力;但是差分方法需要增加或者分束一路激光来作为探测光束,不仅增加了设备复杂性,而且引入的另一路光束会带来噪声^[10]。本文提出用数据处理的方法来补偿随机漂移误差,从而提高光镊系统的分辨率。

卡尔曼滤波技术是消除零漂及噪声的有效工具^[11-12],现已经广泛用于激光陀螺信号、雷达信号、图像处理等领域。本文引入卡尔曼滤波技术来补偿光镊的随机漂移误差。首先采用时间序列分析建立随机漂移误差模型,得到相关的卡尔曼滤波参数。然后,采用卡尔曼滤波技术对光镊系统的随机漂移误差进行补偿。最后,用 Allan 方差对补偿前后的随机漂移误差进行比较,验证了补偿效果。

2 实验设备

光阱实验装置如图 1 所示,光源为 1 064 nm 波长的光纤输出激光器(AFL-1064-40-R-CL, Amonics Limited, 香港),用于产生光阱。出射光束经扩束器和用以匹配激光束与显微物镜的阱位透镜,进入倒置生物显微镜(Olympus IX71),在那里反射到 100 倍油浸物镜(NA=1.35)上,并被

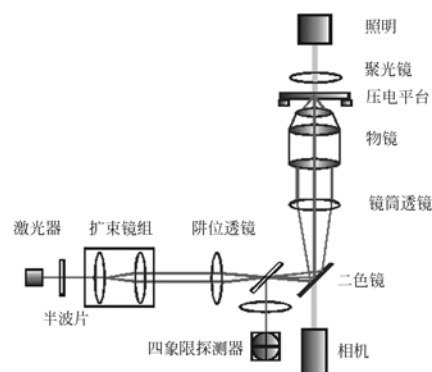


图 1 光镊实验装置

Fig. 1 Experimental setup of optical tweezers

强会聚到样品池中,形成实验所用的光阱。样品通过压电平台来实现精确定位。探测粒子运动过程的实验系统由 CCD 图像采集系统(Coolsnap HQ2 Monochrome camera, USA)和四象限探测器(Quadrant Detector, QD, 日本滨松 s1557)组成。对采集的粒子运动显微图像进行运算分析,可以得到粒子的位置。QD 通过采集卡(PCI6251, NI, USA)将采集的信号输送到计算机,该信号是电压信号,可运用流体力学法和 CCD 进行标定。为了保持系统的稳定性,实验前激光器开启 1 h,并保持周围安静。实验样品采用 $1 \mu\text{m}$ 标准小球,采样时间间隔 T 取 $0.000\ 01\ \text{s}$,样本长度 L 为 $100\ \text{s}$ 。

3 光镊系统漂移时间的序列分析与建模

3.1 数据预处理与检验

用 QD 采集的电压序列数据乘以标定的电压系数,得到位移序列数据。在运用位移序列数据建模之前,需要进行预处理,以得到平稳、正态和零均值序列数据。平稳性用于考察样本数据的统计特性是否随时间而改变,在工程应用中常使用逆序法、轮次检验法对数据进行预处理^[13-14]。对于非平稳的时间序列,需要进行差分处理,使其变成平稳时间序列。本文采用轮次(游程)检验法检验数据的平稳性,检验结果显示小球的位移时间序列是平稳的。

数据正态性检验可以通过检验它的三阶矩(偏态系数 ξ)和四阶矩(峰态系数 ν)是否满足正态随机变量的特性来完成。如果三阶矩接近 0,四阶矩接近 3,则可以认为信号具有正态性。通过计算采集数据得到峰态系数 $\nu=2.936\ 5$,样本偏态系数为 $\xi=-0.035\ 3$,表明光镊系统的随机漂移序列满足了平稳、正态的条件。

计算数据的平均值为 $2.277\ 0\ \text{nm}$,所以需要 对数据进行零均值处理。采集得到的光镊漂移的原始测量信号 $X(n)$ 如图 2 所示,处理后信号如图 3 所示。

