

基于自适应振动抑制的星载远距离测距跟踪方法研究

贾远东^{1,2}, 强佳¹, 张亮^{1,2}, 贾建军^{1,2*}

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 在星载远距离非合作目标测距领域中, 目标常常为暗弱目标, 成像帧频有限, 因此目标跟踪能力受限并影响测距范围。在星载远距离非合作目标跟踪过程中, 跟踪误差主要来自于本体振动。为了增强系统主动振动抑制能力, 提高系统的跟踪精度, 使用自适应控制来实现目标的跟瞄控制。对于不同频率传感器数据难以融合的问题, 通过采用降采样的方法实现了低频相机数据和高频惯性传感器数据的自适应融合, 并证明了降采样下自适应滤波的有效性和正确性。在算法实现层面, 针对经典自适应算法收敛速度慢和稳态精度差的问题, 通过选用仿射投影算法实现了数据融合。在数据融合仿真中, 采用卫星微振动模型, 验证了融合方法的收敛速度及跟踪精度。最后将该方法应用到实际跟踪系统中, 实验结果显示, 跟踪精度优于 $5 \mu\text{rad}$, 满足远距离非合作目标测距中的跟踪精度要求。

关键词 测量; 激光测距; 非合作目标; 卫星振动; 自适应滤波; 跟踪系统

中图分类号 P228.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2212003

Spaceborne Long-Distance Tracking Method Based on Adaptive Vibration Suppression

Jia Yuandong^{1,2}, Qiang Jia¹, Zhang Liang^{1,2}, Jia Jianjun^{1,2*}

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

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

Abstract In the field of spaceborne long-distance non-cooperative target ranging, usually the target is weak and the imaging frame rate is limited, and thus the target tracking ability is limited and influences the ranging distance. When the spaceborne long-distance non-cooperative target is tracked, the main source of tracking errors is body vibration. In order to enhance the active vibration suppression ability and improve the tracking accuracy of the system, adaptive control is used to realize aiming control of targets. Aiming at the problem of difficult data fusion among different frequency sensors, we use down-sampling to achieve adaptive fusion of low-frequency camera data and high-frequency inertial sensor data, and simultaneously confirm the effectiveness and correctness of adaptive filtering under down-sampling. At the level of algorithm implementation, an affine projection algorithm is selected to achieve data fusion considering the problems of slow convergence and poor steady-state accuracy of the classical adaptive algorithm. In the data fusion simulation, the micro-vibration model of the satellite is used to verify the convergence speed and the tracking accuracy of the fusion method. Finally, this method is applied for the actual tracking system and the experimental results show that the tracking accuracy is superior to $5 \mu\text{rad}$, which meets the tracking accuracy requirement of long-distance non-cooperative target ranging.

Key words measurement; laser ranging; non-cooperative target; vibration of satellite; adaptive filtering; tracking system

OCIS codes 120.2440; 280.3400; 350.6090

收稿日期: 2020-06-24; 修回日期: 2020-07-20; 录用日期: 2020-07-31

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504305)

* E-mail: jjjun10@mail.sitp.ac.cn

1 引 言

远距离非合作目标包括空间碎片和空间飞行器等,对此类目标进行星载激光测距时,传统的技术方法通常是采用较大的发散角以实现目标的有效覆盖^[1-2]。而由激光雷达方程可得,接收到的回波平均光子数与激光发散角的二次方成反比,因此增大激光发散角会导致系统接收到的回波平均光子数减少,进而影响系统的测距范围和测距精度。为了获得更大的测距范围和更高的测距精度,激光的发散角需要压缩至 $2''\sim 4''$,这时需要对空间碎片目标实现角秒量级的跟踪精度。

美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的研究表明,卫星振动是影响跟踪精度的最主要因素^[3]。在空间激光通信中,通常利用通信双方的信标光测量高帧频的角偏差,进而实现对振动的主动抑制^[4]。而对于星载远距离非合作目标的跟踪,特别是目标尺寸较小或者目标未处于阳照区时,需要较长的积分时间,因此目标的成像帧频受限,单独使用目标脱靶量数据进行跟踪时跟踪精度较差。又由于目标距离较远,系统的跟踪误差主要来自于本体振动,因此首先利用具有高精度和高带宽的惯性传感器获取平台振动信息,然后利用相应的算法对获取到的振动数据进行处理^[5-6],在抑制振动的同时实现对目标的高精度跟踪。国内外研究者针对此方法进行了相关研究,但由于跟踪环境复杂,尚未形成成熟的技术体系。

1993年,Skormin等^[7]为了减小平台振动对PAT(Pointing Acquisition Tracking)系统控制精度的影响,提出了前向补偿技术,但其实现条件是平台振动状态已知,当平台振动特性未知时该方法不再适用。2012年,Lin等^[8]提出基于模糊自适应控制和PID(Proportion Integration Differentiation)控制

的主动隔振系统,该系统可以在很宽的频率范围内隔离外界振动的干扰,但模糊准则在实际工程中不易确定。2014年,覃浩等^[9]在星地光通信中将自适应算法引入前馈控制,中高频振动得到很好的抑制,但是该方法受限于控制对象的辨识精度和自适应算法的收敛速度,且算法复杂度较高。2016年,Deng等^[10]通过传统多闭环控制中引入扰动观测思想,增强了系统对低频扰动的抑制能力,但是增加了系统的控制复杂度,不利于工程化应用。

为了提高跟踪精度,降低卫星振动对激光测距系统的影响,本文通过基于降采样的仿射投影自适应滤波算法,实现了低帧频相机数据与高采样率惯性传感器数据的融合,在相机与惯性传感器具有不同采样率的情况下证明了所提方法的可行性,并通过数据仿真验证了该方法的可行性。最后系统综合实验结果表明,在卫星振动是主要干扰源的情况下,星载远距离非合作目标测距对跟踪精度的要求得到满足。

2 基于自适应滤波的跟踪方法

星载远距离激光测距跟踪系统如图1所示。首先在卫星机动控制下实现对目标的粗指向。然后利用跟踪相机对目标成像,进而得到目标相对于跟踪系统的角位置信息,即脱靶量信息,该信息是由目标自身运动与跟踪系统的振动共同产生的。通过惯性传感器得到跟踪系统的振动信息。通过对跟踪相机数据与惯性传感器数据进行融合,分别得到由目标运动引起的脱靶量变化信息和由跟踪系统振动引起的脱靶量变化信息,将其作为控制量传输给压电陶瓷以控制快反镜(Fast Steering Mirror, FSM)发生转动,最终使得目标所成的像稳定在跟踪相机的视场中心。此时,激光器发出的激光命中目标并产生回波信号,回波信号被望远镜接收,利用相应的算法解算出目标的距离信息。

