

文章编号: 0253-2239(2006)01-0101-6

# 星间激光通信中复合轴系统的带宽设计研究\*

刘锡民 刘立人 孙建锋 奚庆新

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

**摘要:** 星间激光通信中,由粗跟踪系统和精跟踪系统组成的复合轴系统完成了系统的大范围、高精度跟踪任务。对复合轴系统进行了基于 Z 变换的数字模拟以研究其带宽设计。根据计算的卫星轨迹和粗跟踪系统机械误差,得到了粗跟踪系统的带宽设计结果;给出了粗跟踪系统和精跟踪系统的配合工作关系;得到了精跟踪系统的带宽设计结果;最后研究了在中高频扰动下,复合轴系统的带宽设计。以上结果为星间激光通信中的复合轴系统控制系统设计提供了重要依据。

**关键词:** 信息光学; 带宽设计; 复合轴系统; 星间激光通信

中图分类号: TN92 文献标识码: A

## Bandwidth Design of Composite Axis System in Satellite Laser Communication

Liu Ximin Liu Liren Sun Jianfeng Xi Qingxin

(Laboratory for Information Optics, Shanghai Institute of Optical and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** In space laser communication, the composite axis system (CAS), consisting of the coarse tracking system (CTS) and the fine tracking system (FTS), accomplishes the wide ranging and high accurate tracking tasks. The digital simulation of CAS based on Z transform is given to study the bandwidth design of the CAS. According to the trajectory of the satellite and the mechanical error of the CTS, the bandwidth design of CTS is obtained. Moreover, the cooperation of CTS and FTS is given, and the bandwidth design of FTS is gained. At last, the bandwidth design of CAS with disturbance of medium and high frequency is presented. The results above present the theoretical basis for the design of CAS control system.

**Key words:** information optics; bandwidth design; composite axis system; space laser communication

## 1 引 言

随着信息技术的不断发展,人们对信息的快速性要求越来越高。光纤通讯系统完成了信息在地面上的快速大容量传递<sup>[1,2]</sup>;卫星通信系统使人们在地球一侧便能很快知道地球另一侧发生的事情,完成了信息在空间中的及时快速传递。目前,卫星通信系统主要采用无线电频率通信方式。随着人们对数据传输速率要求的不断提高,星间激光通信具有越来越广阔的应用前景<sup>[3]</sup>。星间激光通信中,通信激光束非常窄,只有 $10\ \mu\text{rad}$ 左右。为了保证接收方能够接收到足够的能量,必须使如此窄的激光束能够在两个终端之

间准确对准并进行高精度跟踪。跟踪误差要小于 $1\ \mu\text{rad}$ ,才可以保证突发误差率小于 $10^{-6}$ <sup>[4~6]</sup>。星间激光通信系统中,捕获、跟踪、指向(ATP)系统保证了如此高的对准和跟踪精度<sup>[5,6]</sup>。因此,ATP系统在星间激光通信中具有极为重要的作用。

## 2 带宽设计的需要

### 2.1 带宽设计的需要

ATP系统要完成这一高精度的跟踪任务,如果单独利用粗跟踪系统,由于其惯量比较大,相应的系统带宽比较低,跟踪速度比较慢;并且存在着约为

\* 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 刘锡民(1977~),男,山东淄博市人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事信息光学以及星间激光通讯方面的研究。E-mail: liuximin03@163.com

收稿日期: 2005-02-25; 收到修改稿日期: 2005-07-22

175  $\mu\text{rad}$ 的机械误差<sup>[4]</sup>,跟踪精度低,无法完成 ATP 系统的跟踪任务。如果单独利用精跟踪系统,由于精跟踪系统惯量小,带宽高,调整速度快,精度高,可以满足 ATP 系统的跟踪误差要求。但是精跟踪系统的最大跟踪范围约为 $\pm 160 \text{ mrad}$ ,不能完成大范围的跟踪。因此,只有粗跟踪系统和精跟踪系统配合工作,构成复合轴系统,利用粗跟踪系统的大范围跟踪能力和精跟踪系统的高速度、高精度跟踪能力,才能完成 ATP 系统的跟踪任务。利用复合轴系统来完成 ATP 系统的跟踪任务,相应便会产生根据对粗跟踪和精跟踪系统跟踪频率的要求,设计粗跟踪和精跟踪系统带宽的需要。

