

数模转换器分辨率对捕获、跟踪、瞄准系统跟踪精度的影响

陈少杰^{1,2}, 张 亮¹, 王建宇¹

¹中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在介绍捕获、跟踪、瞄准(ATP)精跟踪子系统结构、控制原理及控制算法的基础上,通过搭建半物理模型来分析不同分辨率数模转换器对应的跟踪性能,分别对同一位置光束与加入扰动后的光束进行跟踪对比实验。结合精跟踪控制系统的信号传输,分析不同分辨率的数模转换器对 ATP 系统跟踪精度的影响。实验结果表明,数模转换器的分辨率越高,ATP 系统的跟踪性能就越好;使用 14 位数模转换器时,继续增加分辨率,ATP 系统的跟踪精度没有得到显著提升。对跟踪后的光斑质心信号进行频谱分量统计,发现干扰抑制带宽之外的频段内数模转换器的分辨率与其对应的频谱分量成正比,因此需要进一步提高精跟踪系统的干扰抑制带宽来实现更高精度的跟踪。

关键词 光通信; 捕获; 跟踪; 瞄准; 跟踪精度; 数模转换器

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0806004

Effects of Digital to Analog Converter Resolution on ATP System Tracking Accuracy

Chen Shaojie^{1,2}, Zhang Liang¹, Wang Jianyu¹

¹Key Laboratory of Space Active Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract On the basis of presenting structure, control principle and control algorithm of acquisition, tracking and pointing (ATP) fine tracking subsystem, a semi physical model is built to analyze the tracking performance of digital to analog converters with different resolution, and tracking contrast experiments are carried out on the beams at the same position and the beam after disturbance. Combined with the signal transmission of fine tracking control system, the effects of digital to analog converters with different resolution on the tracking accuracy of ATP system are analyzed. The experimental results show that the higher the resolution of digital to analog converter is, the better the tracking performance of the ATP system is. However, when a 14 bit digital to analog converter is used and the resolution is increased, there is little contribution to improving tracking accuracy. By analyzing the spectral component of spot centroid signal after tracking, we find that the resolution of digital to analog converter within frequency band and outside the disturbance suppression bandwidth is proportional to the corresponding spectral component, so it is necessary to improve the disturbance suppression bandwidth of fine tracking system to achieve high accuracy tracking.

Key words optical communications; acquisition; tracking; pointing; tracking accuracy; digital to analog converter

OCIS codes 060.2605; 350.5730

收稿日期: 2017-02-23; 收到修改稿日期: 2017-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61302181)

作者简介: 陈少杰(1990—),男,博士研究生,主要从事光束精跟瞄方面的研究。E-mail: chenchen-shaojie@163.com

导师简介: 王建宇(1959—),男,博士,研究员,主要从事物理电子学和信息获取与处理技术方面的研究。

E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

相比于微波通信,空间激光通信具有更高的速率、更窄的通信束散角以及更轻的空间终端等优势^[1]。随着我国空间站计划的实施,空间站与地面要实行高速、实时、保密的通信,那么空间激光通信无疑是最佳的通信方式。近年来,随着深空探测的兴起,大量的科学数据需要从深空发回地面并进行进一步分析^[2],深空激光通信演示实验的成功也为深空探测大数据回传提供了一个技术方案^[3]。空间激光通信作为一种非常有前景的通信技术,很可能促成未来太空宽带时代的到来^[4]。

