

文章编号:1000-8055(2009)01-0235-06

实时精确跟踪瞄准中振动抑制的研究

秦 莉, 杨 明

(哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 哈尔滨 150001)

摘 要: 分析了卫星平台振动,建立了实时精确跟踪瞄准系统的数学模型.采用基于模糊规则的免疫 PID 控制器,包括决定应答速度的激活环节和决定稳定效果的抑制环节,抑制环节由模糊规则来逼近,通过遗传算法的寻优特性对控制器的参数进行设定,协调控制偏转镜的位置,从而改变视轴方向.最后,对系统扰动抑制性能进行仿真,仿真结果表明该控制律有效地实现了视轴的方向调整,并且提高了系统的动态响应品质.

关 键 词: 快速反射镜;免疫反馈;模糊规则;遗传算法;视轴稳定;振动抑制

中图分类号: TP273; V448

文献标识码: A

Research of vibration suppression in the precision real time pointing and tracking system

QIN Li, YANG Ming

(Control and Simulation Center,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The vibration of the satellite was analyzed, and a mathematical model of real-time pointing and tracking system was built up. An immune feedback proportional integral differential (PID) controller based on fuzzy rules was presented, of which including an active term controlling the response speed and an inhibitive term controlling the stabilization effect; a fuzzy logic was implemented to approach the inhibitive term. Also, the genetic algorithm was adopted for parameter selection according to its optimizing characteristic. At last, simulation results verify the vibration suppression performance and show the highly robust and efficient controller design.

Key words: fast steering mirror (FSM); immune feedback; fuzzy; genetic algorithm; line-of-sight stabilization; vibration suppression

现代攻击武器、空间对接、空间光通信等都需要高速高精度的光电跟踪瞄准设备,如果系统性能指标要求不高,可以近似看成线性系统,采用一般的线性控制即可实现,如前馈控制、(Proportional integral differential, PID)控制、零点对消等,但是系统中不可避免地存在着传感器误差、力矩干扰造成的误差、动态滞后误差和空间平台振动造成的误差等^[1].随着电子学和精密机械的发

展,可以把探测器噪声和机械噪声带来的误差控制在较小的范围内,所以卫星平台的振动是引起精确跟踪瞄准系统视轴对准误差的主要因素.卫星平台和空间环境引起的振动是有色噪声,需要跟踪瞄准系统具有很强的抑制振动能力.系统总体的复杂度、体积、重量和功率需求等都是跟踪瞄准系统的性能为前提的.

文献报道的抑制振动的方法有 Held K J 和

收稿日期:2007-12-13; 修订日期:2008-04-02

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60434010);黑龙江省杰出青年基金(JC200606)

作者简介:秦莉(1981-)女,河南焦作人,博士生,主要从事飞行器制导与控制、智能控制的研究.

Barry D 提出的陀螺稳定,质量稳定和互补滤波^[2],Skormin V 提出的前馈补偿抑制平台振动^[3].这些方法的优点是不需要很高的系统谐振频率和探测器采样频率,能够较好地抑制扰动,缺点是增加了系统结构和控制器设计方面的复杂性.另一种抑制振动方法是设计高带宽的精跟踪环(从系统),由于精瞄偏转镜具有谐振频率高、响应速度快、跟踪精度高等优点,可与大惯量机架结构的主系统共同构成复合轴跟踪系统,用于校正主系统的跟踪误差,提高跟踪精度.在精跟踪过程中,通过控制快速反射镜(Fast steering mirror, FSM)的偏转,抑制各种干扰和振动,从而使跟踪误差保持在亚微弧度量级以内.

本文采用两轴快速反射镜,两个轴分别在方位和俯仰方向对系统视轴进行控制.系统实际上是一个具有非线性和模型不确定性的量时变系统,两通道间也存在着动力学耦合,以及运动平台带来的振动扰动.经典的PID控制器难以满足系统的性能要求.而免疫系统能自适应地识别异物,控制和排除入侵机体的抗原性异物,具有学习、记忆和自适应调节等能力,适合于本文所研究的系统.本文采用了基于模糊调整的免疫反馈PID控制方式,仿真结果表明该方法能使系统视轴快速跟踪期望目标,并满足一定的动态和稳态性能要求.