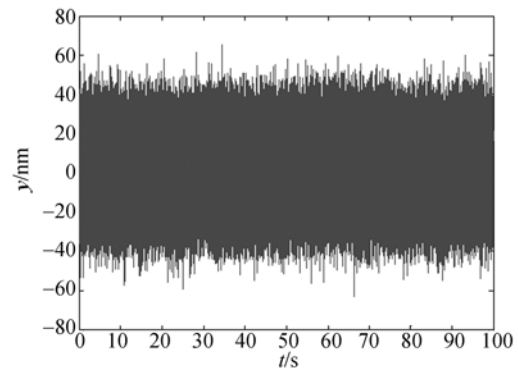


图 2 原始数据图

Fig. 2 Original signals of optical tweezers

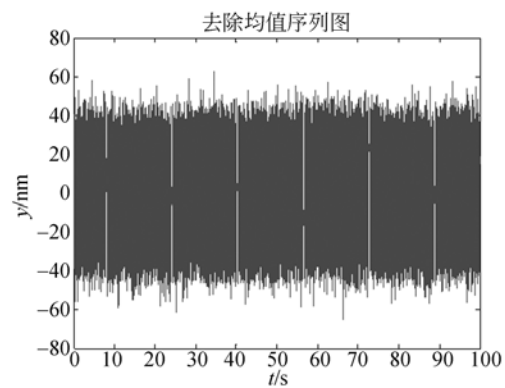


图 3 去除均值序列图

Fig. 3 Signals after removing mean signal sequence

3.2 光镊漂移模型的建立和参数识别

3.2.1 光镊随机漂移模型的选择

常用的平稳时间序列分析模型有自回归模型($\text{AR}(p)$)、移动平均模型($\text{MA}(q)$)和自回归滑动平均模型($\text{ARMA}(p, q)$)。其中, $\text{ARMA}(p, q)$ 模型是以常系数线性差分方程定义的一类重要的平稳时间序列模型,它的数学表达式为:

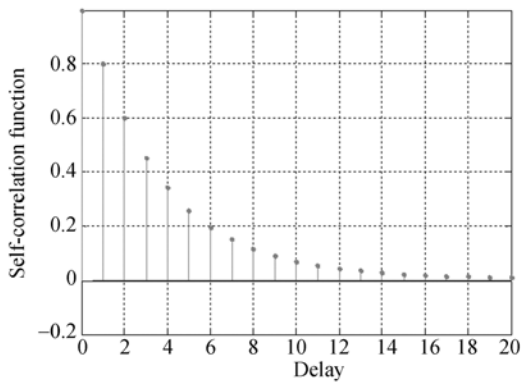
$$\hat{x}(k) = \hat{\varphi}_1 \hat{x}(k-1) + \dots + \hat{\varphi}_p \hat{x}(k-p) + \alpha(k) - \theta_1 \alpha(k-1) - \theta_q \alpha(k-q), \quad (1)$$

式中: x_k 为时间序列, p 为自回归模型的阶次, q 为滑动模型的阶次, φ_k 为模型系数(自回归系数), θ_k 为模型系数(滑动系数), $\alpha_k \sim N(0, \sigma_\alpha^2)$ 。

利用平稳时间序列的自相关函数 $\rho(k)$ 和偏自相关函数 $\psi(k, k)$ 的拖尾与截尾效应可以识别出模型的类型。 $\text{MA}(q)$ 模型的自相关函数是 q 步截尾的,偏自相关函数具有拖尾性;而 $\text{AR}(p)$ 模型的偏自相关函数具有 p 步截尾性,它的自相

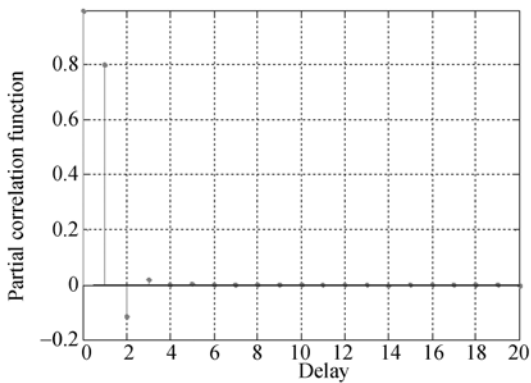
关函数具有拖尾性^[13,15]。

预处理后数据的自相关函数和偏自相关函数的计算结果如图 4 所示。由图 4 可知,自相关系数是拖尾的,而偏自相关系数在第三步已很接近误差曲线,其拖尾不明显,所以可以判断光镊漂移模型是 AR 或者 ARMA 模型。由于其阶次都比较低,一般在 2 阶至 3 阶之间,因此在实际应用中,误差模型通常在 AR(1)、AR(2)、AR(3)、ARMA(1,1)和 ARMA(2,1)中选择。