### 2.2 复合轴系统

复合轴系统是在大惯量粗跟踪系统的光路中放入精跟踪系统构成的<sup>[7]</sup>。复合轴系统结构如图 1 所示<sup>[7]</sup>,由粗跟踪系统、粗跟踪探测器、精跟踪系统、精跟踪探测器以及控制系统组成。粗跟踪系统进行光信号的捕获与粗跟踪<sup>[8]</sup>;精跟踪系统对粗跟踪系统的跟踪误差进行精跟踪,精跟踪系统的带宽反映了整个复合轴系统跟踪的快速能力。复合轴系统的控制系统框图如图 2 所示<sup>[7]</sup>。 $E_{\text{main}}, E_{\text{aux}}, D_{\text{main}}, D_{\text{aux}}, G_{\text{main}}, G_{\text{aux}}$  分别为主从系统的误差,控制器和对象传递函数。

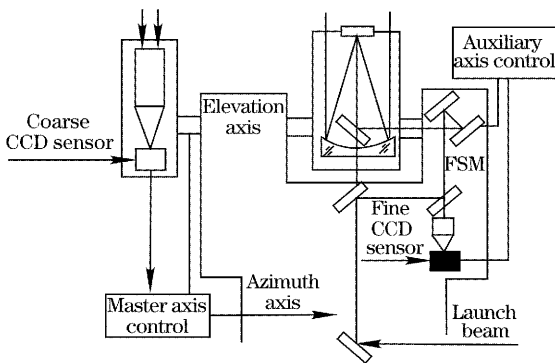


图 1 复合轴系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of the composite axis system

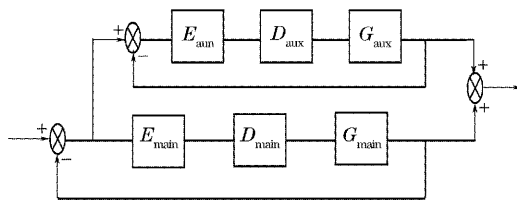


图 2 复合轴控制系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of the composite axis control system

粗跟踪系统的开环传递函数为<sup>[7]</sup>

$$F_{\text{main}}(x) = E_{\text{main}}(s)D_{\text{main}}(s)G_{\text{main}}(s),$$

$s$  为拉普拉斯变量,精跟踪系统的传递函数为

$$F_{\text{aux}}(x) = E_{\text{aux}}(s)D_{\text{aux}}(s)G_{\text{aux}}(s),$$

复合轴系统的开环传递函数为:

$$F_{\text{open}}(s) = F_{\text{main}}(s) + F_{\text{aux}}(s) + F_{\text{main}}(s)F_{\text{aux}}(s), \quad (1)$$

闭环传递函数为

$$F_{\text{close}}(s) = \frac{F_{\text{main}}(s) + F_{\text{aux}}(s) + F_{\text{main}}(s)F_{\text{aux}}(s)}{[1 + F_{\text{main}}(s)][1 + F_{\text{aux}}(s)]}, \quad (2)$$