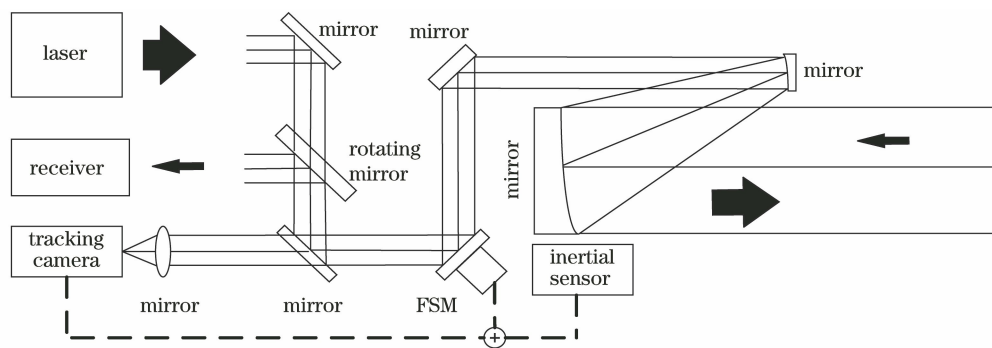


图1 激光测距跟踪系统的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of laser ranging and tracking system

由于需要延长积分时间来获得较高的信噪比,相机帧频受到了限制,因此相机无法如实给出目标运动和本体振动信息,单纯使用相机数据无法实现对振动的抑制和对目标的高精度跟踪。因此有必要使用高带宽的惯性传感器,利用惯性传感器探测卫星平台传递给测距跟踪系统的振动信息,并将其与相机得到的目标相对位置信息相结合,进而实现振动抑制与目标跟踪。但由于惯性传感器与相机通常不在同一位置处,且受望远镜的扩束作用、光路安装误差以及光学畸变和像差等因素的影响,对于同一振动,即使相机帧频足够高,其得到的信息与惯性传感器得到的信息在幅度上也不呈线性关系。另一方面,在对空间碎片目标进行成像的过程中,经过目标图像信息的获取、光电转换、信号处理以及传输等过程,相机得到的振动信息相较于惯性传感器得到的振动信息在时间上会出现滞后。

常用的解决方法是假定对于同一振动,惯性传感器读数与相机读数呈线性关系。在离线情况下,对于同一振动,标定出惯性传感器读数与相机读数之间的比例系数,将惯性传感器测得的振动信息转化为相机处的振动信息,再利用单点反馈法对振动进行抑制。其优点在于算法简单,资源占用率低,但是同时也存在需要先验数据、补偿能力弱及滞后性明显的缺点。

自适应滤波可以在没有或者拥有很少信号先验统计知识的条件下,通过自学习来适应外部随机环境的变化,实现最优的滤波性能,并且算法结构简单,易于实时处理。由于相机处的振动与惯性传感器处的振动的频率是相同的,因此针对惯性传感器得到的振动信息与相机得到的脱靶量信息,采用自适应滤波进行数据融合,实现精确跟踪。系统自适应控制的原理图如图 2 所示。

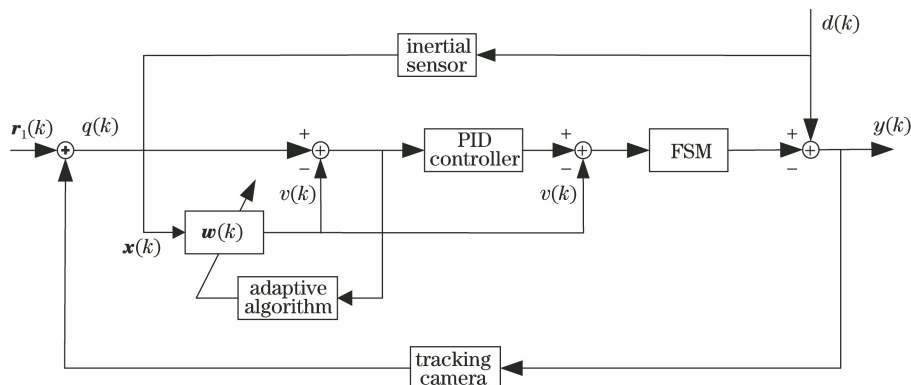


图 2 系统自适应控制原理图

Fig. 2 Principle diagram of adaptive control of system

在图 2 中, $r_1(k)$ 为参考点位置, $w(k)$ 为滤波器权向量, $d(k)$ 为跟踪系统振动信号, $q(k)$ 为相机上的目标相对于参考点的位置信号, $x(k)$ 为惯性传感器采集到的振动信号, $v(k)$ 为相机处的振动信号, $y(k)$ 为目标相对角位置信号, k 为离散时间序号。

3 降采样情况下自适应滤波的适用性分析

由于在本系统中,跟踪相机为了获得高信噪比图像,需要降低帧频(50 Hz)以延长积分时间,这相当于是对高帧频相机数据 $q(k)$ 进行低通滤波后再进行降采样。由于远距离空间目标在跟踪相机上所成像的角位置信号变化频率为低频(<1 Hz),因此角位置信号几乎不会受到相机帧频变化的影响。而测距跟踪系统的振动频率主要分布在 $1\sim 100$ Hz,这使得降低帧频后,跟踪相机给出的振动信息并不

是真实的振动信息。惯性传感器采样率为 1 kHz,能够准确给出系统振动信息。当目标的角位置变化频率为 0.1 Hz 时,在 5 Hz 和 40 Hz 振动的共同影响下,帧频为 50 Hz 的相机及采样率为 1 kHz 的惯性传感器所得到的数据如图 3 所示,其中纵坐标为幅度,单位为 μrad ,横坐标为时间,单位为 s。

图 3(a)所示是时长为 20 s 的相机数据,由目标的角位置信息和跟踪系统振动信息共同组成,但由于帧频的限制,相机数据并不是真实的振动数据。图 3(b)所示是惯性传感器的数据,其可以准确反映出 5 Hz 和 40 Hz 的振动信息。理论上可以得到目标的角位置信息,但此时无法对两者直接进行自适应滤波。图 3(c)所示为时长为 1 s 的相机数据,因采样频率较低,相机数据无法表征高频振动特征。图 3(d)所示为降采样后的惯性传感器数据,可以明显看出其与图 3(c)所示数据的相关性。因此,对惯