由于使用较小束散角的激光进行通信,因此空间激光通信需要利用捕获、跟踪、瞄准(ATP)系统来建立和保持通信链路^[5]。ATP系统在捕获阶段需满足大视场、大范围搜索要求,同时在跟踪阶段需满足大带宽、高精度要求^[6]。美国、日本和欧空局的空间光通信中ATP系统的精度可达 $1\sim 5\ \mu\text{rad}$ ^[7]。目前国内外普遍采取复合轴跟踪的方案,即粗跟踪子系统内嵌套精跟踪子系统^[8-10]。ATP系统的跟踪精度取决于精跟踪子系统的精度,跟踪误差来源于探测误差和控制环路抑制残差。Kazovsky^[11]理论分析了基于四象限探测器跟踪系统的跟踪精度;韩成等^[12]分析了ATP系统跟踪精度的外界影响因素;钱锋等^[13]分析了影响光斑探测相机定位精度的因素;李一芒等^[14]量化了常用的滤波算法对ATP系统光斑位置检测精度的影响;杨明冬等^[15]建立了精跟踪系统的Matlab/Simulink仿真模型,仿真分析了不同分辨率数模转换器对跟踪精度的影响,但未结合实际的ATP系统给出实验结果。

在精跟踪子系统中,精跟踪控制器输出的数字量经过数模转换器转换成模拟量,驱动精跟踪执行机构[快速反射镜(FSM)]偏转一定的角度,将光斑稳定在跟踪点上,所以数模转换器的分辨率将直接影响ATP系统的精跟踪性能。本文给出了基于压电陶瓷快速反射镜的精跟踪子系统的结构、控制原理和控制算法,利用半物理模型实验对比分析了精跟踪系统在不同分辨率数模转换器下的跟踪精度,通过对实验数据进行频谱分量统计来研究精跟踪系统的干扰抑制性能。

2 精跟踪系统的结构

在空间激光通信中,通信双方的光端机成功捕获后,分别将对方的信标光保持在粗跟踪子系统的视场中心,实现稳定粗跟踪后将信标光引入精跟踪视场,利用精跟踪子系统高分辨率、大带宽的性能,进一步抑制粗跟踪残差和平台振动残差,进而保持通信链路的稳定。

ATP精跟踪系统由精跟踪探测器、精跟踪控制器、数模转换器、驱动电路和精跟踪执行机构组成,其结构示意图如图1所示。精跟踪探测器是ATP系统获取通信对方端机位置信息的组件,需具备高探测精度、高帧频的特点,主要包括四象限探测器、CCD和CMOS3种探测器。精跟踪控制系统误差传递函数值为0 dB时所对应的频率即为精跟踪系统的干扰抑制带宽,用来衡量精跟踪环的动态干扰抑制性能。精跟踪控制器设计为数字控制器,需选择合适的控制算法和较快的运行速度,进而保证系统能够实现所需的干扰抑制带宽,目前普遍使用比例积分微分(PID)控制算法。精跟踪执行机构设计为FSM,主要有压电陶瓷驱动和音圈电机驱动两种。其中,压电陶瓷以其响应速度快、功耗低和位移控制精度高等优点在ATP系统研制过程中得到广泛使用^[16]。压电陶瓷驱动器具有迟滞和蠕变特性,其角度分辨率很高,但开环下执行精度有限,而利用应变片检测FSM的偏转角度进行闭环控制既可保证足够高的执行精度,同时也可以提高系统带宽。如德国PI公司的压电陶瓷FSM S330能够在两个正交轴方向上实现微弧度级分辨率(分辨率优于 $0.1\ \mu\text{rad}$)的角度调整,其偏转控制范围可达 $\pm 1\ \text{mrad}$,利用内部集成的微型应变片传感器进行闭环控制,线性度优于 $\pm 0.2\%$,全行程的重复性可达 $\pm 0.2\ \mu\text{rad}$ 。在ATP精跟踪系统中,要达到微弧度量级的跟踪精度,精跟踪执行机构的精度需满足一定要求。在此基础上,想要进一步提高ATP系统的跟踪性能,需要精跟踪系统使用更高分辨率的数模转换器。

3 精跟踪系统的控制原理和控制算法

精跟踪子系统的控制原理框图如图2所示,采样周期为 T_s 的精跟踪探测器探测到粗跟踪残差和平台振动残差 $r(kT)$ 后,计算出跟踪点与信标光斑当前质心值 $y(kT)$ 的偏差 $e(kT)$,数字控制器根据该偏差进