## 3 带宽设计的途径

### 3.1 粗跟踪系统的误差模拟

粗跟踪系统的误差为 175  $\mu\text{rad}$ ,因此,研究中需要得到粗跟踪系统的误差随时间的变化曲线。将力矩扰动加到粗跟踪系统负载上,用力矩扰动对粗跟踪系统的扰动输出来模拟粗跟踪系统的误差。扰动作用下的粗跟踪系统数字控制框图如图 3 所示。图中的  $J, L, R, k_t, N$  分别为系统的等效惯量,等效电感,电阻,力矩常量,传动比,  $PID$  为系统的控制器,  $T_d$  为扰动输入,  $T$  为采样周期,  $\alpha(t), \beta(t)$  分别为粗跟踪系统的水平和俯仰方向的转动角度。当在粗跟踪系统负载上加某一具有确定均方差和标准偏差值的高斯白噪声力矩扰动,扰动输出的最大幅度为 175  $\mu\text{rad}$  左右时,便可以用此扰动输出来模拟粗跟踪系统的误差了。误差随时间的变化曲线如图 4 所示。

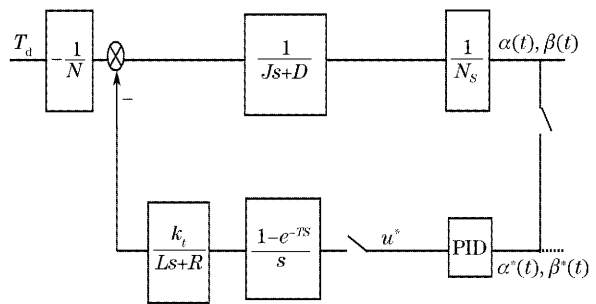


图 3 扰动作用下的粗跟踪系统数字控制框图

Fig. 3 Digital block diagram of the coarse tracking control system for disturbance

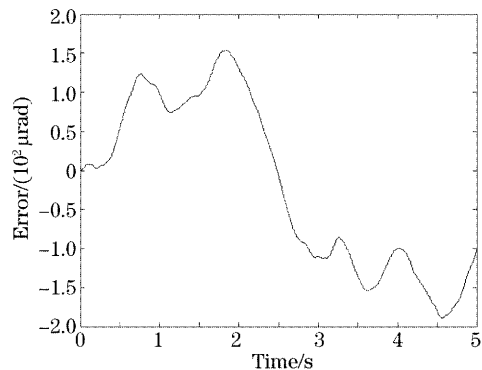


图 4 粗跟踪系统误差曲线

Fig. 4 Error curve of the coarse tracking system

### 3.2 卫星相对运动计算

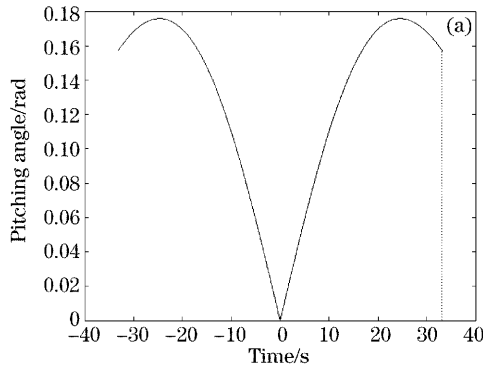
ATP 系统跟踪的是另一颗卫星上的运动终端,因此,跟踪研究中,需要得到卫星的运行轨道。计算得到在高轨卫星上观察低轨卫星运动的方程:

$$\theta(t) = \arccos(z_{LEO}/d), \quad (3)$$

$$\begin{cases} \varphi(t) = \arctan(x_{LEO}/y_{LEO}), & (y_{LEO} \geq 0), \\ \varphi(t) = \arctan(x_{LEO}/y_{LEO}) \pm \pi, & (y_{LEO} < 0), \end{cases} \quad (4)$$

$\theta(t)$ ,  $\varphi(t)$  分别为卫星的俯仰角和方位角,其中:

$$\begin{cases} x_{LEO} = -X_{LEO} \cos(\omega_{GEO}t) + Z_{LEO} \sin(\omega_{GEO}t), \\ y_{LEO} = Y_{LEO}, \\ z_{LEO} = R_{GEO} - X_{LEO} \sin(\omega_{GEO}t) - \\ \quad Z_{LEO} \cos(\omega_{GEO}t), \end{cases}$$



$$\begin{cases} X_{LEO} = r_{LEO} \sin(\omega_{LEO}t) \cos i, \\ Y_{LEO} = r_{LEO} \sin(\omega_{LEO}t) \sin i, \\ Z_{LEO} = r_{LEO} \cos(\omega_{LEO}t), \\ d = \sqrt{x_{LEO}^2 + y_{LEO}^2 + z_{LEO}^2}, \end{cases}$$

