

文章编号: 1001-3806(2012)03-0386-04

校正激光光束指向漂移的算法研究

张丽霞^{1,2} 林妩媚^{1*} 廖志杰¹ 王瑞林^{1,2}

(1. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了获得稳定的激光光束, 需要对其随机漂移进行校正。以光束传递系统中快速反射镜校正脉冲激光器自身指向漂移的过程为例, 采用一种基于移动平均值校正原理的算法, 对加载地面抖动前后的校正效果进行了仿真模拟。仿真结果显示, 该算法可以使指向漂移经过长距离传输后引入的位置偏移显著降低; 校正后的移动平均值相对于校正前的有较大降幅, 最优处约降至原来的 $n^{-1/2}$ (n 为一个窗口内的脉冲数); 校正后的移动标准偏差值也明显下降。结果表明, 该算法的关键在于提出合适的补偿量, 具有实用性, 可以实现对激光光束指向漂移的闭环实时校正。

关键词: 激光技术; 校正算法; 移动平均值; 激光光束; 指向漂移

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.026

Research of algorithm to correct direction drifts of laser beam

ZHANG Li-xia^{1,2}, LIN Wu-mei¹, LIAO Zhi-jie¹, WANG Rui-lin^{1,2}

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to obtain stable laser beam, random deviations of light beams should be corrected. Taking the progress of adjusting direction drifts of pulse laser beam with fast steering mirrors in the beam delivery system as an example, an algorithm based on moving average (MA) correction mechanism was used to simulate the correction outcomes with or without ground jitters. MA and moving standard deviation (MSD) are used to evaluate the correction effects. The results indicate that this algorithm can control the position excursions on the plane of beam delivery system caused by the direction drifts of laser beam effectively, and the MA corrected has a big jump between $n \sim 2n$ pulses, for example, the optimal MA can be reduced to $n^{-1/2}$ times (n is pulse numbers in a window). At the same time, there is a sudden decline in MSD between $n \sim 2n$ pulses, and soon afterwards, MSD is going to be sticking. Meanwhile, the drifts can be restrained while loading the ground jitters, and the dropping amplitude is bigger than without the ground jitters. The results show that the key of applications lies in construction of the appropriate corrections. What is more, this algorithm which is practical can achieve real-time control of direction drifts.

Key words: laser technique; correction algorithm; moving average; laser beam; direction drift

引言

自1960年美国梅曼发明第1台激光器以来, 激光技术就得到了迅速发展。激光有其独特的优点, 如单色性好、方向性好、稳定性好、高亮度。但是激光器工作时, 由于诸多因素的影响, 会使得输出光束在传播过程中产生漂移^[1], 从而影响激光在精密测量和精密加工等方面的应用^[2], 因此, 需要校正激光器输出光束的漂移。

激光光束漂移来源主要有以下几个方面: (1) 激光器自身引起的光束不稳定。激光器是高能量发射装置, 且内部温度分布不均, 加之内部结构复杂, 元件易

发生微小变化, 故极易引起光束方向的漂移; (2) 系统引起的随机抖动。激光器系统工作时会产生高频小幅抖动及低频大幅抖动; (3) 外界传输环境因素。激光在大气中传输具有不同的衰减; 周围环境的温度、压力、湿度、振动等的变化都会引起传输系统状态的不稳定; (4) 背景光会引入噪声^[3]。

目前一般运用以下措施减小光束漂移^[4]: (1) 对于激光器系统选用热变形小的材料; (2) 可采用水冷降温法, 或高速吹风机纵向吹气法排走大量的热量; (3) 应用自适应光学及多元回归对光束漂移进行综合修正, 在发射系统中加入变形镜, 矫正光束波前畸变, 补偿大气传输造成的影响; (4) 利用激光装置整体温漂闭环反馈控制法和激光方向稳定性专用装置控制漂移。