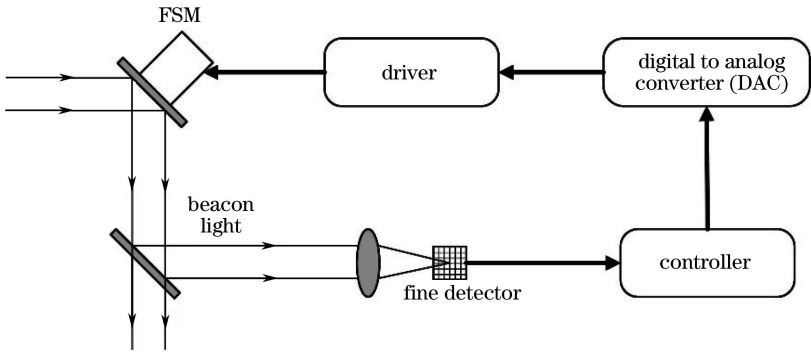


图 1 精跟踪系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of fine tracking system

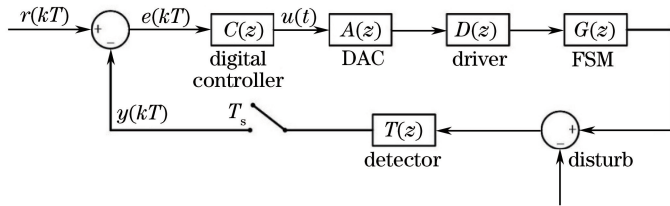


图 2 精跟踪子系统控制原理框图

Fig. 2 Control principle block diagram of fine tracking subsystem

行闭环控制,输出数字量 $u(t)$ 经数模转换器转换为模拟量,再由驱动电路放大后驱动 FSM 偏转一定的角度,将信标光斑稳定在跟踪点上,从而实现一次完整的精跟踪过程。

为了减少计算量、减小计算误差,数字控制器使用数字增量式 PID 控制算法。设 K_p, K_i, K_d 分别为比例、积分和微分系数,根据前一时刻的输出公式

$$u_{k-1} = K_p e_{k-1} + K_i \sum_{j=0}^{k-1} e_j + K_d (e_{k-1} - e_{k-2}), \quad (1)$$

计算得到本次输出相对前一时刻输出的差值为

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1} = (K_p + K_i + K_d) e_k - (K_p + 2K_d) e_{k-1} + K_d e_{k-2}, \quad (2)$$

因此本次 PID 控制器的输出为

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k. \quad (3)$$

依据增量式 PID 控制算法,在计算时只需要保存之前的误差数据 e_{k-1}, e_{k-2} 以及上次的输出数据 u_{k-1} ,即可一次计算出当前的控制算法输出值。

4 数模转换器的分辨率对跟踪精度的影响

4.1 实验测试

为了测试精跟踪系统在不同分辨率数模转换器下的跟踪性能,搭建了跟踪精度的测试实验装置,如图 3 所示。实验装置放置在气浮平台上,对平行光管生成的平行光进行光束压缩后,依次通过干扰快速反射镜、跟踪快速反射镜后进入精跟踪相机,精跟踪相机的焦距为 300 mm,精跟踪探测器像元尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 。由信号发生器生成预先设定好的干扰信号,经过干扰快速反射镜驱动器驱动干扰快速反射镜摆动,再由跟踪快速反射镜对扰动后的光束进行跟踪。跟踪快速反射镜偏转角度随电压呈线性变化,满行程电压 100 V 对应的偏转角度为 $\pm 5 \text{ mrad}$ 。干扰快速反射镜驱动器内部使用 24 位数模转换器,闭环控制下的采样率可达 25 kHz,能够生成较为平滑的扰动。信号发生器生成的干扰信号及其概率密度如图 4 所示,干扰信号近似服从高斯分布。为了保证跟踪精度,光斑大小占 3×3 的探测器像元数,精跟踪相机使用质心算法来提取光斑位置,通过质心序列的标准差来分析跟踪性能。精跟踪相机采用 60×60 像元开窗,帧频在