$R_{GEO}$ ,  $r_{LEO}$  分别为高轨、低轨卫星与地心的距离,  $\omega_{GEO}$ 、 $\omega_{LEO}$  分别为高轨、低轨卫星的角速度,  $i$  为高轨卫星轨道与低轨卫星轨道的夹角。

当两轨道的夹角为  $45^\circ$  时,计算得到在高轨卫星上观察低轨卫星的可见时间为 66.55 min。俯仰角和方位角随时间的变化关系如图 5 所示。由图可知,卫星的俯仰角与方位角相比,变化较快,因此主要考虑对俯仰角的跟踪。

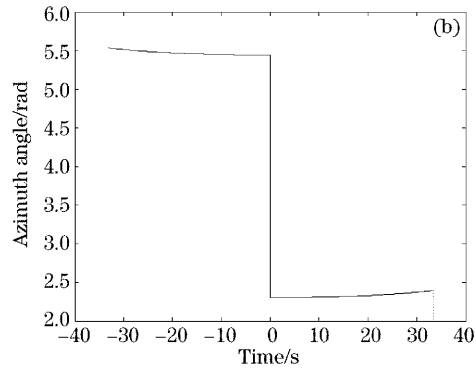


图 5 卫星俯仰角和方位角随时间的变化

Fig. 5 Pitching angle and azimuth angle of the satellite versus time

### 3.3 系统整定及算法改进

复合轴系统中,需要对粗跟踪系统和精跟踪系统进行整定,以得到满足指定响应要求的系统对应的控制器参量。单纯形算法具有操作简单、计算量小、适用面广、便于计算机实现等优点<sup>[9]</sup>。因此采用单纯形算法对系统进行整定。

将传统的单纯形算法进行改进,使其实现了指定带宽的系统整定。利用改进的指定带宽的单纯形算法,基本可以完成指定带宽的系统整定。

选择目标函数为

$$J = \sum_{n=0}^k |e(nt_s)|n.$$

利用改进的指定带宽的单纯形算法,对某一 S 域开环传递函数为  $F(s) = 697/(66s^2 + 100s)$  的跟踪系统进行整定,得到了一系列指定带宽的系统对应的控制器参量,如表 1 所示。 $k_p$  为控制器的比例参量,  $t_d$  为积分参量,  $t_i$  为微分参量。该方法进一步优化后,还可应用到控制系统的在线整定过程中。

表 1 带宽与相应的控制器参量

Table 1 Bandwidth and the corresponding controller parameters

Bandwidth / Hz	$k_p$	$t_d$	$t_i$
169	14.0	5.1	2.5
82	15.5	2.2	3.5
56	14.3	1.6	4.4
43	11.8	1.5	7.1
35	11.3	1.3	6.7
29	9.8	1.3	7.5
23	7.4	1.3	10.1
20	7.1	1.2	9.4

## 4 带宽设计研究结果

### 4.1 粗跟踪系统带宽设计

粗跟踪系统需要完成将光信号导入并保持在精跟踪视场内的任务。精跟踪探测器为四象限探测器,每个像素的视场约为  $17 \mu\text{rad}$ 。因此,要使光信号导入并保持在精跟踪视场内,必须保证粗跟踪系统

的跟踪误差小于 $17\ \mu\text{rad}$ 。利用改进的指定带宽的单纯形算法,对粗跟踪系统进行了整定,得到了一系列不同带宽的粗跟踪系统。粗跟踪控制系统的输入信号为卫星的相对运动信号及卫星扰动信号,这里考虑的扰动信号为影响较小的低幅度低频率信号。由上面计算得到的卫星运行轨道,考虑到粗跟踪系统本身的机械误差,得到了不同带宽的粗跟踪系统的跟踪误差,如图 6 所示。