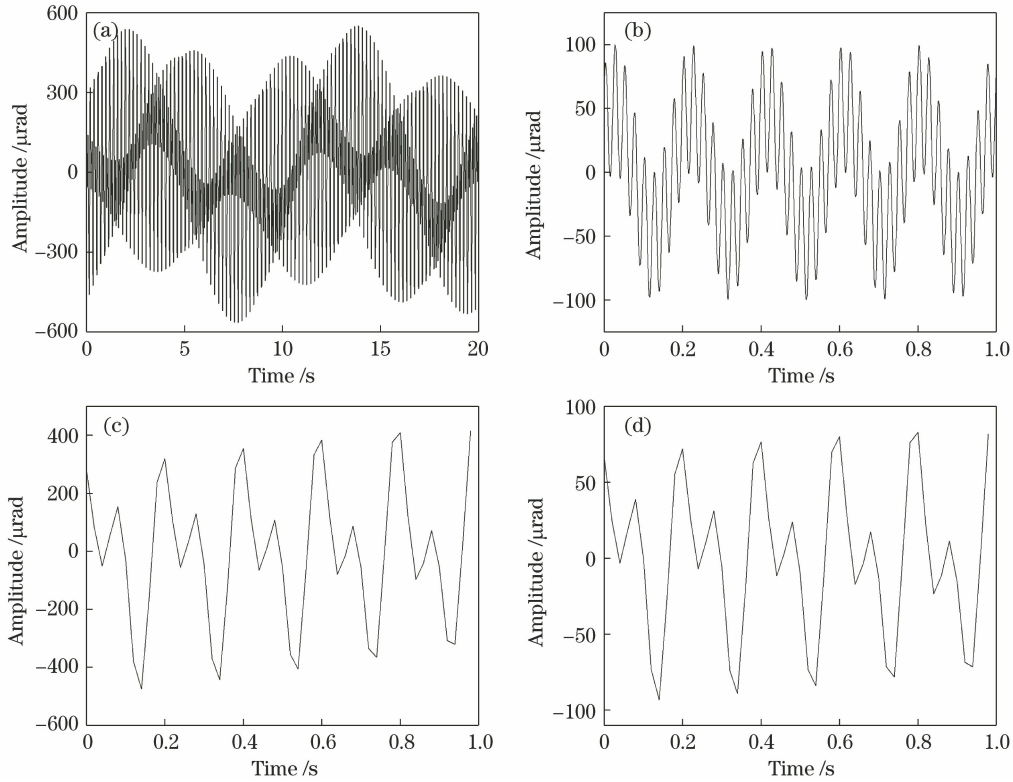


图 3 相机和惯性传感器数据。(a)时长为 20 s 的相机数据;(b)惯性传感器数据;(c)时长为 1 s 的相机数据;(d)降采样后的惯性传感器数据

Fig. 3 Inertial sensor and camera data. (a) Camera data under 20 s time length; (b) inertial sensor data; (c) camera data under 1 s time length; (d) inertial sensor data after down-sampling

性传感器进行降采样处理后,其所得到的振动频率信息与跟踪相机所反映的振动频率信息是相同的,相机数据和惯性传感器数据的相关性可以获得恢复。此时,对相机数据进行自适应滤波,便可以得到降采样情况下的目标角位置信息,如图 4 所示,其中实线 ideal 为理想的目标运动曲线,虚线 cal 为经过自适应滤波后得到的目标运动曲线。

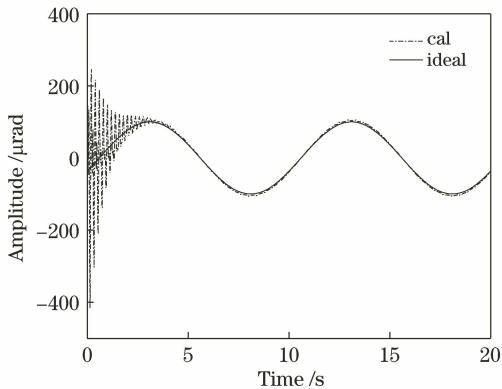


图 4 降采样后的惯性传感器数据

Fig. 4 Inertial sensor data after down-sampling

由图 4 可以看出,目标的角位置信号变化频率较低,因此对其进行插值可以近似得到 1 kHz 采样

率下的目标的角位置数据,同时利用原始的惯性传感器数据与自适应滤波器可以得到相机处的真实振动信息。在降采样情况下,自适应滤波的等效框图如图 5 所示,其中 $r(k)$ 为对惯性传感器数据 $x(k)$ 进行降采样处理后所得的信号。

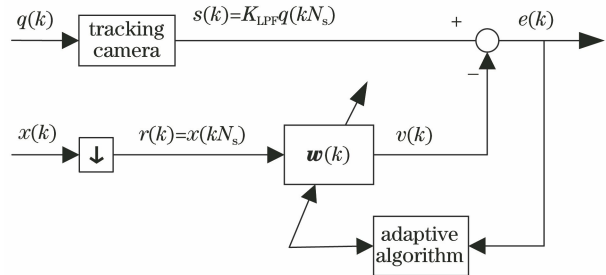


图 5 降采样情况下的自适应滤波原理图

Fig. 5 Principle diagram of adaptive filtering in case of down-sampling

假设 $q(k)$ 和 $x(k)$ 分别为整个系统在 1 kHz 采样率下的相机信号和惯性传感器信号, $s(k)$ 为实际得到的相机信号, N_s 为降采样的点数, M 为滤波器阶数, m 为滤波器权向量的序号, $0 \leq m \leq M-1$ 。

可以得到 $s(k)$ 与 $q(k)$ 在频域上的关系为

$$S(\Omega) = K_{LPF} Q(\Omega/N_s), \quad (1)$$

式中： Ω 为角频率； $S(\Omega)$ 为的傅里叶变换结果； $Q(\Omega/N_s)$ 为 $q(k)$ 的傅里叶变换结果； K_{LPF} 为低通滤波器造成的相机读数的幅度变化。因此对惯性传感器数据 $x(k)$ 进行降采样处理，便可以得到与相机信号 $s(k)$ 频率相同的信号 $r(k)$ 。

假设 $r(k)$ 的频率为 ω_0 ，则

$$W_m(\Omega) = \frac{\mu A}{2} \times \frac{1}{\exp(j\Omega) - 1} \{ \exp(j\varphi_r) \times E\{\exp[j(\Omega - \omega_0)]\} + \exp(-j\varphi_r) E\{\exp[j(\Omega + \omega_0)]\} \}, \quad (3)$$

式中： W_m 为 $w_m(k)$ 的傅里叶变换结果； $E(\cdot)$ 为 $e(k)$ 的傅里叶变换； $\varphi_r = \varphi - \omega_0 i$ 。