(a) 样本自相关函数

(a) Self-correlation function



(b) 样本偏自相关函数

(b) Partial correlation function

图 4 预处理计算结果

Fig. 4 Results of pre-calculation

3.2.2 ARMA 模型参数的估计

ARMA 模型参数的估计过程是非线性回归过程,比 AR 模型参数的估计过程要复杂,其方法大致有时序理论估计法、优化理论估计法与控制理论估计法 3 种。本文采用时序理论估计法中的长自回归模型法。该方法的基本思想是:基于观

测时序建立起来的 AR 模型、MA 模型、ARMA 模型均是等价的数学模型,因此,由这些模型确定的等价系统的传递函数实际上是相等的。所以,可先估计出 AR 模型,再根据传递函数相等的关系估计出 ARMA 模型的参数 φ_i 与 θ_j ^[16-17]。

该方法具有两个优点:第一,将估计参数 φ_i , θ_j 的过程转化为解线性方程组,便于计算机实现;第二,在估计参数的同时确定了模型的阶次 (p, q) ,省略了模型的适用性检验。但出于理论上的完整性,稳妥起见本文仍进行了模型的适用性检验。

3.2.3 模型的适用性检验

模型适用性检验的根本准则是检验模型残差 $\{\alpha_i\}$ 是否为白噪声。常用准则有白噪声检验准则、残差平方和检验准则、最终预测误差(FPE)准则、赤池信息量(AIC)准则等。本文选择 AIC 准则进行检验。对经过预处理的随机漂移序列 $X(n)$ 求取模型参数,计算相应的 AIC 值,列入表 1。根据表中的数据,AR(3),ARMA(2,1)可作为适用的光镊系统漂移模型。但 AIC 准则存在一些问题:第一,并非真值的一致性估计;第二,确定的适用阶次往往偏高。因此,实际应用中 AIC 准则并非确定模型适用阶次的唯一依据,比如,可以参考模型拟合后的残差自相关函数曲线或者功率谱曲线,检验拟合模型的残差是否近似为白噪声,从而判断模型是否适用。

表 1 光镊随机漂移 ARMA 模型的参数

Tab. 1 Parameters of ARMA models of optical tweezers

	AR(1)	AR(2)	AR(3)	ARMA(1,1)	ARMA(2,1)
φ_1	0.802	0.893	0.895 1	0.752 3	0.735 8
φ_2	—	-0.113 4	-0.130 1	—	0.012 63
φ_3	—	—	0.018 76	—	—
θ_1	—	—	—	0.144 0	0.159 2
AIC	7048324	7035383	7035033	7035041	7035040

根据表 1 的结果,综合考虑,最终确定 ARMA 模型为:

$$\hat{x}(k) = 0.7358\hat{x}(k-1) + 0.01263\hat{x}(k-2) + \alpha(k) + 0.1592\alpha(k-1). \quad (2)$$

图 5 为模型残差 α 的功率谱函数曲线,可以直观看出残差 α 是一个白噪声序列,从而进一步验证 ARMA 模型为适用模型。

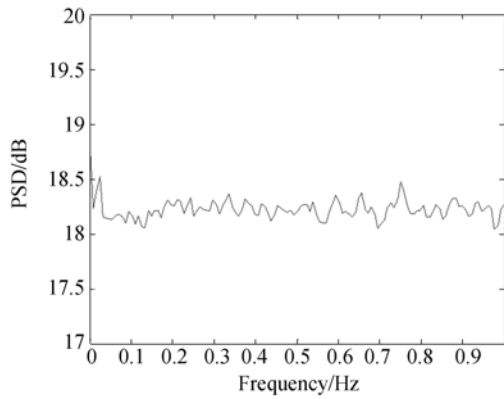


图 5 ARMA 模型残差功率谱密度

Fig. 5 Power Spetrum Density(PSD) of residual signal of ARMA model

4 基于 ARMA 模型的卡尔曼滤波

由公式(1)得出 ARMA 模型与其相应的卡尔曼滤波方程的状态空间模型为:

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k-1) + \mathbf{B}\mathbf{V}(k), \quad (3)$$

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k), \quad (4)$$

其中: $\mathbf{X}(k)$ 为状态方程, $\mathbf{Y}(k)$ 为输出方程。 $\mathbf{V}(k)$, $\mathbf{W}(k)$ 的统计特性分别为:

$$E(\mathbf{V}(k)) = 0; E(\mathbf{W}(k)) = 0, \quad (5)$$

$$E(\mathbf{V}(k)\mathbf{V}_i^T) = R_K \delta_{Ki}, \quad (6)$$

$$E(\mathbf{W}(k)\mathbf{W}_i^T) = Q_K \delta_{Ki}, \quad (7)$$

$$E(\mathbf{W}(k)\mathbf{V}_i^T) = 0. \quad (8)$$

从系统的角度出发,认为光镊漂移是以白噪声为输入的系统输出。

设系统的状态向量为:

$$\mathbf{X}(k) = [\hat{x}(k), \hat{x}(k-1)]^T. \quad (9)$$

过程噪声为:

$$\mathbf{V}(k) = [\alpha(k), 0]^T, \quad (10)$$

则式(4)中的系数为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.7358 & 0.01263 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1592 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

设 $\mathbf{W}(k)$ 为模型的估计误差,则有:

$$x(k) = \hat{x}(k-1) + \mathbf{W}(k). \quad (11)$$

设系统的输出为:

$$\mathbf{Y}(k) = x(k), \quad (12)$$

则输出方程为:

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k), \quad (13)$$

其中: $\mathbf{C} = [1 \ 0]$.

$\mathbf{V}(k)$, $\mathbf{W}(k)$ 符合卡尔曼滤波的统计特性。根

据上述系统方程,得到卡尔曼滤波的递推表达式^[13]为:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k,k-1} = \mathbf{A}\hat{x}_{k-1,k-1} \\ \hat{x}_{k,k} = \hat{x}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k[\mathbf{Y}_k - \mathbf{C}_k\hat{x}_{k,k-1}] \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1}\mathbf{C}^T[\mathbf{C}\mathbf{P}_{k,k-1}\mathbf{C}^T + \mathbf{R}]^{-1} \\ \mathbf{P}_{k,k-1} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1,k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{B}\mathbf{Q}_{k-1}\mathbf{B}^T \\ \mathbf{P}_{k,k} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{C}]\mathbf{P}_{k,k-1} \\ \hat{\mathbf{Y}}_k = \mathbf{C}\hat{x}_{k,k} \end{cases}, \quad (14)$$

式中: $\hat{x}_{k,k-1}$ 为滤波器状态的一步预测估计; $\hat{x}_{k,k}$ 为 k 时刻滤波器的状态; \mathbf{K}_k 为 k 时刻滤波器的增益矩阵; \mathbf{R} 为系统量测噪声方差,其值为模型估计误差的方差; \mathbf{Q} 为系统的过程噪声方差,其值为

$$\begin{bmatrix} 10\delta_a^2 & 0 \\ 0 & 10\delta_a^2 \end{bmatrix}; \mathbf{P}_{k,k}$$

为一步预测误差的协方差阵, \mathbf{P} 的初值为单位

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \hat{\mathbf{Y}}_k$$

为 k 时刻滤波器的输出。将实际测量得到的光镊漂移数据作为该卡尔曼滤波器的输入,滤波处理结果如图 6 所示。其中,黑色细线表示滤波前的原始信号,白色细线表示在 ARMA(2,1)模型基础上,用卡尔曼滤波方法进行滤波处理的结果。由此可知,此滤波器的滤波效果很好。

通过数据统计计算得到滤波前的均值为 0,误差方差为 188.90;滤波后的数据均值为 0,误差方差为 8.41。滤波后数据的方差比滤波前小了 23 倍,这说明滤波显著地减小了数据的分散程度。