本文中基于移动平均值 (moving average, MA) 校正指向漂移的原理, 提出校正激光光束指向漂移的一

作者简介: 张丽霞 (1988-), 女, 硕士研究生, 主要从事光束稳定方法的研究。

* 通讯联系人。E-mail: lwm@ioe.ac.cn

收稿日期: 2011-09-16; 收到修改稿日期: 2011-10-12

种算法。介绍了对脉冲激光器进行闭环控制的稳定光束算法,给出了仿真结果,其结果可以用于光路中光束稳定系统的研究。

1 MA 值校正原理

实际运用中激光光束需要一个传输过程。如图 1 所示,激光光源和光学系统的放置有一定距离,一般需要通过光束传递单元^[5](即从光源到光学系统的光束传输装置)才会进入光学系统中。因此,相对于激光器本身的位置漂移量来说,其指向漂移量经过一段距离的传输^[6],所引起的光束偏移更大。故本文中主要探讨如何利用算法校正激光光束的指向漂移。

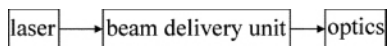


Fig. 1 Laser beam delivery process

如图 1 所示,激光光源的出射光束经过光束传递单元,其指向漂移引起的偏移比位置漂移本身大许多,对光路的影响更大。如光源出射后在光学系统入射面处产生的位置漂移为 s_i (毫米量级),指向漂移为 θ (微弧度量级),光束传递单元长度为 D (多为 5m ~ 20m),而在光学系统入射面上指向漂移引入的偏移量为 $s = D \cdot \theta$ 。 θ 虽小,但因为距离 D 较大,故引入的偏移量 s 相对于激光器自身的位置漂移很大,因此主要考虑校正指向漂移。而在光学系统的入口端,指向漂移所引起的位置偏移又比本身的指向偏移大许多,因此,在光学系统的探测面上主要考虑通过观测其位置偏移量 s 来看指向漂移 θ 的校正效果。

脉冲激光器出射激光脉冲间的光束漂移各不相同^[7-8]。但将激光脉冲分段看来,又有一定的规律可循,在段与段之间,脉冲的平均漂移量会发生较大幅度的跳变,在由一定脉冲数组成的脉冲段内,漂移可以用 MA 值描述^[9]。位置漂移和指向漂移的 MA 值数学表达式描述如下:

$$s(k)_{MA} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} s(k-j) \quad (k = n, n+1, \dots, m) \quad (1)$$

$$\theta(k)_{MA} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \theta(k-j) \quad (k = n, n+1, \dots, m) \quad (2)$$

式中,每段含 m 个脉冲, $s(k)_{MA}$ 和 $\theta(k)_{MA}$ 分别表示第 k 个脉冲的位置漂移量和指向漂移量。该式表明在每段范围内,下一个脉冲的漂移量可以根据之前的 n 个脉冲的漂移量估算出来,这就可以做到提前调节,达到稳定光束的目的。

提出了移动标准偏差 (moving standard deviation, MSD)^[10] 作为每一脉冲漂移量相对于其 MA 值的标准

偏差。

$$s(k)_{MSD} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=k-n+1}^k [s(j) - s(k)_{MA}]^2}, \quad (k = n, n+1, \dots, m) \quad (3)$$

$$\theta(k)_{MSD} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=k-n+1}^k [\theta(j) - \theta(k)_{MA}]^2}, \quad (k = n, n+1, \dots, m) \quad (4)$$

稳定光束的算法关键在于提出合适的补偿量,其作用是尽量减小激光器自身、地面振动及其它因素带来的光束不稳定,利用补偿量校正每一脉冲的漂移。

2 校正指向漂移的算法

基于准分子激光器,以在光束传递过程中校正激光器自身引起的光束指向偏差为例,运用 MATLAB 进行仿真。设定初始量,一个脉冲段的脉冲个数为 m (此处设定 $m=4000$), n 为一个窗口内的脉冲数 (此处设定 $n=200$),需根据之前 n 个脉冲的漂移量估算后续脉冲的漂移量 θ 为激光器自身的指向漂移, D 为传递单元的长度, s 为光学系统入射面上的探测器探测到的位置偏移量, l 为所需调整量, s_{MA} 为 s 的移动平均值。由上面分析可知,通过监测位置偏移量 s 来看指向漂移 θ 的校正效果。算法思路如下。