1 卫星平台振动分析及典型振动模型

精确跟踪瞄准精度是由作用在跟踪瞄准系统上的振动和系统对振动的抑制能力决定的.振动的频谱特性取决于卫星空间环境的物理性质和其进行的特定操作.振动源分为两种:卫星刚体运动引起的低频振动和卫星的运载舱以及有效载荷的操作引起的中频到高频的振动.包括太阳辐射压力;热弯曲力矩;微陨石碰撞;日月引力;地球扁率影响;轨道椭圆率影响;张力和弯曲力矩的弹性压力;波导开关;太阳能电池阵列驱动;推进器动作;陀螺噪声等^[4].振动显示出低频高幅度,高频低幅度的特性.其中低频高幅度振动包括太阳能电池阵列由于共振或热瞬态影响引起的偏转及偏航机动等,这类扰动频率较低,几Hz量级.而高频低幅度的振动一般振动幅度在微弧度量级,带宽1~2kHz,机械装置,电机和其它硬件都可以产生这类扰动.

欧洲航天局(European space agency, ESA)在卫星OLYMPUS用3个彼此正交的微加速计在轨测量了推进器点火时星上的振动.从测量的

数据来看,其振动频谱集中在200Hz以下^[5].ESA采用公式(1)所示的模型作为设计星间光通信系统SIL EX(Semiconductor intersatellite laser experiment)的平台振动功率谱密度函数

$$S(f) = \frac{160}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}, \quad f_0 = 1 \text{ Hz} \quad (1)$$

由美国(National aeronautics and space administration / Goddard space flight center, NASA/GSFC)提供的LANDSAT-4在轨测量的振动数据可以看出,卫星振动频谱从低频扩展到高频(约125Hz),在1Hz处由太阳能电池阵列驱动产生100μrad的振动,卫星上反作用轮基波和二次谐波产生100Hz,4μrad和200Hz,0.6μrad的振动.整个振动随机模型是由连续振动功率谱和3个谐波振动分量组成^[6].

日本的(National science development agency of Japan, NASDA)和利用星地激光链路实验卫星ETS-VI进行振动测量,分析得到卫星平台角振动大部分处于100Hz内,最大振动幅值为10μrad^[7].

2 精跟踪瞄准控制规律设计

2.1 精跟踪瞄准系统模型

精跟踪瞄准机构主要包括一个两轴快速反射镜,一个跟踪传感器,一套执行机构(压电陶瓷或音圈电机)和位置传感器.工作在闭环方式下,根据精跟踪探测器的误差信号,控制快速反射镜,跟踪入射光,构成精跟踪环.

精跟踪瞄准控制系统动态模型如图1所示, θ_{ai} 和 θ_{bi} 分别为方位、俯仰方向入射光角度分量输入信号. θ_{ao} 和 θ_{bo} 表示方位和俯仰方向对应光角位移输出. $D_1(s)$ 和 $D_2(s)$ 分别为方位和俯仰方向的位置控制器. $G_{sm1}(s)$ 和 $G_{sm2}(s)$ 代表驱动及两维快速反射镜两轴的传递函数, F_d 为系统干扰力. $G_{ccd1}(s)$ 和 $G_{ccd2}(s)$ 分别表示测量光角度分量的(Charge coupled device, CCD)光电探测器的传递函数,CCD被作为一个采样周期的纯延迟的模型来分析.

快速反射镜采用压电陶瓷驱动,分辨率很高,由机座、镜框、反射镜、4个音圈驱动器以及柔性支撑结构等组成.通过呈正交分布的两对驱动器的推拉作用,来实现对反射镜的倾斜控制.在一维方向上反射镜可以看作是单自由度的扭振系统,偏转角和力矩之间的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{2RL^2}{J + 2mL^2}s + \frac{2KL^2}{J + 2mL^2}} \quad (2)$$

其中 J 为倾斜镜的转动惯量, K 为驱动器与弹簧的合成刚度, R 为等效阻尼系数, L 为驱动器作用点到转轴的距离, m 为音圈的质量. 由 (2) 式可以看到, 快速反射镜的机械结构部分为典型的二阶振荡环节, 在实际跟踪瞄准系统中通过测试得到模型的各个参数.