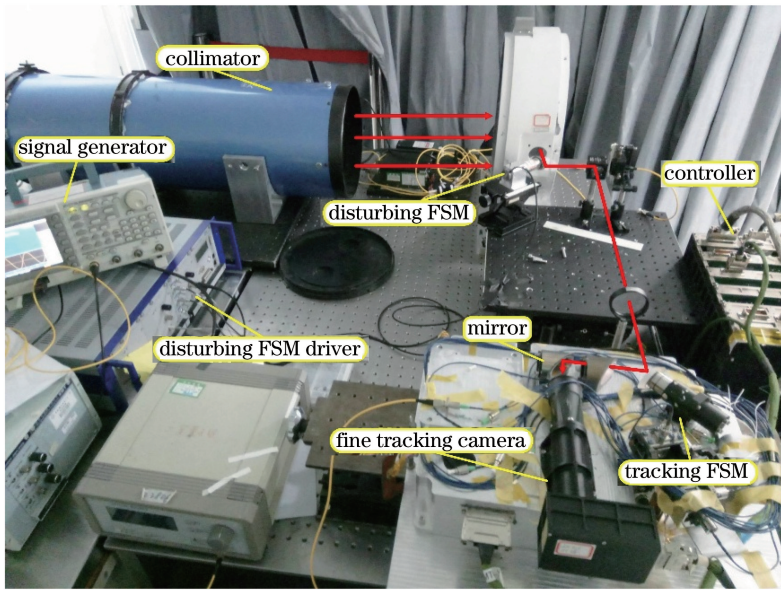


图 3 实验系统

Fig. 3 Experimental system

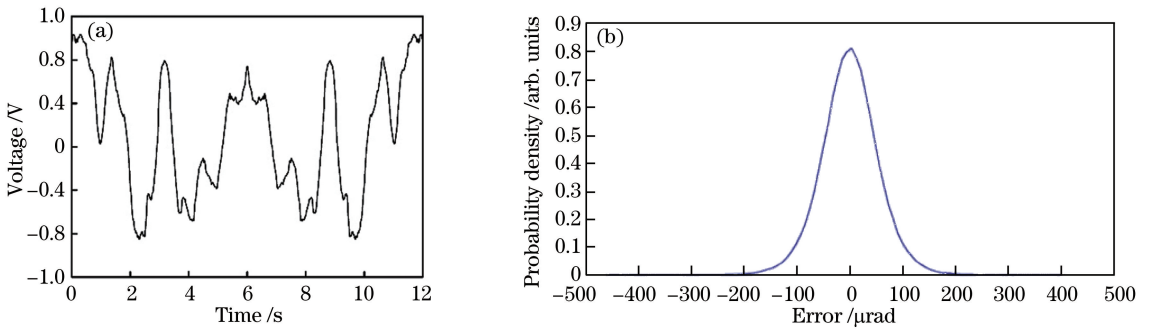


图 4 干扰信号。(a)信号发生器生成的干扰信号;(b)干扰信号的概率密度

Fig. 4 Disturbing signal. (a) Disturbing signal generated by signal generator; (b) probability density of disturbing signal