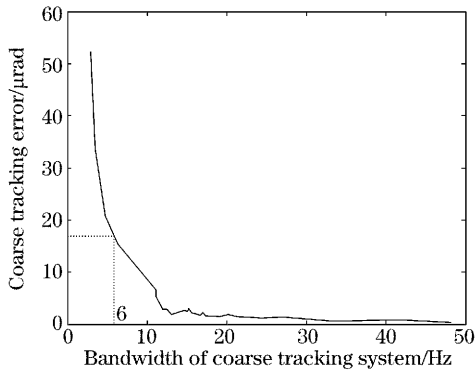


图 6 粗跟踪系统误差随带宽的变化

Fig. 6 Tracking error of the coarse tracking system varying with the bandwidth of the coarse tracking system

当粗跟踪系统带宽大于 $6\ \text{Hz}$ 时,跟踪误差小于 $17\ \mu\text{rad}$ 。因此,粗跟踪系统要完成使光信号导入并保持在精跟踪视场内的任务,其带宽应设计为大于 $6\ \text{Hz}$ 。具体的,当粗跟踪系统带宽为 $6\ \text{Hz}$ 时,跟踪误差随时间的变化如图 7 所示。由图可知:粗跟踪系

统的最大跟踪误差为 $16\ \mu\text{rad}$ 左右,从而能够保证将光信号保持在精跟踪视场内。作为比较,给出了粗跟踪系统带宽为 $3\ \text{Hz}$ 和 $12\ \text{Hz}$ 时,跟踪误差随时间的变化曲线,如图 8 所示。由图 8(a)可知,粗跟踪系统带宽为 $3\ \text{Hz}$ 时,跟踪误差为 $50\ \mu\text{rad}$ ,不能完成粗跟踪系统的任务。由图 8(b)可知,粗跟踪系统带宽为 $12\ \text{Hz}$ 时,跟踪误差为 $5\ \mu\text{rad}$ ,可以完成粗跟踪系统的任务。由此,我们得到,星间激光通信中,在粗跟踪系统的误差为 $175\ \mu\text{rad}$ 左右,所用精跟踪探测器的像素视场约为 $17\ \mu\text{rad}$ 的条件下,要完成对另一运动卫星的粗跟踪,粗跟踪系统的最小设计带宽为 $6\ \text{Hz}$ 的结论。这为星间激光通信中复合轴系统中的粗跟踪控制系统设计提供了重要依据。

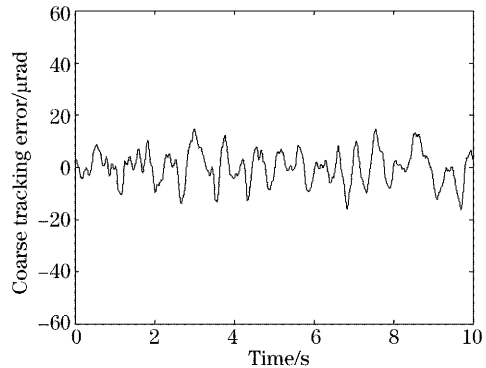


图 7 粗跟踪系统带宽为  $6\ \text{Hz}$  时的粗跟踪误差

Fig. 7 The tracking error of coarse tracking system when the bandwidth of the coarse tracking system is  $6\ \text{Hz}$