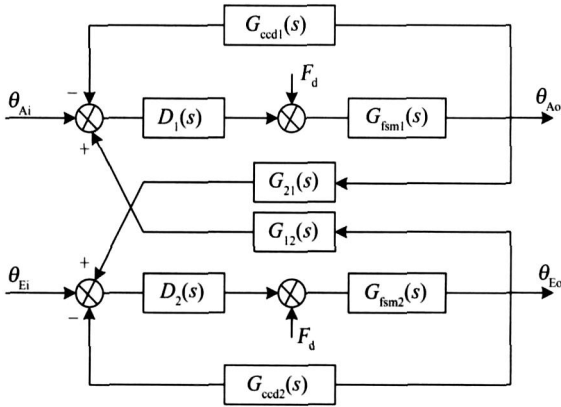


图 1 快速反射镜 (FSM) 对准控制环的方框图
Fig. 1 Dynamic structure of fine pointing system

2.2 免疫反馈系统机理

免疫是生物体的一种特性生理反应. 生物的免疫系统对于外来侵犯的抗原, 可产生相应的抗体来抵御. 抗原和抗体结合后, 会产生一系列的反应, 通过吞噬作用或产生特殊酶的作用而毁坏抗原. 生物的免疫系统由淋巴细胞和抗体分子组成, 淋巴细胞又由胸腺产生的 T 细胞 (分别为辅助细胞 T_H 和抑制细胞 T_S) 和骨髓产生的 B 细胞组成. 当抗原侵入机体并经周围细胞消化后, 将信息传给 T 细胞, 即传递给 T_H 细胞核 T_S 细胞, 然后刺激 B 细胞. B 细胞产生抗体以消除抗原. 当抗原较多时, 机体内的 T_H 细胞也较多, 而 T_S 细胞却较少, 从而会产生较多的 B 细胞. 随着抗原的减少, 体内 T_S 细胞增多, 它抑制了 T_H 细胞的产生, 则 B 细胞也随着减少. 经过一段时间间隔后, 免疫反馈系统便趋于平衡. 抑制机理和主反馈机理之间的相互协作, 是通过免疫反馈机理对抗元的快速反应和稳定免疫系统完成的.

2.3 免疫 PID 控制器设计

由于精确跟踪瞄准系统搭载在卫星平台上, 如果发生故障, 维修费用极高, 因此必须选择成熟、可靠性高、简单有效的跟踪控制算法. 而且考虑到结构要轻小, 被控对象谐振频率很高, 一般需

要几千赫兹, 线性度好, 由于 PID 控制器简单易实现, 在工业过程中得到了广泛应用, 由于实际的系统受到随机噪声的干扰, 所以实际上是一个随机控制问题, 利用免疫系统的自适应能力, 对目标进行实时精确跟踪瞄准, 同时提高了系统的动态响应品质.

基于快速反射镜 (FSM) 的精跟踪控制框图如图 2 所示 (本文仅以方位方向为例, 俯仰方向的控制原理相同), 将系统的期望方位角与实际方位角的差值送入免疫 PID 控制器, 由 PID 控制器计算控制输出, 再由执行机构予以执行, 得到快速反射镜的实际移动位置. 系统模型根据快速反射镜的实际位置计算出新的偏转角, 从而构成精密位置随动控制回路.

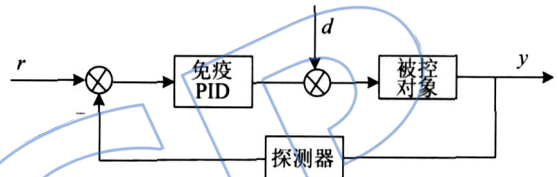


图 2 反射镜控制系统原理框图
Fig. 2 Diagram of mirror control system

免疫系统抵御抗原的自适应能力非常明显. 免疫 PID 控制器是借鉴生物系统的免疫机理而设计出的一种非线性控制器. 假设第 k 代的抗原数量为 $\varepsilon(k)$, 由抗原刺激的 T_H 细胞的输出为 $T_H(k)$, T_S 细胞对 B 细胞的影响为 $T_S(k)$, 则 B 细胞接收的总刺激为

$$S(k) = T_H(k) - T_S(k) \quad (3)$$

式中

$$T_H(k) = k_1 \varepsilon(k),$$

$$T_S(k) = k_2 f[S(k), \Delta S(k)] \varepsilon(k)$$

若以抗原的数量 $\varepsilon(k)$ 作为偏差 $e(k)$, B 细胞接收的总刺激 $S(k)$ 作为控制输入 $u(k)$, 则 $\Delta S(k) = \Delta u(k)$. 反馈控制规律为

$$u(k) = K \left\{ 1 - \eta f[u(k), \Delta u(k)] \right\} e(k) \quad (4)$$

其中 $K = k_1$ 为控制反应速度, $\eta = k_2 / k_1$ 为控制稳定效果, $f(\cdot)$ 为一个选定的非线性函数, 表示细胞抑制刺激能力的大小.