由于激光器自身的指向漂移 θ 较小,故可近似得:

$$s(k) = D \cdot \theta(k) \quad (5)$$

$S(k)$ 为调整之后探测器探测到的第 k 个脉冲的位置参量:

$$S(k) = s(k) + l(k) \quad (6)$$

$$s(k)_{MA} = [n \cdot s(k-1)_{MA} - s(k-n) + S(k)]/n \quad (7)$$

$$s(k) = s(k-1)_{MA} + \delta(k) \quad (8)$$

式中 $\delta(k)$ 为一随机量。

根据调节目的,欲使 $s(k)_{MA}$ 趋于 0,由上式近似可得:

$$l(k) = \mu \cdot n \cdot s(k)_{MA} \quad (9)$$

式中 μ 是一个与激光器自身特性相关的参量。可得:

$$l(k) = l(k-1) + \mu \cdot s(k) \quad (10)$$

通过程序仿真,可将校正量公式调整为:

$$l(k) = \lambda \cdot l(k-1) + \mu \cdot s(k) \quad (11)$$

在下一个脉冲入射到探测器前所储存的校正量被用作前馈校正量,并注入控制环中。利用校正量减小探测面上的位置偏移量,即根据 (5) 式可知 $\theta = s/D$,指向漂移也就得到了校正。

3 校正结果及分析

该仿真以光束传递单元中利用快速反射镜校正脉冲激光器自身指向漂移的过程为例,模拟利用 MA

值进行闭环控制的稳定光束算法校正前后的光束变化。

仿真中设定指向漂移 θ 为 $[-200, 200] \mu\text{mad}$, $D = 12\text{m}$ 。

3.1 无地面扰动时

图2~图4分别为无地面扰动时,校正前后的位置偏差、MA值及MSD的变化图。

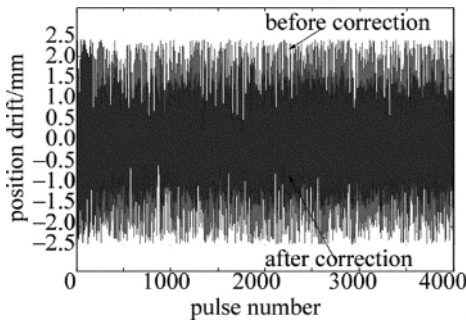


Fig. 2 Position drifts before and after correction without ground jitter

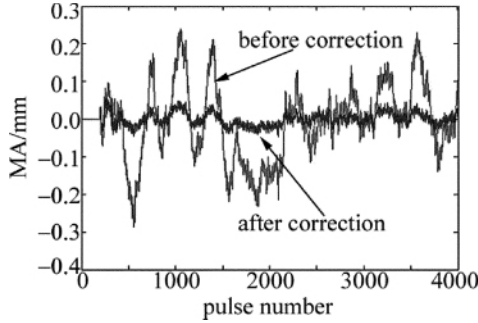


Fig. 3 MA before and after correction without ground jitter

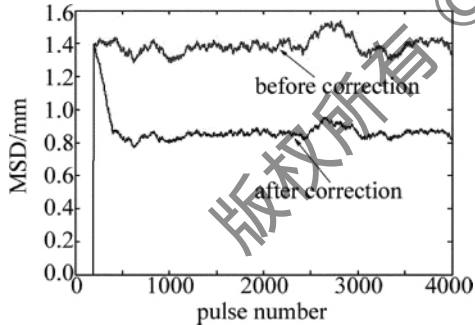


Fig. 4 MSD before and after correction without ground jitter

通过观察这3个图可知,利用该算法校正指向漂移后,光学系统入射端的位置偏移有所降低,MA值降幅较大。同时可以看出校正后的MA值和MSD值在初始阶段出现持续的较大跳变,随后在 $n \sim 2n$ 个脉冲附近逐步趋稳。而MSD值则在 $n \sim 2n$ 个脉冲间陡降,随后的变化幅度很小。

3.2 加载地面扰动后

来自地面的抖动会带来光学元件振动,也会影响进入光学系统的光束稳定性。为了对比地面抖动对校正光束指向漂移的影响,现考虑加载地面扰动后的校正图样。所加载的地面扰动设定为正弦漂移量,加载