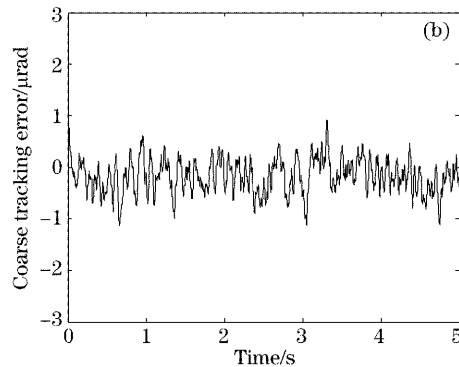
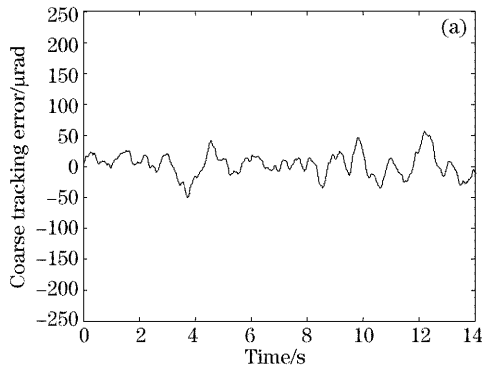


图 8 粗跟踪系统带宽为  $3\ \text{Hz}$  (a)和  $12\ \text{Hz}$  (b)时,跟踪误差随时间的变化曲线

Fig. 8 Coarse tracking error varying with time when the bandwidths are  $3\ \text{Hz}$  (a) and  $12\ \text{Hz}$  (b) respectively

#### 4. 2 粗、精跟踪系统的配合关系及精跟踪系统带宽设计

当光信号被粗跟踪系统导入精跟踪视场后,精跟踪系统也开始工作。精跟踪系统主要是对粗跟踪系统的跟踪误差进行补偿,使复合轴系统的最终误差保持在 $1\ \mu\text{rad}$ 之内。利用改进的指定带宽的单纯形算法对精跟踪系统进行整定,得到了一系列不同

带宽的精跟踪系统。针对不同带宽的粗跟踪系统和精跟踪系统,我们得到粗跟踪系统与精跟踪系统的配合关系,如图 9 所示。由图 9(a)可知,当粗跟踪系统带宽为 $6\ \text{Hz}$ 时,与之配合的精跟踪系统带宽应大于 $28\ \text{Hz}$ 。由图 9(b)可知,当粗跟踪系统带宽为 $12\ \text{Hz}$ 时,与之配合的精跟踪系统的带宽应大于 $17\ \text{Hz}$ 。由于粗跟踪系统带宽只能做到 $10\ \text{Hz}$ 以内,

因此我们主要研究粗跟踪系统带宽设计为恰能完成将光线导入并保持在精跟踪视场内这一任务时的复合轴系统,即粗跟踪系统带宽为6 Hz的复合轴系统。此时复合轴系统的跟踪误差随精跟踪带宽的变化关系如图9(a)所示,由图可知:当精跟踪系统带宽大于28赫兹时,复合轴系统跟踪误差便小于 $1\ \mu\text{rad}$ 了。因此,不考虑卫星的中高频扰动,粗跟踪系统带宽为6 Hz时,精跟踪系统带宽须大于28 Hz。

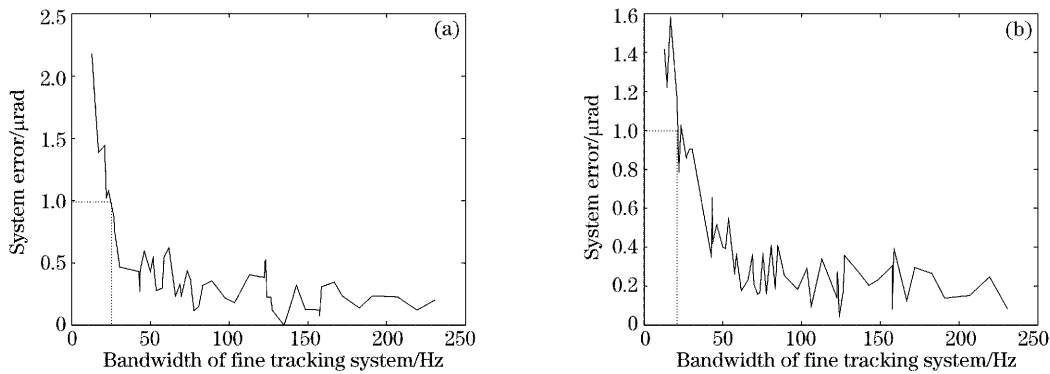


图9 粗跟踪系统与精跟踪系统的配合关系。粗跟踪系统带宽(a) 6 Hz, (b) 12 Hz

Fig. 9 Cooperation of the coarse tracking system and the fine tracking system. The bandwidth of the coarse tracking system (a) 6 Hz, (b) 12 Hz