非线性函数 $f(\cdot)$ 的设计困难, 利用模糊规则 (如图 3 所示) 可逼近非线性函数 $f(\cdot)$, 包括两个输入变量和一个输出变量. 输入变量是免疫反馈控制器的输出 $u(k)$ 及其变化量 $\Delta u(k)$, 输出变量为免疫反馈的抑制量 $f(\cdot)$. 每个输入变量被两个模糊集模糊化, 分别是“正”(P)和“负”(N).

输出变量被三个模糊集模糊化,分别是“正”(P)、“零”(Z)和“负”(N).隶属度函数定义在整个 $(-\infty, +\infty)$ 区间.按照“细胞接受的刺激越大,则抑制能力越小;细胞接受的刺激越小,则抑制能力越大”的原则,可采用以下4条模糊规则:

- 1) If u is P and Δu is P then $f(u, (\Delta u))$ is $N(1)$
- 2) If u is P and Δu is N then $f(u, (\Delta u))$ is $Z(1)$
- 3) If u is N and Δu is P then $f(u, (\Delta u))$ is $Z(1)$
- 4) If u is N and Δu is N then $f(u, (\Delta u))$ is $P(1)$

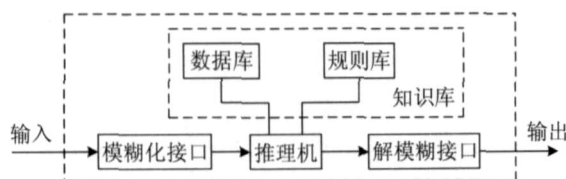


图3 模糊控制器的组成框图

Fig.3 Diagram of fuzzy controller

使用 Zadeh 的模糊逻辑 AND 操作,并采用“Centroid”反模糊化方法得到模糊控制器的输出 $f(\cdot)$ 。

基于免疫反馈原理的控制器实质上就是一个非线性 P 控制器,其比例系数 $k_{p1} = K \cdot \{1 - \eta f[u(k), \Delta u(k)]\}$ 随控制器输出的变化而变化,其中 K 为增益,则免疫 PID 控制器的输出为

$$u(k) = u(k-1) +$$

$$k_{p1} [1 + k_i / (z^{-1} - 1) + k_d (1 - z^{-1})] e(k) \quad (5)$$

其中

$$0 \leq \eta \leq \frac{1}{\sup f[u(k), \Delta u(k)]}$$

2.4 遗传算法优化

参数设定是免疫 PID 控制器设计的重要环节,本文待寻优的参数是 K 和 η ,以控制系统动态性能好坏来评价解的优劣程度。

在设计性能函数时,为获得较为满意的过渡过程动态特性,采用误差绝对值时间积分性能指标作为参数选择的最小目标函数。为了防止控制能量过大,在函数中加入控制量的平方项。

$$J =$$

$$\int [w_1 |e(t)| + w_2 u(t)^2 + w_4 |de(t)|] dt + w_3 t_s$$

(6)

在 (Genetic algorithm, GA) 训练模块中,将神经网络的权值进行二进制编码,每一权值取 10 bit,则个体位串长度 $L = 720$ 。

设定进化代数 500 次,子群个数 $N = 50$,子群长度 $L = 720$;每一参数位串长 $l = 10$,决策变量个数 $M = 72$ 。首先随机产生初始生成种群规模如下:

$$g_{in}(i) = \text{random}(\cdot)$$

$$(i = 1, \dots, N \times l \times M) \quad (7)$$

设 $w_{ij}(k)$:解空间的实际权值,变化范围为 $(w_{ij})_{\min} \sim (w_{ij})_{\max}$; $w_{bij}(k)$:在 GA 空间的权的位串表示值(整数)。二者之间的关系为