前后未校正时位置偏差与MA值变化图分别如图5和图6所示。

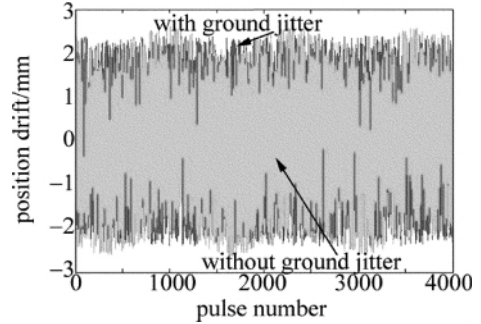


Fig. 5 Position drifts changes with and without ground jitter

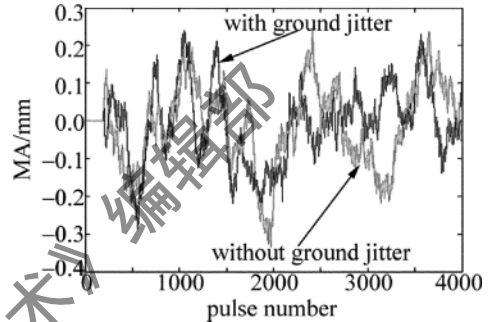


Fig. 6 MA changes with and without ground jitter

图7、图8和图9分别为加载地面扰动之后,校正前后的位置偏差、MA值及MSD的对比图。观察上图可知,加载地面扰动之后,利用该算法仍可以较好地校正指向漂移,位置偏移明显降低,校正后的MA值在 $n \sim 2n$ 个脉冲间有较大跳变,随后的变化幅度很小,最优处约降至原来的 $1/14$, 近于 $n^{-1/2}$ 。MSD值则在 $n \sim 2n$ 个脉冲间陡降,随后趋稳。

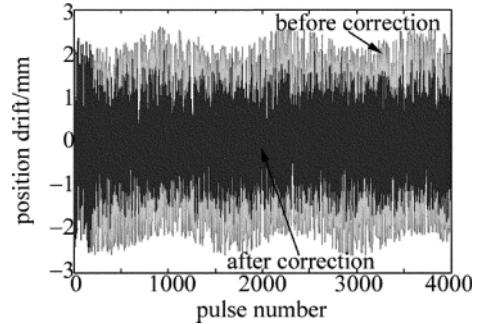


Fig. 7 Position drifts before and after correction with ground jitter

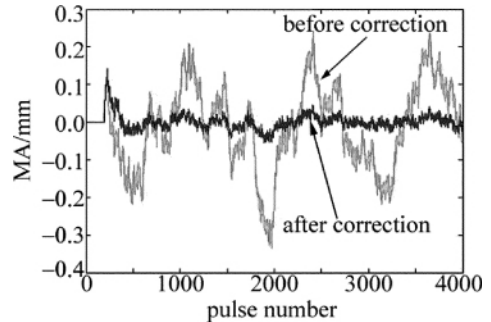


Fig. 8 MA before and after correction with ground jitter

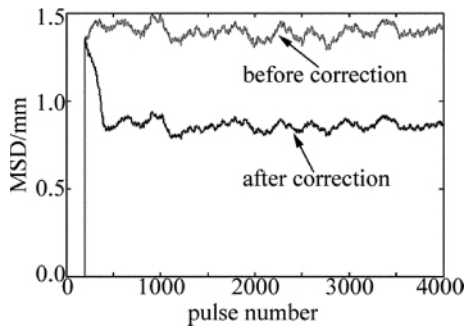


Fig. 9 MSD before and after correction with ground jitter

本文中以光束传递系统中校正脉冲激光器自身指向漂移的过程为例,根据探测到的偏移量,控制快速反射镜以调整光路校正漂移。模拟仿真中设定激光器自身的指向漂移量,并从结果中可看出已得到校正,说明该算法可以降低激光器自身所引起的光束漂移。在仿真结果中,还给出了加载地面抖动的前后的校正量对比图,从图像可以看出,该算法可以有效降低大地抖动引入的漂移,同理,可降低系统引起的随机抖动。综上所述,该算法对激光器自身以及外界环境引起的漂移有很好的校正效果。其不足之处在于未曾考虑光路中的其它元件变形所引入的漂移误差。