对自适应滤波器的输出 $v(k) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m(k)r(k-m)$ 两边进行傅里叶变换，得

$$V(\Omega) = \frac{A}{2} \sum_{m=0}^{M-1} \{ \exp(j\varphi_r) W_m \{ \exp[j(\Omega - \omega_0)] \} + \exp(-j\varphi_r) W \{ \exp[j(\Omega + \omega_0)] \} \}, \quad (4)$$

式中： V 为 $v(k)$ 的傅里叶变换结果。

将(3)式代入(4)式中，并且在滤波器阶数 M 较大时，可以得到自适应滤波的闭环传递函数，即

$$\frac{E(\Omega)}{S(\Omega)} \approx \frac{\exp(j2\Omega) - 2\exp(j\Omega)\cos\omega_0 + 1}{\exp(j2\Omega) - 2(1 - \mu MA^2/4)\exp(j\Omega)\cos\omega_0 + (1 - \mu MA^2/2)} \quad (5)$$

可以看出，(5)式在 $\Omega = \omega_0$ 处有一个零点，这表明惯性传感器的数据经过同样的降采样处理后，利用自适应滤波器可以滤除相机信息 $s(k)$ 中频率为 ω_0 的振动信息，而远距离空间目标在跟踪相机上所成的像的角位置变化频率为低频，远小于于振动频率 ω_0 ，因此远距离空间目标在跟踪相机上所成的像的角位置变化频率不会受到自适应滤波的影响。

4 仿射投影算法

为了提升传统 LMS(Least Mean Square) 自适应滤波算法的收敛速度，Maouche 等^[11] 提出了重复利用过去数据信号的仿射投影 (Affine Projection, AP) 算法。仿射投影算法是一种基于 LMS 准则的算法，其在输入信号具有相关性的情况下具有较快的收敛性能。而卫星的振动在一定时间内通常具有较强的相关性，因此可以很好地利用仿射投影算法实现振动抑制。采用基于降采样的仿射投影算法实现相机数据与惯性传感器数据融合的数据流程图如图 6 所示，其中 \mathbf{I} 为单位矩阵， γ 为很小的参数。

在图 6 中，惯性传感器得到的数据 $x(k)$ 经过降采样处理后变为 $r(k)$ ，其与相机得到的数据 $s(k)$ 进行自适应滤波，得到目标运动信息 $e(k)$ 与相机处的振动信息 $v(k)$ 。在仿射投影算法中，将降采样后最后 $L + 1$ 个惯性传感器数据写为矩阵形式 $\mathbf{R}_{ap}(k)$ ，相机数据为 $s_{ap}(k)$ ，则仿射投影算法的误差 $\mathbf{l}_{ap}(k)$ 为

$$r(k) = A \cos(\omega_0 k + \varphi), \quad (2)$$

式中： A 为振动的幅度； φ 为初相位。

$w_m(k)$ 为 k 时刻第 m 个滤波器权重， μ 为自适应滤波的步长， $e(k)$ 为 k 时刻自适应滤波的误差，对 $w_m(k+1) = w_m(k) + 2\mu e(k)r(k-m)$ 两边进行傅里叶变换，得

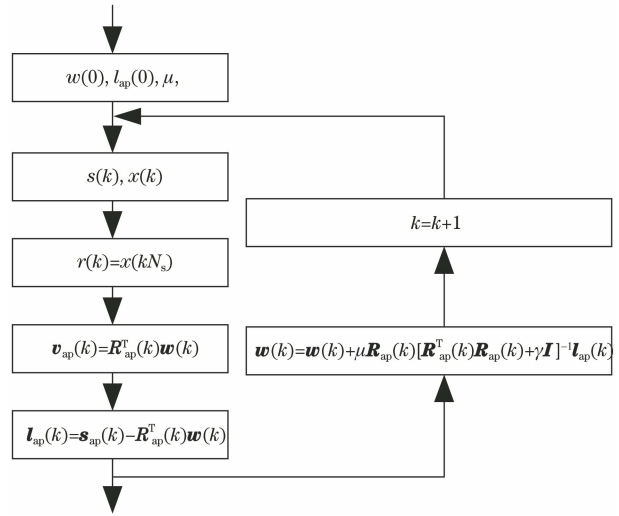


图 6 数据流程图

Fig. 6 Flow chart of data

$$\mathbf{l}_{ap}(k) = \begin{bmatrix} l_{ap,0}(k) \\ l_{ap,1}(k) \\ \vdots \\ l_{ap,L}(k) \end{bmatrix} = s_{ap}(k) - \mathbf{R}_{ap}^T(k) \mathbf{w}(k). \quad (6)$$

此时得到的目标运动信息 $l(k) = l_{ap,0}(k)$ 为采样率为 50 Hz 时的数据，目标运动频率为低频，对其进行插值便可以得到 1 kHz 采样率下的数据 $e(k)$ 。再将惯性传感器数据与滤波器权向量 $w(k)$ 相乘，便可得到在 1 kHz 采样率下相机处的振动信息 $v(k)$ ，即

$$v[20(k-1)+j]=\begin{bmatrix} x[20(k-1)+j] \\ x[20(k-1)+j] \\ \vdots \\ x[20(k-1)+j-1980] \end{bmatrix}^T \times w(k), \quad (7)$$

式中： j 为插值点的序号， $1 \leq j \leq 20$ 。于是可以利用 $e(k)$ 与 $v(k)$ 得到 1 kHz 采样率下控制系统的控制量信息，利用该信息驱动 FSM 便可以使目标处于相机视场中心，实现对目标的精确跟踪。

5 仿真和实验

为了对振动信息进行补偿，国内外很多研究机构针对卫星平台的振动特性展开了研究。1984 年，美国宇航局利用 Landsat-4 卫星上的加速度传感器对该卫星进行了角振动在线测量^[12]。在 1990 年的 SILEX 计划中，欧洲航天局给出了通信卫星 OLYMPUS 的振动功率谱密度拟合函数^[13]，即

$$S(f) = \frac{160}{1+f^2}, \quad (8)$$

式中： f 为振动频率。

根据相关研究可知，卫星平台典型振动模型可由一个连续振动功率谱和三个主要干扰源的振动功率谱叠加而成。振动频率主要集中在 100 Hz 以下，振动幅值随频率的升高而下降。

5.1 数据融合仿真

本文的仿真依照上述振动模型展开，用于验证利用所提的基于降采样的自适应滤波实现数据融合的可行性，对目标运动信息 $e(k)$ 的还原能力与相机处振动信息 $v(k)$ 的还原能力进行了数据仿真，并将