2 kframe/s以上,干扰抑制带宽可达 200 Hz 以上。

精跟踪控制器分别使用 12,14,16 位数模转换器,对相同情况下的干扰信号进行跟踪测试。对于不同分辨率的数模转换器,在不改变其他系统配置的情况下,通过调整对应的 PID 参数可达到较优的控制效果。由于精跟踪系统的两个正交轴相互独立且具有相同的特性,因此只对其中一轴(X 轴)进行实验分析。在不加干扰时,跟踪快速反射镜对同一位置的光斑进行跟踪,得到 1 s 内的光斑质心离跟踪点的偏差数据如图 5 所示,12,14,16 位数模转换器对应的数据标准差分别为 0.0579,0.0449,0.0359 pixel。静态跟踪误差主要取决于系统的噪声水平,包括探测器噪声、执行机构噪声和电子电路噪声,当然数模转换器的量化噪声也是系统噪声的一部分,当数模转换器位数越多时,量化噪声越小。总的噪声水平等于各个噪声的矢量和,显然减小最强的噪声源对减小总的噪声水平效果较显著,而减小相对较弱的噪声源对减小总的噪声水平效果不明显。精跟踪探测器噪声的存在,导致对同一位置光斑质心的提取存在随机偏差,跟踪快速反射镜对此进行抑制,当数模转换器的分辨率越高时,抑制后的光斑质心离跟踪点的偏差越小,跟踪性能越好。

使用图 4 所示的干扰信号驱动干扰快速反射镜,跟踪快速反射镜对加入扰动后的光束进行跟踪,得到 30 s 内的光斑质心离跟踪点的偏差数据如图 6 所示,12,14,16 位数模转换器对应的数据标准差分别为 0.0836,0.0722,0.0688 pixel。

当精跟踪系统使用 16 位数模转换器时,使精跟踪相机处于像元数为 $60 \times 60, 56 \times 56, 52 \times 52, 48 \times 48$ 的像元开窗模式下,对加入扰动后的光束进行跟踪,跟踪精度如图 7 所示。动态跟踪误差不仅与系统的噪声有

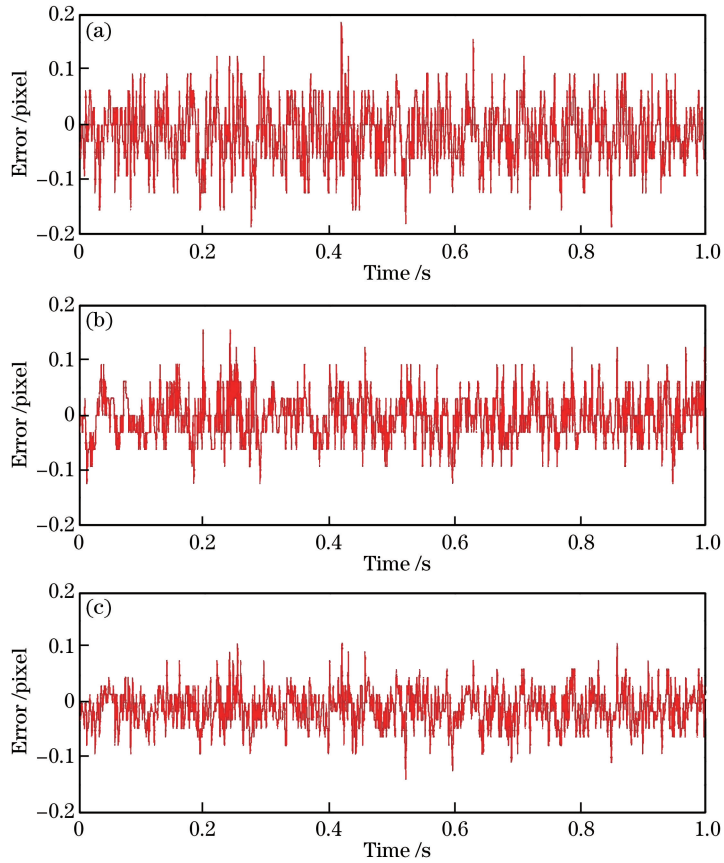


图 5 光斑质心离跟踪点的偏差。(a) 12 位数模转换器;(b) 14 位数模转换器;(c) 16 位数模转换器

Fig. 5 Deviation between spot centroid and tracking point. (a) 12 bit digital to analog converter; (b) 14 bit digital to analog converter; (c) 16 bit digital to analog converter