4 结论

基于MA值校正原理,提出一种算法对激光光束的指向漂移进行实时闭环校正。由仿真结果可以看出,该算法可以较好地校正指向漂移,经过长距离传输后,其引入的位置偏移明显降低;校正后的MA值经历一段脉冲数目的跳变后,逐步趋稳,相对于校正前的MA值降幅较大;校正后的MSD值降幅也较明显。该算法具有实用性,可以用于实际光路中。

激光器的指向稳定性不仅与激光器的内部设计及

其结构有关,而且也与测量的激光器的工作条件及所处环境有关,同时与系统的光学及机械装置的稳定性有关。温度的变化及光路中的气流的影响都会使得光强分布发生变化,从而引起光束方向的变化。因此,在实际运用中,校正激光光束指向漂移的算法考虑的影响因素应比本文中的多。

参考文献

- [1] ZHAO W Q, TAN J B, MA H W, *et al.* Laser collimation method based on the drift feedback control [J]. *Acta Optica Sinica* 2004, 24 (3): 373-377 (in Chinese).
- [2] ZHANG G X, CHEN G, HE H, *et al.* The beam-pointing stability for laser output measure by CCD camera [J]. *Journal of Applied Optics*, 1998, 19(2): 15-18 (in Chinese).
- [3] XIA J T. Automatic collimation controlling technology of photoelectricity detecting system [D]. Nanjing: Nanjing University of Information, 2008: 1-2 (in Chinese).
- [4] HUANG Z L. Error detection based on He-Ne laser beam drift [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004: 3-5 (in Chinese).
- [5] PAN J, VIATELLA J, DAS P P, *et al.* Performance and reliability of beam delivery unit for advance lithography [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5377: 1894-1901.
- [6] CYMER Inc. Lithography laser with beam delivery and beam pointing control: US, 2004/0022291A [P]. 2004-02-05.
- [7] LUBLIN L, WARKENTIN D, DAS P P, *et al.* High-performance beam stabilization for next-generation ArF beam delivery systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5040: 1682-1693.
- [8] WEIGL B, SANDSTROM R. Illumination apparatus and method for controlling energy of a laser source: US, 2009/0201955A1 [P]. 2009-08-13.
- [9] DAS P P, WEBB R K, GLOWANARDL M, *et al.* Lithography laser with beam delivery and beam pointing control: US, 2003/0022291A [P]. 2003-04-09.
- [10] HEINTZE J. Lithographic apparatus, device manufacturing method, performance measuring method, calibration method and computer program: China 03140753 [P]. 2003-12-17.

(上接第337页)

- [11] MACKEY D J C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices [J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1999, 45 (3): 399-431.
- [12] KAMRAN K. Performance analysis of free-space, on-off-keying optical communication systems impaired by turbulence [C]//*SPIE Free-Space Laser Communication Technologies XIV*. New York, USA: SPIE 2001: 150-161.
- [13] FOSSORIER M. Iterative reliability based on decoding of LDPC codes [C]//*2001 IEEE International Symposium on Information Theory*. New York, USA: SPIE 2001: 233.
- [14] GAO Ch, HAN Q Q, MA J, *et al.* Decoding of turbo code in atmospheric optical communication [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(4): 63-67 (in Chinese).
- [15] ANGUITA J A, DJORDJEVIC I B, NEIFELD M A. High-rate error-correction codes for the optical atmospheric channel [J]. *SPIE* 2005, 5892: 58920V/1-58920V/7.
- [16] MOORES J D, WALTHER F G, GRECO J A, *et al.* Architecture overview and data summary of a 5.4km free-space laser communications experiment [J]. *SPIE* 2009, 7464: 746404/1-746404/9.
- [17] CHAN V W S. Optical space communications [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* 2000, 6(6): 959-975.