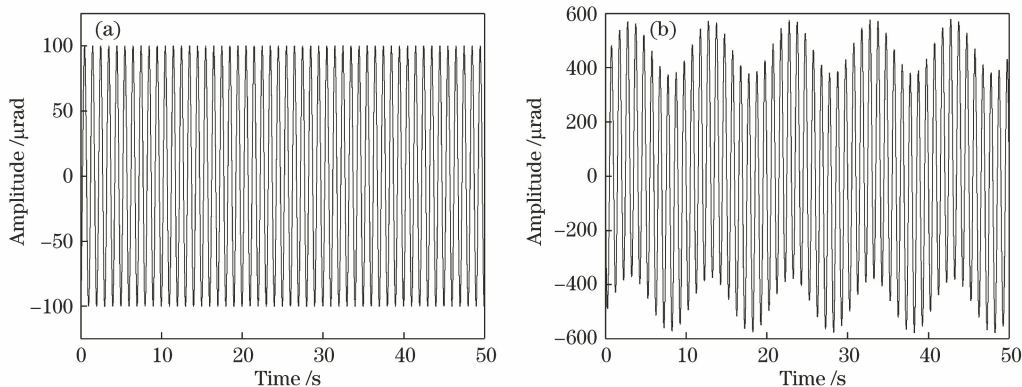


图 8 1 Hz 振动下的惯性传感器和相机数据。(a) 惯性传感器；(b) 相机

Fig. 8 Inertial sensor and camera data under 1 Hz vibration. (a) Inertial sensor; (b) camera

分别利用 AP 算法与 NLMS 算法对图 8 数据进行滤波，还原出的目标运动信息与相机处的振动信息如图 9 所示。

AP 算法与归一化 LMS(Normalized LMS, NLMS) 算法进行了对比。其中，相机帧频为 50 Hz，惯性传感器采样率为 1 kHz，自适应滤波器的阶数为 100，维度为 4。目标运动曲线是幅度为 100 μrad 的 0.1 Hz 正弦信号，如图 7 所示。

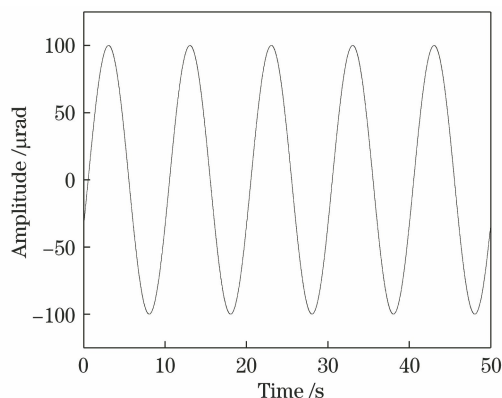


图 7 目标运动曲线

Fig. 7 Motion curve of target

在主要干扰源振动模拟仿真中，惯性传感器测得的振动信号是幅度为 100 μrad 的 1, 40, 80 Hz 正弦信号；在卫星典型振动仿真中，连续功率谱振动符合(8)式，卫星模拟振动源通常是通过滤波器对高斯白噪声进行滤波来实现的，并附加三个主要干扰源振动。相机测得的数据由目标运动和振动共同组成，相机处的振动数据与惯性传感器处的振动数据在频率上是相同的，但在幅度上呈非线性关系，并且相机数据相对于惯性传感器数据有延时。

5.1.1 主要干扰源振动

在 1 Hz 振动情况下，惯性传感器得到的数据和相机得到的数据如图 8 所示。

由图 9 仿真结果可以看出，对于 1 Hz 的振动信号，利用 AP 算法能够很好地实现对目标运动信息的还原和相机处振动信息的还原。在稳态阶段，AP

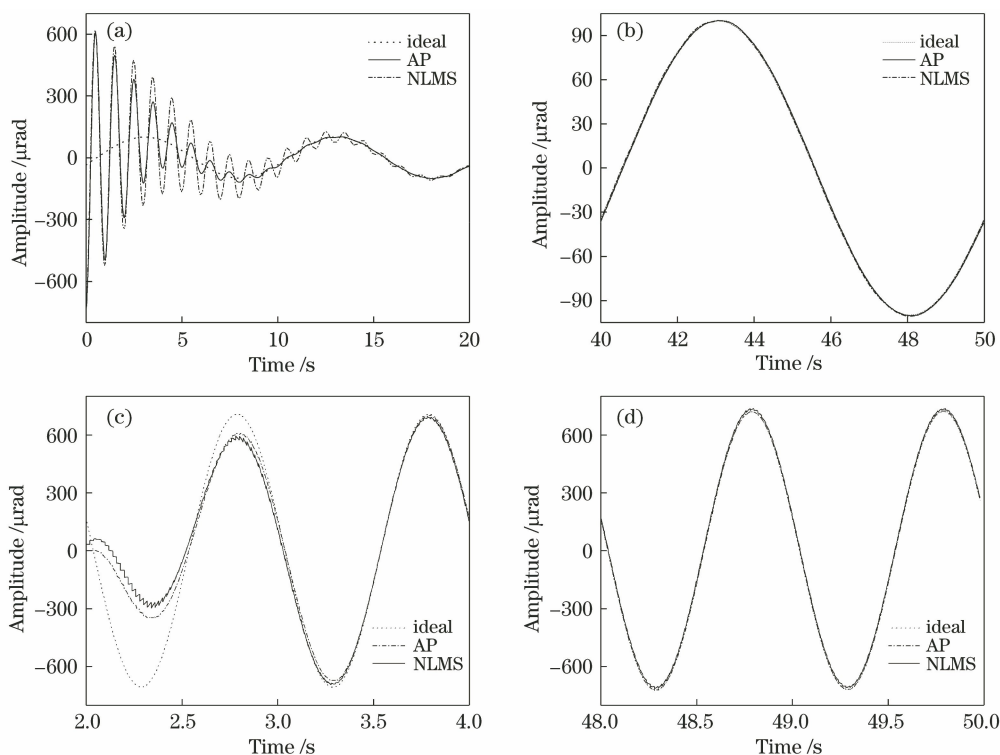


图9 1 Hz 振动下目标和相机处振动信息的还原结果。(a)收敛阶段的目标信息;(b)稳态阶段的目标信息;
(c)收敛阶段相机处的振动信息;(d)稳态阶段相机处的振动信息

Fig. 9 Restoration results of target and camera vibration information under 1 Hz vibration. (a) Target information at convergence state; (b) target information at steady state; (c) camera vibration at convergence state; (d) camera vibration at steady state