$$w_{ij} = (w_{ij})_{\min} +$$

$$\frac{w_{bij} [(w_{ij})_{\max} - (w_{ij})_{\min}]}{(2^d - 1)} \quad (8)$$

式中 d 是二进制位串的位数。

定义适应度

$$f = 1 / (J + \Delta) \quad (9)$$

其中 Δ 是一个非常小的值。可见,当性能函数增大时,对应的适应度函数就会减小。

计算单个子群中每个个体的适应度 $f_i (i = 1, \dots, l)$ 并对其按照从小到大的顺序进行排序,得到最大值 $f_{\max}$ 和最小值 $f_{\min}$,同时记录每个个体对应的位置标记为 $I(i)$,那么每个子群适应度最大(性能指标最优)的一组控制器参数表示为

$$T(k) = g_{in} [I(l-1) \times M + k] \quad (10)$$

$$w_{bij}(k) = (w_{bij_max}(k) - w_{bij_min}(k)) \times$$

$$T(k) + w_{bij_min}(k) \quad (11)$$

将得到的参数 $w_{bij}(k) (k = 1, \dots, M)$ 保存下来,以便与下一代的参数进行比较。

使用轮盘赌法选择计算子群中个体 i 被选中的概率

$$p_i = f_i / \sum_j f_j = \frac{f_i}{f_{\text{sum}}} \quad (12)$$

f_i 表示个体 i 的适应度, f_{sum} 表示单个子群的总适应度, p_i 表示个体 i 的选择概率。

对第 $i (i = k' + 1, \dots, l)$ 个个体对应的初始生成种群 $g_{in}(i)$ 进行重新繁殖如下:

$$T(n \times M + k) = g_{in} [I(i) \times M + k] \quad (13)$$

其中 $n = 1, \dots, k'; k = 1, \dots, l$ 。

根据适应度从小到大的顺序排列,得到更新的初始生成种群为

$$g_{in}(i \times M + k) = T(i \times M + k) \quad (14)$$

其中 $i = 1, \dots, l; k = 1, \dots, M$ 。

为避免早熟现象,提高搜索效率,对交叉、变

异概率(p_c, p_m)分别进行自适应调整,调整算法为

$$p_c = \begin{cases} k_1 (f_{\max} - f'_c) / (f_{\max} - \bar{f}) & f'_c \geq \bar{f} \\ k_3 & f'_c < \bar{f} \end{cases} \quad (15)$$

$$p_m = \begin{cases} k_2 (f_{\max} - f) / (f_{\max} - \bar{f}) & f \geq \bar{f} \\ k_4 & f < \bar{f} \end{cases} \quad (16)$$

式中 f'_c 为交叉前父代双亲适应值大者; f 为需变异个体的适应值; $k_1 = k_3 = 1, k_2 = k_4 = 0.5$ 。

最后注入最优个体,得到对应的最优决策变量值为

$$w_{bij}(k) = [w_{bij_max}(k) - w_{bij_min}(j)] \times \frac{f_{\max} - w_{bij_min}(k)}{f_{\max} - w_{bij_min}(k)} \quad (17)$$

将 GA 所有的个体译码至解空间,得到控制器的控制力 $u(t)$,作用于系统,产生下一时刻的输出,直至满足条件,则优化 w (权值) 的 GA 结束。

3 仿真实验

根据上述分析,设计了一个实时精确跟踪瞄准系统,并通过该系统对扰动抑制能力进行仿真。该跟踪系统采用复合轴伺服控制结构,对振动的抑制采用设计高带宽精跟踪环进行主动抑制的方法。

采用两维快速反射镜,倾斜范围为 $\pm 3 \text{ mrad}$ 。根据 SIL EX 数据,最大跟踪速度 $0.2^\circ/\text{s}$,最大跟踪加速度 $0.02^\circ/\text{s}^2$,系统输入的等效正弦跟踪信号为 $\theta(t) = 3.5 \sin(0.1t) \text{ mrad}$ 。

对振动抑制性能的仿真,可分为对谐波扰动抑制的仿真和对随机扰动抑制的仿真。对谐波振动的抑制,采用 LANDSAT4 卫星测量数据,分别对 1 Hz, $100 \mu\text{rad}$; 100 Hz, $4 \mu\text{rad}$; 200 Hz, $0.6 \mu\text{rad}$ 的谐波扰动进行仿真,并与单独采用 PID 控制进行比较,如表 1 所示。

表 1 谐波振动抑制仿真结果
Table 1 Results of harmonic vibration suppression

谐波振动	PID/ μrad	(PID + 免疫)/ μrad
1 Hz, $100 \mu\text{rad}$	10	0.12
100 Hz, $4 \mu\text{rad}$	12	0.15
200 Hz, $0.6 \mu\text{rad}$	10	0.1