关,还与探测器、执行机构的工作速度及 PID 参数的选择有关,在探测器、执行机构及其工作模式已选定的情况下,若要提高跟踪性能,则需进一步调整 PID 参数。

4.2 理论分析

在 ATP 精跟踪系统控制结构中,数字控制器输出的数字信号经过数模转换器转换成模拟信号,将模拟信号传输给 FSM 驱动器并进行电压放大,放大信号可驱动 FSM 偏转实现跟踪动作。但是,由于数模转换器的分辨率有限,输出的电压值是不连续变化的,相邻两个数字量转化成的模拟电压值相差 1 位最低有效位 (LSB)。当输出的模拟电压值在 $0 \sim V$ V 之间变化时, N 位数模转换器对应的 1 位 LSB 模拟电压值为

$$V_{\text{LSB}} = \frac{V}{2^N} \quad (4)$$

由于数模转换器存在量化误差和增益误差等,不精确度最多可降低至 $1/2$ LSB 以内,而对所有误差的进一步减小都将被量化噪声所掩盖。在实验测试系统中, $1/2$ LSB 的误差信号经过 M 倍的驱动电路放大后驱动满电压行程为 $0 \sim V_{\text{FSM}}$ V 的 FSM,则由数模转换器量化噪声引起的光斑质心在精跟踪探测器上的偏差为

$$d_{\text{Quantization}} = \frac{MV_{\text{LSB}}\alpha_{\text{FSM}}f}{V_{\text{FSM}}} \quad (5)$$

式中 α_{FSM} 为 FSM 的角度偏转范围, f 为精跟踪相机焦距。FSM 镜片对光束的偏折是由于(5)式引入了 2 倍的因子。

12,14,16 位数模转换器对应的量化噪声引起的光斑质心在精跟踪探测器上的最大偏差分别为 0.044, 0.011,0.003 pixel。数模转换器的分辨率越高,1 位 LSB 对应的电压值就越小,引起的光斑质心在精跟踪探测器上的偏差越小,对跟踪精度造成的影响也就越小。因此,在使用高分辨率的数模转换器后,对同一干扰信号进行跟踪时,光斑质心离跟踪点的偏差数据的标准差也就越小,如图 5 所示。