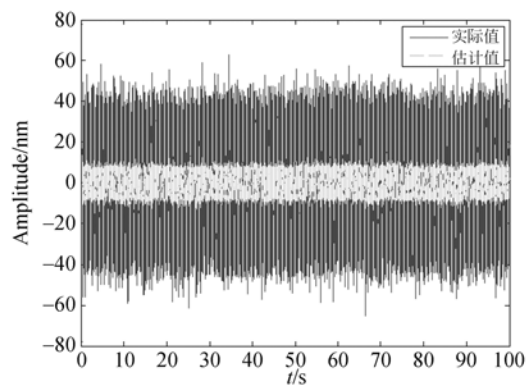


图 6 滤波前后的随机信号序列图

Fig. 6 Random signal sequences before and after Kalman filterings

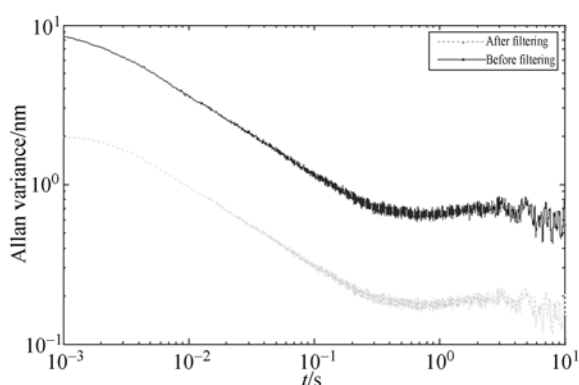


图 7 滤波前后光镊信号的艾伦标准差比较

Fig. 7 Allan variances of signals of optical tweezers before and after Kalman filterings

艾伦方差普遍应用于分析光镊系统噪声中^[10,18-19],为了进一步比较滤波的效果,本文计算了滤波前后信号的艾伦标准差,如图 7 所示。由图可知,滤波前系统在平均时间为 1 s 时获得的

参考文献:

- [1] ZHONG M C, WEI X B, ZHOU J H, *et al.*. Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers[J]. *Nat. Commun.*, 2013, 4:1768.
- [2] JAUFFRED L, RICHARDSON A C, ODDERSHEDE L B. Three-dimensional optical control of individual quantum dots[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(10): 3376-3380.
- [3] CARTER A R, SELO Y, PERKINS T T. Precision surface-coupled optical-trapping assay with one-basepair resolution[J]. *Biophysical Journal*, 2009, 96(7): 2926-2934.
- [4] MOFFITT J R, CHEMLA Y R, IZHAKY D, *et al.*. Differential detection of dual traps improves the spatial resolution of optical tweezers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(24): 9006-9011.
- [5] NUENT-GLANDORF L, PERKINS T T. Measuring 0.1-nm motion in 1 ms in an optical microscope with differential back-focal-plane detection[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22): 2611-2613.
- [6] KLEIN M, ANDERSSON M, AXNER O, *et al.*. Dual-trap technique for reduction of low-frequency noise in force measuring optical tweezers[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(3): 405-412.
- [7] ANDERSSON M, FÄLLMAN E, UHLIN B E, *et*

最小位移误差为 0.7 nm;滤波后,精度能够提升到 0.1 nm,从而再次证明卡尔曼滤波能够有效降低光镊测量中的各种噪声,尤其对抑制漂移有很好的效果。

5 结 论

本文针对光镊高精度测量的要求,提出了利用卡尔曼滤波补偿实验误差的方法,介绍了时间序列分析的建模方法和卡尔曼滤波技术,并对实际光镊系统测量数据进行了分析。初步实验结果表明,误差方差由补偿前的 188.90 nm^2 减小为 8.41 nm^2 。补偿前系统在平均时间为 1 s 时可获得的位移最小误差为 0.7 nm;补偿后位移精度在相同平均时间下的最小误差降低到 0.1 nm。该方法有效地补偿了光镊系统的漂移,提高了光镊系统的性能指标。