算法的还原结果与输入的目标运动曲线的误差为 $0.96 \mu\text{rad}$,与输入的相机处的振动信息的误差为 $1.61 \mu\text{rad}$,并且 AP 算法的收敛速度也快于 NLMS 算法。

利用同样的方法,对 40 Hz 和 80 Hz 的振动进行仿真分析。其中,在 40 Hz 振动下,目标运动信息与相机处振动信息的还原结果如图 10 所示。

由图 10 可以得到,对于 40 Hz 的振动信号,在稳态阶段,AP 算法的还原结果与输入的目标运动曲线的误差为 $0.77 \mu\text{rad}$,与输入的相机处的振动信息的误差为 $0.78 \mu\text{rad}$;同样,对于 80 Hz 的振动信号,在稳态阶段,AP 算法的还原结果与输入的目标运动曲线的误差为 $0.77 \mu\text{rad}$,与输入的相机处的振动信息的误差为 $2.82 \mu\text{rad}$;且 AP 算法在 40 Hz 和 80 Hz 振动条件下的收敛速度也明显快于 NLMS 算法。

5.1.2 卫星典型振动

为了对卫星上存在的典型振动情况进行分析,针对满足(8)式连续功率谱的振动,添加幅度为 $100 \mu\text{rad}$ 的 1 Hz 振动、幅度为 $20 \mu\text{rad}$ 的 40 Hz 振

动和幅度为 $5 \mu\text{rad}$ 的 80 Hz 振动并将其作为振动源,得到的惯性传感器数据与相机数据如图 11 所示。

利用 AP 算法和 NLMS 算法,将惯性传感器数据与相机数据进行数据融合,得到的目标运动信息与相机处振动信息如图 12 所示。

在稳态情况下,AP 算法计算得到的目标运动曲线的误差为 $7.45 \mu\text{rad}$,相机处振动信息的误差为 $8.30 \mu\text{rad}$;而 NLMS 算法计算得到的目标运动曲线的误差为 $14.65 \mu\text{rad}$,相机处振动信息的误差为 $12.53 \mu\text{rad}$ 。可以看出,对于卫星典型振动模型,AP 算法的收敛速度和稳态情况下目标信息和相机处振动信息还原的精度均优于 NLMS 算法。

5.2 系统实验

在实际激光测距跟踪系统中对本文提出的方法进行实验测试,图 13 为系统的实物图与结构图。目标模拟部分由激光器、平行光管与一维旋转反射镜组成;接收部分包括望远镜、跟踪相机、快反镜、惯性传感器和监视相机,并共同置于转台上。其中,跟踪相机帧频为 50 Hz,分辨率为 $20 \mu\text{rad}$;监视相机帧频为 1 kHz,分辨率为 $5 \mu\text{rad}$;惯性传感器采样率为

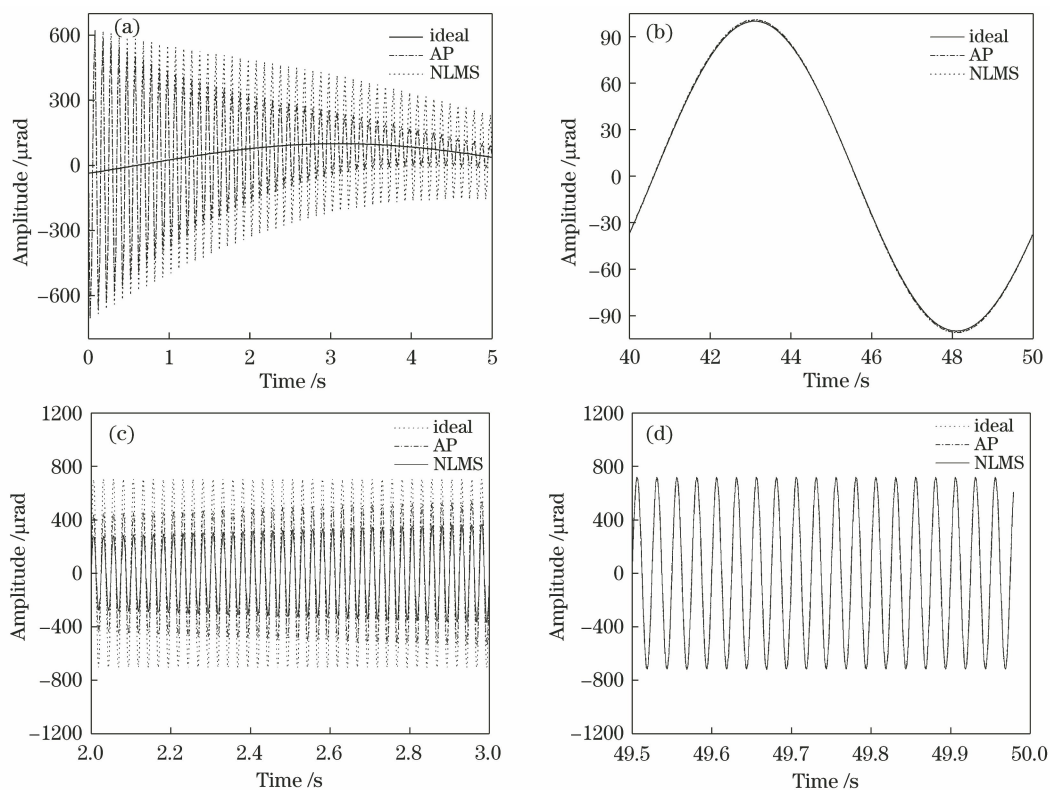


图 10 40 Hz 振动下目标和相机处振动信息的还原结果。(a)收敛阶段的目标信息;(b)稳态阶段的目标信息;
(c)收敛阶段相机处的振动信息;(d)稳态阶段相机处的振动信息

Fig. 10 Restoration results of target and camera vibration information under 40 Hz vibration. (a) Target information at convergence state; (b) target information at steady state; (c) camera vibration at convergence state; (d) camera vibration at steady state