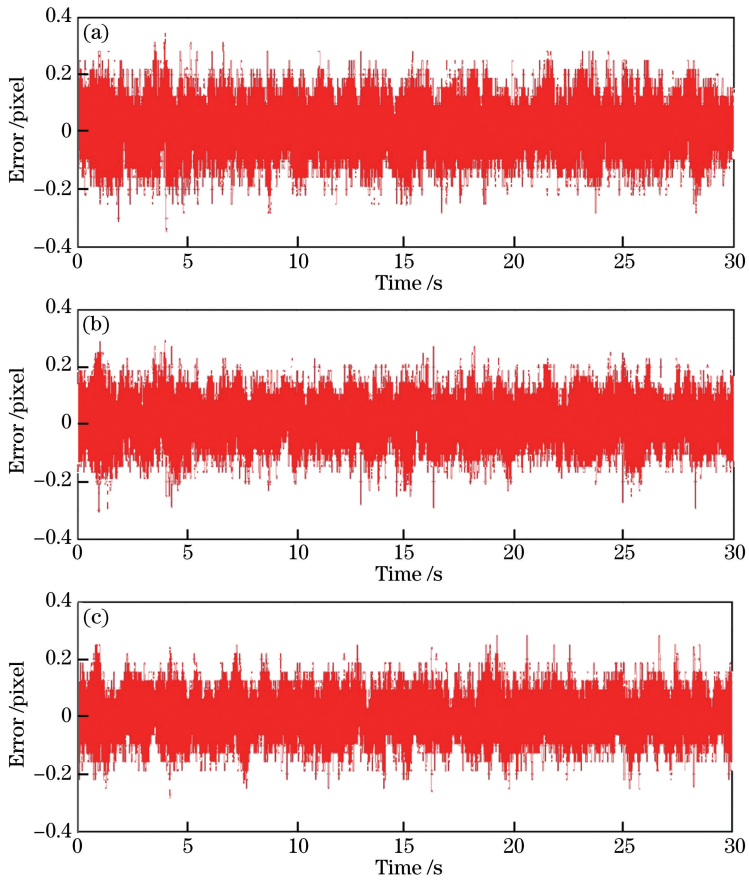


图 6 加入干扰后光斑质心离跟踪点的偏差。(a) 12 位数模转换器; (b) 14 位数模转换器; (c) 16 位数模转换器
 Fig. 6 Deviation between disturbed spot centroid and tracking point. (a) 12 bit digital to analog converter; (b) 14 bit digital to analog converter; (c) 16 bit digital to analog converter

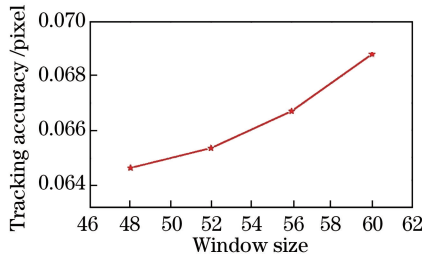


图 7 不同开窗大小下的跟踪精度
 Fig. 7 Tracking accuracy under different window sizes

分析不同分辨率数模转换器下精跟踪系统的干扰抑制情况,在干扰快速反射镜扰动时,对不启动跟踪及启动跟踪时的光斑质心偏差进行频谱分量统计,结果如表 1 所示。从表中可知,数模转换器从 12 位转换为 14 位时,跟踪精度提高了 1.28 dB,但数模转换器从 14 位转换为 16 位后,跟踪精度仅提高了 0.42 dB,并无显著的性能优化,此时数模转换器的分辨率已经不是限制跟踪精度的主要因素。在干扰抑制带宽的频段之内,数模转换器的分辨率越高,干扰抑制性能越好;在干扰抑制带宽的频段之外(200~1000 Hz),12,14,16 位数模转换器对应的频谱分量数值却依次递增。当精跟踪相机开窗像元数变小时,帧频成比例提高,进而提升了精跟踪系统的干扰抑制带宽,如图 7 所示。在开窗像元数变小后,使用同一分辨率的数模转换器得到的跟踪精度有所提高。由此可见,在数模转换器分辨率足够的情况下,若要实现更高精度的跟踪,则需进一步提高精跟踪系统的干扰抑制带宽。

表 1 频谱分量统计
Table 1 Spectral component statistics

pixel

Condition of tracking	Tracking accuracy						
	0-10 Hz	10-20 Hz	20-50 Hz	50-100 Hz	100-200 Hz	200-1000 Hz	H0-1000 Hz
Not tracking	0.1341	0.2865	0.3483	0.1341	0.1554	0.0323	9.7317
With 12 bit digital to analog converter	0.0221	0.0149	0.0470	0.0185	0.0465	0.0371	0.0825
With 14 bit digital to analog converter	0.0221	0.0132	0.0290	0.0144	0.0454	0.0377	0.0720
With 16 bit digital to analog converter	0.0221	0.0131	0.0215	0.0131	0.0441	0.0379	0.0685

5 结 论

在 ATP 精跟踪系统中,数模转换器的分辨率越高,跟踪精度越高,则干扰抑制性能越好。但是,当分辨率增加到 14 位时,继续提高数模转换器的分辨率并不能显著提高跟踪精度。当使用 16 位的数模转换器对同一位置的光斑进行跟踪时,跟踪精度可达 0.0359 pixel;对扰动后的光束进行跟踪时,相比于 12 位的数模转换器,跟踪精度提高了 1.69 dB,达到 0.0688 pixel。对跟踪后的光斑质心信号进行频谱分析,在干扰抑制带宽的频段之外,数模转换器的分辨率与对应的频谱分量数值成正比,对于 16 位的数模转换器,在 200~1000 Hz 频段内的频谱分量占全频段约 55.33%。因此,在数模转换器分辨率足够的情况下,若要实现更高精度的跟踪,则需进一步增大精跟踪系统的干扰抑制带宽。该研究有助于 ATP 精跟踪子系统数模转换器的选取、精跟踪探测器帧频的确定以及控制算法 PID 参数的整定,对发展高精度 ATP 系统具有一定的指导作用。