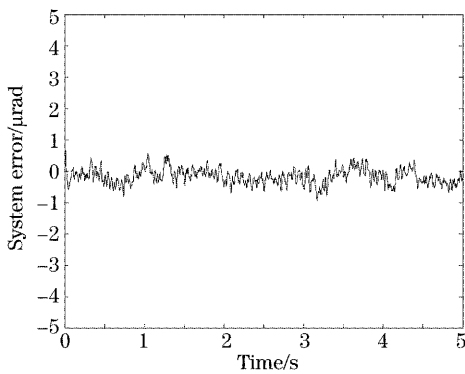


图10 精跟踪系统带宽为28 Hz时的系统误差

Fig. 10 System tracking error when the bandwidth of the fine tracking system is 28 Hz

### 4.3 中高频扰动作用下的带宽设计

卫星除了受到低频率扰动外,还会受到一些中高频扰动的影响<sup>[6]</sup>。由于粗跟踪系统的带宽比较低,对中高频扰动基本起不到抑制作用。因此,主要利用提高精跟踪系统带宽的方式,提高复合轴系统对中高频扰动的抑制能力。假设卫星受到一幅度为 $5\ \mu\text{rad}$ ,频率为30 Hz的中频扰动作用,粗跟踪系统带宽设计为6 Hz,复合轴系统的跟踪误差随精跟踪系统带宽的变化曲线,如图11所示。由图可知:当精跟踪系统带宽大于140 Hz时,便可以较好地完成任务。因此,在此中频扰动作用下,精跟踪系统

具体的,当精跟踪系统带宽为28 Hz时,复合轴系统的跟踪误差随时间的变化如图10所示,由图10可知,此时系统的跟踪误差小于 $1\ \mu\text{rad}$ 。以上得到了粗跟踪系统和精跟踪系统的配合关系,给出了精跟踪系统带宽不同的复合轴系统的跟踪性能。由此,得到了一定条件下,精跟踪系统的最小设计带宽。为星间激光通信中的复合轴控制系统设计提供了重要依据。

带宽应该设计为大于140 Hz方可。中高频扰动作用下,复合轴系统的带宽设计是一个难点,上面只是给出了一种将各种扰动归结简化为一种确定中高频扰动的情况。但是,卫星所受的中高频扰动有很多,从低频,中频,到最高频率达100 Hz的高频扰动都存在<sup>[10~13]</sup>。因此,中高频扰动下的带宽设计中,需要根据卫星所受各种扰动的具体特性,来相应进行带宽的设计。这是一项非常复杂和困难的工作。

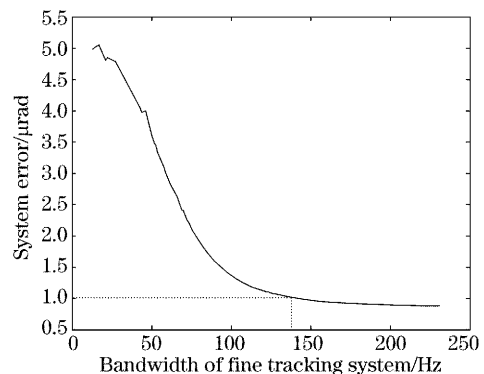


图11 扰动作用下,系统误差随精跟踪系统带宽的变化  
Fig. 11 With disturbance, system tracking error varying with the bandwidth of the fine tracking system