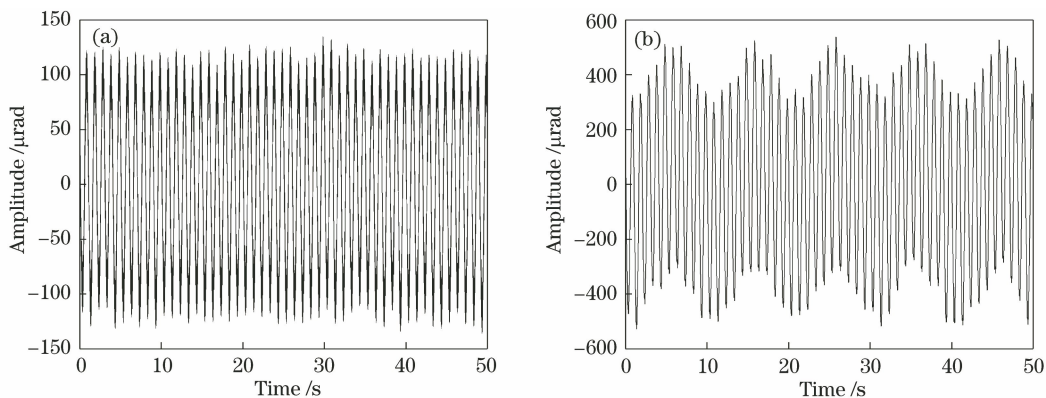


图 11 卫星典型振动下的惯性传感器和相机数据。(a)惯性传感器;(b)相机

Fig. 11 Inertial sensor and camera data under typical satellite vibration. (a) Inertial sensor; (b) camera

1 kHz,短期随机误差小于 $1 \mu\text{rad}$,带宽大于 500 Hz。基于以上实验平台进行一维跟踪实验,激光器发出的光先经过平行光管,再通过一维旋转反射镜发生反射,通过控制旋转反射镜沿水平方向转动来产生频率为 0.1 Hz 的正弦信号以模拟目标运动。

在卫星主要干扰源振动条件下,采用两种方法

实现目标跟踪。首先单独使用低帧频跟踪相机实现目标跟踪,然后使用本文提出的方法实现目标跟踪。利用高帧频的监视相机记录两种跟踪方法的最终跟踪效果,结果如图 14 所示。其中,前 1 s 为单独使用低帧频相机时的跟踪结果,后 1 s 为使用本文所提方法的跟踪结果,纵坐标为跟踪误差的幅度值,单位为 μrad ,横坐标为时间,单位为 s。

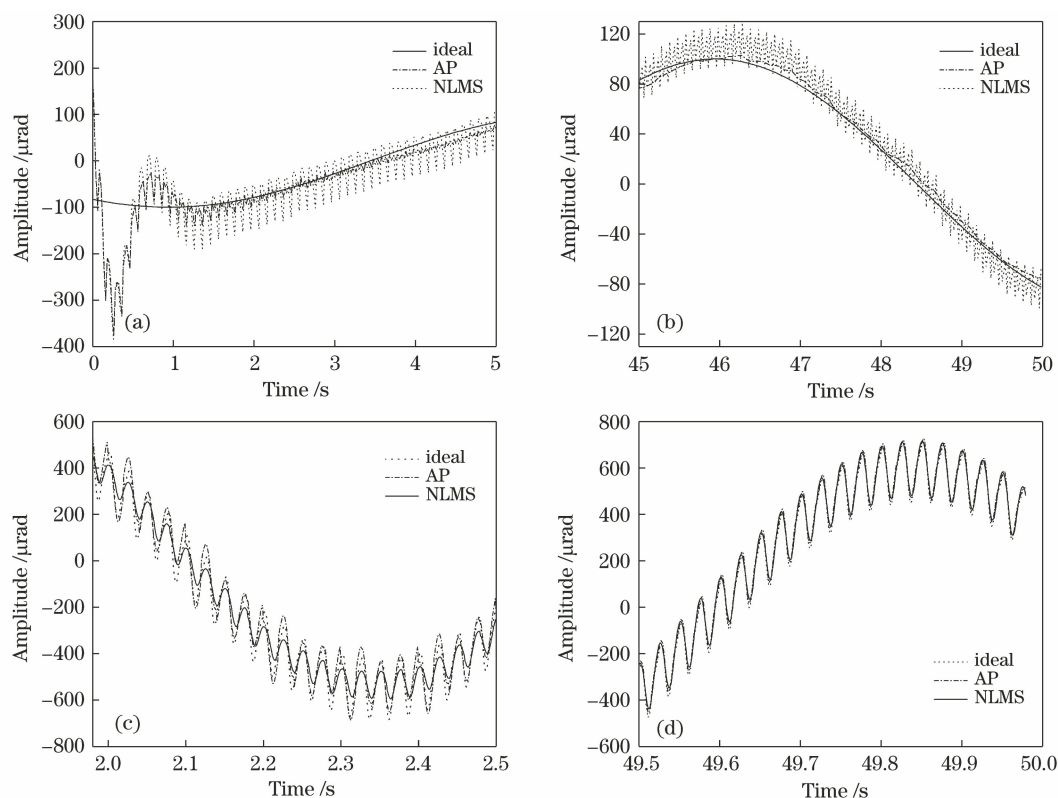


图 12 卫星典型振动下目标和相机处振动信息的还原结果。(a)收敛阶段的目标信息;(b)稳态阶段的目标信息;
(c)收敛阶段相机处的振动信息;(d)稳态阶段相机处的振动信息

Fig. 12 Restoration results of target and camera vibration information under typical satellite vibration. (a) Target information at convergence state; (b) target information at steady state; (c) camera vibration at convergence state; (d) camera vibration at steady state

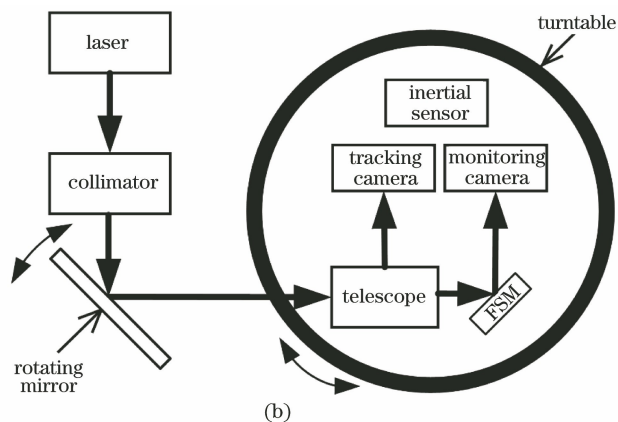
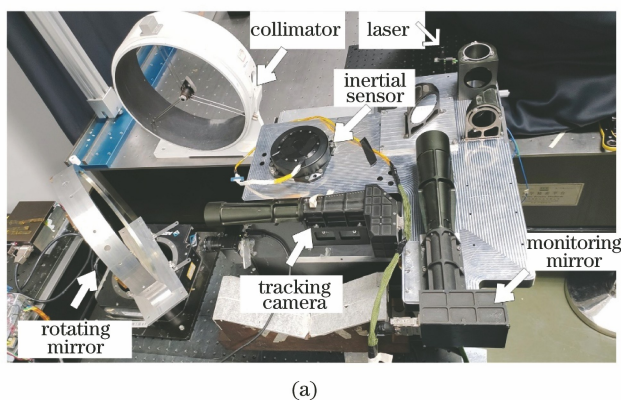