参 考 文 献

- [1] Bhatnagar M R, Arti M K. Performance analysis of hybrid satellite-terrestrial FSO cooperative system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(22): 2197-2200.
- [2] Hemmati H. Deep space optical communications[M]. Los Angeles: Wiley-Interscience, 2006: 1-4.
- [3] Murphy D V, Kinsky J E, Grein M E, et al. LLCD operations using the lunar lasercom ground terminal[C]. SPIE, 2014, 8971: 89710V.
- [4] Bai Shuai, Wang Jianyu, Zhang Liang, et al. Development progress and trends of space optical communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 070001.
白 帅, 王建宇, 张 亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 070001.
- [5] Mohan S, Alvarez-Salazar O, Birnbaum K, et al. Pointing, acquisition, and tracking architecture tools for deep-space optical communications[C]. SPIE, 2014, 8971: 89710H.
- [6] Dong Ran, Ai Yong, Xiao Yongjun, et al. Design and communication experiment of fine tracking system for free space optic[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2718-2722.
董 冉, 艾 勇, 肖永军, 等. 自由空间光通信精跟踪系统设计及其通信实验[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2718-2722.
- [7] Tolker-Nielsen T, Oppenhauser G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[C]. SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- [8] Li Rui, Li Hongzuo, Tang Yanfeng, et al. Compound-axis APT system in space optical communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1333-1336.
李 锐, 李洪祚, 唐雁峰, 等. 空间光通信复合轴 APT 系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1333-1336.
- [9] Yu Siyuan, Tan Liying, Ma Jing, et al. Study of vibration compensation technology in intersatellite laser links[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2004, 15(4): 472-476.
于思源, 谭立英, 马 晶, 等. 激光星间链路中振动补偿技术研究[J]. 光电子 • 激光, 2004, 15(4): 472-476.
- [10] Sofka J, Nikulin V V, Skormin V A, et al. Laser communication between mobile platforms[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2009, 45(1): 336-346.

- [11] Kazovsky L. Theory of tracking accuracy of laser systems[J]. *Optical Engineering*, 1983, 22(3): 339-347.
- [12] Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin, *et al.* Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(1): 89-94.
韩 成, 白宝兴, 杨华民, 等. 空地激光通信跟踪精度主要外界影响因素研究[J]. *光子学报*, 2010, 39(1): 89-94.
- [13] Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.* Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0205007.
钱 锋, 贾建军, 张 亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0205007.
- [14] Li Yimang, Sheng Lei, Gao Shijie. Influence of filtering algorithm for spot position detection accuracy of acquisition, tracking and pointing system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 110602.
李一芒, 盛 磊, 高世杰. 捕获、跟踪、瞄准系统滤波算法对光斑位置检测精度的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 110602.
- [15] Yang Mingdong, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.* Research of DAC resolution effect on ATP system tracking accuracy [J]. *Optical Communication Technology*, 2015, 39(1): 21-23.
杨明冬, 贾建军, 张 亮, 等. DAC分辨率对ATP系统跟踪精度影响的研究[J]. *光通信技术*, 2015, 39(1): 21-23.
- [16] Wen Jianghua, Zhao Chuangshe, Jiang Fen'e, *et al.* Study of driving and controlling with fast steering mirror based on PZT[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2015, 34(8): 59-64.
文江华, 赵创社, 姜粉娥, 等. 基于压电陶瓷的快速反射镜驱动与控制研究[J]. *兵工自动化*, 2015, 34(8): 59-64.