- al.*. Force measuring optical tweezers system for long time measurements of P pili stability [J]. *SPIE*, 2006, 6088: 8810-8810.
- [8] ANDERSSON M, CZERWINSKI F, ODDERSHEDE L B. Optimizing active and passive calibration of optical tweezers[J]. *J. Opt-Uk*, 2011, 13(4): 044020.
- [9] 王自强,李银妹,楼立人,等. BP 神经网络用于光镊力的非线性修正研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 6-10.
WANG Z Q, LI Y M, LOU L R, *et al.*. Application of BP neural network to nonlinearity correction of optical tweezers force[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 6-10. (in Chinese)
- [10] CZERWINSKI F, RICHARDSON A C, LENE B. Quantifying noise in optical tweezers by Allan variance[J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 13255-13269.
- [11] 张立新,黄晋英. 基于卡尔曼滤波的微压电陀螺的误差补偿[J]. *机械工程与自动化*, 2011, 168(5): 134-136.
ZHANG L X, HUANG J Y. Electric gyro error compensation based on Kalman filter[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2011, 168(5): 134-136. (in Chinese)
- [12] 魏彤,郭蕊. 自适应卡尔曼滤波在无刷直流电机系统辨识中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2308-2314.

- WEI T, GUO R. Application of adaptive Kalman filtering in system identification of brushless DC motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2308-2314. (in Chinese)
- [13] POLLOCK D S G, GREEN R C, NGUYEN T. *Handbook of Time Series Analysis, Signal Processing, and Dynamics* [M]. London: Academic Press, 1999.
- [14] 李家奎,许化龙,何婧. 光纤陀螺随机漂移的实时滤波方法研究[J]. *宇航学报*, 2011, 31(12): 2717-2721.
- LI J L, XU H L, HE J. Real time filtering methods of random drift of fiber optic gyroscope[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 31(12): 2717-2721. (in Chinese)
- [15] 汤霞清,宗艳桃,郭理彬,等. 光纤陀螺随机漂移的AR-MA模型[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2008, 22(3): 50-53.
- TANG X Q, ZONG Y T, GUO L B, *et al.*. AR-MA model of random drift of fiber optic gyro[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2008, 22(3): 50-53. (in Chinese)
- [16] 王新龙,陈涛,杜宇. 基于ARMA模型的光纤陀螺漂移数据建模方法研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2006, 26(1): 5-7.
- WANG X L, CHEG T, DU Y. The drift method of fiber optic gyros based on the ARMA model[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(1): 5-7. (in Chinese)
- [17] 武丽花,凌林本. 三浮陀螺仪漂移模型的建立及MATLAB实现[J]. *中国惯性技术学报*, 2005, 12(6): 75-78.
- WU L H, LIN L B. Modeling of gyro drift and realizing in MATLAB[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2005, 12(6): 75-78. (in Chinese)
- [18] GIBSON G M, LEACH J, KEEN S, *et al.*. Measuring the accuracy of particle position and force in optical tweezers using high-speed video microscopy[J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14561-14570.
- [19] CZERWINSKI F, RICHARDSON A C, SELHUBER-UNKEL C, *et al.*. Quantifying and pinpointing sources of noise in optical tweezers experiments[J]. *SPIE*, 2009, 7400: 740004.
- [20] SMTIH S B, CUI Y J, BUSTAMANTE C. Optical-trap force transducer that operates by direct measurement of light momentum[J]. *Biophotonics Pt. B*, 2003, 361: 134-162.
- [21] NUGENT-GLANDORF L, PERKINS T T. Measuring 0.1-nm motion in 1 ms in an optical microscope with differential back-focal-plane detection [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22): 2611-2613.

作者简介:



王自强(1970—),男,安徽庐江人,博士研究生,讲师,2007年于中国科学技术大学获得硕士学位,主要从事光镊技术、控制和检测技术方面的研究。E-mail: wzqiang@ustc.edu.cn

导师简介:



孔凡让(1951—),男,安徽宿州人,教授,博士生导师,长期从事设备状态监测与故障诊断的研究工作。E-mail: kongfr@ustc.edu.cn

通讯作者:



李银妹(1954—),女,上海人,教授,主要从事光镊技术的研究。E-mail: liyinmei@ustc.edu.cn