图 13 激光测距跟踪系统。(a)实物图;(b)结构图

Fig. 13 Laser ranging and tracking system. (a) Physical map; (b) structural diagram

可以看出,由于相机帧频的限制,单独使用低帧频相机不能实现对目标的精确跟踪。当振动频率约为 1 Hz 时,单独使用低帧频相机时跟踪精度为 $49.4 \mu\text{rad}$,使用本文方法时跟踪精度为 $4.1 \mu\text{rad}$,跟踪精度提升了约 10 倍。当振动频率约为 40 Hz 时,单独使用低帧频相机时跟踪精度约为 $15.2 \mu\text{rad}$,使用本文方法时跟踪精度为 $4.7 \mu\text{rad}$,跟踪精度提

升了约 3 倍。实验结果表明,采用基于降采样的仿射投影自适应滤波方法,能够抑制卫星主要振动源的干扰,跟踪精度优于 $5 \mu\text{rad}$ 。

6 结 论

针对星载远距离非合作目标测距应用中跟踪精度低的问题,提出了一种基于降采样的 AP 自适应

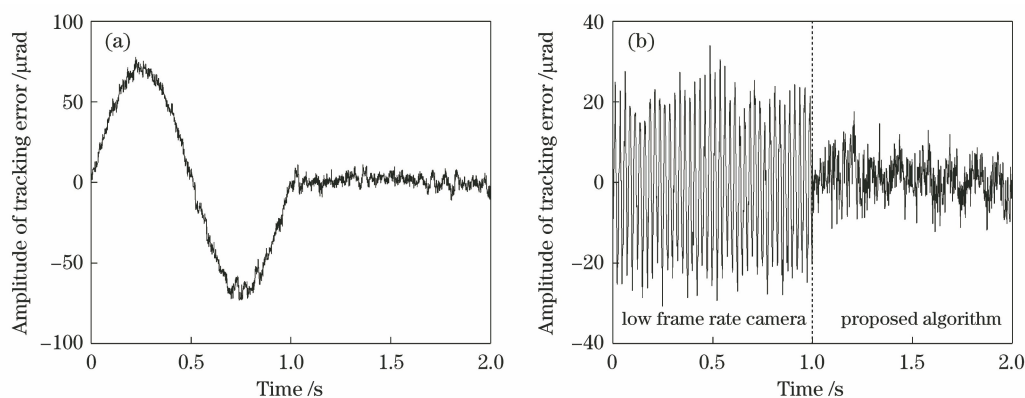


图 14 不同频率振动下的跟踪误差。(a) 1 Hz; (b) 40 Hz

Fig. 14 Tracking errors under vibration with different frequencies. (a) 1 Hz; (b) 40 Hz

跟踪方法,利用高采样率惯性传感器辅助低帧频相机实现了高精度跟踪。数据融合仿真结果表明,利用基于降采样的 AP 自适应滤波实现惯性传感器与相机数据的融合是可行的并且收敛速度快,在稳态情况下目标信息和相机处振动信息还原的精度高。系统实验表明,在主要干扰源振动情况下,跟踪精度均优于 $5 \mu\text{rad}$,满足远距离测距系统的跟踪精度要求。目前系统输入的振动噪声模型较为简单,在未来实际应用中可能还存在非高斯振动等情况,后续还将进一步研究。所提出的基于自适应振动抑制的星载远距离测距跟踪方法有效解决了远距离测距中非合作目标跟踪的技术难题,在其他非合作目标跟踪领域同样具有较高的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Xie G C, Ye Y D, Li J M, et al. Echo characteristics and range error for pulse laser ranging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0610001.
谢庚承, 叶一东, 李建民, 等. 脉冲激光测距回波特性及测距误差研究[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0610001.
- [2] Long M L, Zhang H F, Deng H R, et al. Laser ranging for space debris using double telescopes with kilometer-lever distance[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0228002.
龙明亮, 张海峰, 邓华荣, 等. 距离千米级双望远镜的空间碎片激光测距[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0228002.
- [3] Lee S, Alexander J W, Ortiz G G. Submicroradian pointing system design for deep-space optical communications[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4272: 104-111.
- [4] Wu F, Yu S Y, Ma Z T, et al. Correction of pointing angle deviation and in-orbit validation in satellite-ground laser communication links[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0605008.
武风, 于思源, 马仲甜, 等. 星地激光通信链路瞄准角度偏差修正及在轨验证[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605008.
- [5] Yahalom R, Moslehi B, Oblea L, et al. Low-cost, compact fiber-optic gyroscope for super-stable line-of-sight stabilization[C]//IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, May 4-6, 2010, Indian Wells, CA, USA. New York: IEEE, 2010: 180-186.
- [6] Algrain M C, Woehrer M K. Determination of attitude jitter in small satellites [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2739: 215-228.
- [7] Skormin V A, Tascillo M A, Nicholson D J. Jitter rejection technique in a satellite-based laser-communication system[J]. Optical Engineering, 1993, 32(11): 2764-2769.
- [8] Lin Y, Ding W. The adaptive fuzzy PID control study of active vibration isolation system[C]//Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, July 6-8, 2012, Beijing, China. New York: IEEE, 2012: 1120-1123.
- [9] Qin H, Fu C Y, Huang Y M. Adaptive composite control for jitter rejection of satellite in optical communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040606.
覃浩, 付承毓, 黄永梅. 光通信中卫星振动抑制的自适应复合控制[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040606.
- [10] Deng C, Mao Y, Ren G. MEMS inertial sensors-based multi-loop control enhanced by disturbance observation and compensation for fast steering mirror system[J]. Sensors, 2016, 16(11): 1920.
- [11] Maouche K, Slock D T M. A fast instrumental variable affine projection algorithm[C]//Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on

- Acoustics, Speech and Signal Processing, May 15, 1998, Seattle, WA, USA. New York: IEEE, 1998: 1481-1484.
- [12] Sudey J, Jr, Schulman J R. In-orbit measurements of Landsat-4 thematic mapper dynamic disturbances[J]. Acta Astronautica, 1985, 12(7/8): 485-503.
- [13] Wittig M E, van Holtz L, Tunbridge D E L, et al. In-orbit measurements of microaccelerations of ESA's communication satellite Olympus[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1218: 205-214.