## 5 结 论

星间激光通信中,由粗跟踪系统和精跟踪系统

组成的复合轴系统完成了 ATP 系统的大范围、高精度跟踪任务。由于研究中需要一系列不同带宽的粗跟踪系统和精跟踪系统,对系统整定所用的单纯形算法做了改进,实现了指定带宽的系统整定。计算得到了卫星的运行轨道,考虑到粗跟踪系统的机械误差,对复合轴系统进行了基于 Z 变换的数字模拟以研究复合轴系统的控制系统设计。得到了复合轴系统中的粗跟踪系统误差随其带宽的变化关系,从而给出了要完成将光信号导入并保持在精跟踪探测器内这一任务时,粗跟踪系统的带宽设计;给出了粗跟踪系统和精跟踪系统的配合关系;得到了在粗跟踪系统带宽一定的情况下,复合轴系统跟踪误差随精跟踪系统带宽的变化关系,从而给出了复合轴系统中精跟踪系统的带宽设计;最后研究了中高频扰动作用下,复合轴系统的带宽设计。为星间激光通信中的复合轴系统控制系统设计提供了重要依据。

### 参 考 文 献

- 1 Qi Xiaoling, Cai Zhigang, Xu Yuke *et al.*. A theoretical study of optical coupling in optical components[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 521~526 (in Chinese)  
齐晓玲,蔡志岗,徐宇科等. 光耦合理论及其在通信元器件中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 521~526
- 2 Yu Youlong, Zhao Hongxia, Liu Shengchun *et al.*. Time-domain demodulation technique for active fiber Bragg grating sensor system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 983~987 (in Chinese)  
余有龙,赵洪霞,刘盛春等. 光纤光栅传感系统有源时域解调技术[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 983~987
- 3 G. Lambert, W. L. Casey. *Laser Communication in Space* [M]. Boston, London: Artech House, 1995. 11~80
- 4 E. Perez, M. Bailly, J. M. Pairet. Pointing acquisition and tracking system for Silex inter-satellite optical link[C]. *Proc. SPIE*, 1989, **1111**: 277~298
- 5 Michel Bailly, Eric Perez. The pointing, acquisition and tracking system of Silex European program; a major technological step for intersatellites optical communication [C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1417**: 142~157
- 6 Takashi Jono, Morio Toyoshima, Nobuhiro Tkahashi *et al.*. Laser tracking test under satellite microvibrational disturbances by OICETS ATP system[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4714**: 97~104
- 7 Fu Chengyu, Ma Jianguang, Ye Buxia *et al.*. The application research of the composite axis control system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(4): 1~12 (in Chinese)  
傅承毓,马佳光,叶步霞等. 复合轴控制系统应用研究[J]. *光电工程*, 1998, **25**(4): 1~12
- 8 Toni Tolker Nielsen. Pointing, acquisition and tracking system for the free space laser communication system, SILEX[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2381**: 194~205
- 9 Han Pu, Dong Ze, Yao Wanye *et al.*. Development and application of optimization algorithm [C]. *Paper Collection of National Simulation Technology Conference*, 2003. 67~70 (in Chinese)  
韩璞,董泽,姚万业等. 最优化算法的发展及应用[C]. *全国仿真技术学术会议论文集*, 2003. 67~70
- 10 Xie Mujun, Ma Jianguang, Fu Chengyu *et al.*. Precision tracking and pointing technologies in space optical communication [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(1): 13~16 (in Chinese)  
谢木军,马佳光,傅承毓等. 空间光通信中的精密跟踪瞄准技术[J]. *光电工程*, 2000, **27**(1): 13~16
- 11 Mujun Xie, Jianguang Ma, Chengyu Fu. Design and experiment of a LQ controller used in high-bandwidth fast steering mirror system[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4025**: 250~258
- 12 Victor A. Skormin, Mark A. Tascillo. Jitter rejection technique in a satellite-based laser communication system [J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(11): 2764~2769
- 13 Victor A. Skormin, Mark A. Tascillo. Adaptive jitter rejection technique applicable to airborne laser communication systems[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(5): 1263~1267