对随机振动抑制仿真采用式(1)所示的 ESA

设计的有效载荷 SIL EX 的平台振动功率谱密度为参考。振动功率谱采用高斯白噪声经设计的滤波器来模拟。图 4 和图 5 分别给出了只采用 PID 控制和采用 PID + 免疫(经过遗传算法优化)控制对模拟的连续扰动抑制,从图中可以看出,后者对振动的抑制能力强于前者。

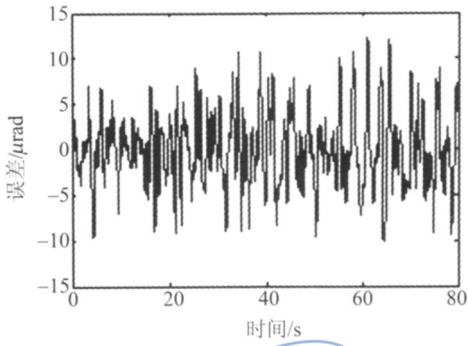


图 4 连续振动的抑制 (PID)
Fig. 4 Random vibration suppression (PID)

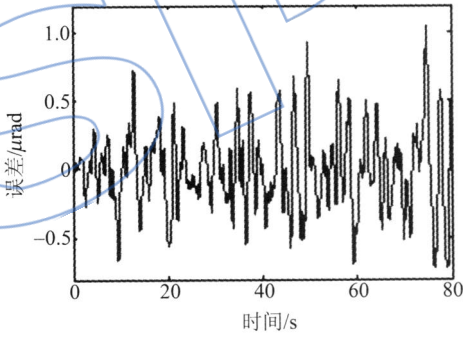


图 5 连续振动的抑制 (PID + 免疫)
Fig. 5 Random vibration suppression (PID + Immune)

4 结 论

本文在建立两轴快速反射镜跟踪瞄准精跟踪环模型的基础上,提出了一种基于遗传算法参数寻优和模糊调整的免疫 PID 视轴指向控制规律。设计的跟踪系统在模拟 SIL EX 振动功率谱和模拟 LANDSAT4 的谐波扰动作用下,以期望方向角与实际方向角的误差及误差变化率作为 PID 控制器的输入,利用免疫反馈原理对 PID 控制器的参数进行自适应调整,从而对快速反射镜两轴的位置进行协调控制。既继承了传统 PID 控制控制结构简单,可靠性高,易于工程实现等优点,又克服了其非线性随动性差的缺点。仿真结果表明,采用这种控制律可以对视轴指向进行实时精确地调整,有效地抑制了卫星平台的振动,使跟踪误差

达到亚微弧度量级,提高了系统的动态响应品质.

参考文献:

[1] Held KJ , Barry J D. Precision pointing and tracking between satellite-borne optical systems [J]. Optical Engineering , 1988 , 27 (4) :325-333.

[2] Held KJ , Barry J D. Precision optical pointing and tracking from spacecraft with vibration noise [C]// Optical Technologies for Communication Satellite Applications. Los Angeles ,CA ,USA :SPIE , 1986 , 616 :160-173.

[3] Skormin V , Tascillo M ,Busch T. Demonstration of jitter rejection technique for free space laser communication [C]// Free-Space Laser Communication Technologies VI Los Angeles ,CA ,USA :SPIE , 1994 , 2123 :381-392.

[4] Skormin V A ,Tascillo M A. Jitter rejection technique in a satellite-based laser communication system [J]. Optical Engineering , 1993 ,32 (11) :2764-2769.

[5] Wittig M , Holtz L V , Tunbridge D E L , et al. In orbit measurements of microaccelerations of ESA 's communication satellite OL YMPUS[C]// Free-Space Laser Communication Technologies II, Los Angeles ,CA ,USA : SPIE , 1990 ,1218 :205-214.

[6] Hayden W ,McCullough T , Reth A , et al. Wide-band precision two-axis beam steerer tracking servo design and test results[C]// Free-Space Laser Communication Technologies V. Los Angeles , CA , USA : SPIE , 1993 , 1866 : 271-279.

[7] Toyoshima M , Araki K. In orbit measurements of short term attitude and vibrational environment on the engineering test satellite VI using laser communication equipment [J]. Optical Engineering ,2001 ,40 (5) :827-832.

