

# 星间光通信复合轴跟踪结构性能和误差抑制能力分析

聂光戌<sup>1</sup>, 臧守飞<sup>1</sup>, 郑磊刚<sup>1</sup>, 臧旭<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司军事代表室, 辽宁 沈阳 100850)

**摘要** 在星间激光通信系统中, 捕获、跟踪和瞄准 (Acquisition Tracking and Pointing, ATP) 技术是一项关键技术, ATP 系统的跟踪瞄准精度对整个通信的成功与否起着至关重要的作用。主要对星间通信的复合轴跟踪进行了分析。首先介绍了星间光通信的概念和用激光实现星间通信的优点, 然后分析了复合轴跟踪结构的特点, 给出了复合轴跟踪控制系统的视场匹配关系和性能分析, 最后采用仿真对比得出选择合适的粗、精跟踪带宽和带宽比对系统误差有突出抑制能力的结论。

**关键词** 星间光通信; 复合轴; 跟踪; 稳定性

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.02.010

**中图分类号** V297 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)02-0047-05

随着通信技术, 光电技术以及相关器件的发展, 为了解决卫星通信的容量瓶颈问题, 各国将星间通信的研究投向了更高频率的激光, 星间激光通信逐渐成为极具前景的通信方式, 给天基信息网, 开发太空、利用广阔的宇宙空间资源提供高数据率、大容量、低功耗通信的最佳方案。星间光通信实现起来还存在诸多难题。其中最为关键的问题是在远距离、窄光束情况下, 如何建立起光通信链路以及如何保证持续可靠的通信。为解决这个问题, 在星间光通信中提出了捕获、跟踪及瞄准 (Acquisition Tracking and Pointing, ATP) 技术。ATP 系统用以建立星间光通信链路, 并确保两通信终端能精确对准, 实现星间可靠通信。

## 1 星间光通信概念及 ATP 技术介绍

星间光通信与光纤通信和星间微波通信相比具有 2 个显著的特点, 一是星间光通信通过自由空间传递信息, 不像光纤通信受传播媒质色散和非线性效应限制, 是一种无色散、无非线性和无需成本的信息传输通道; 二是由于星间光通信利用激光作为载波传递信息, 带来了许多微波通信无法比拟的优点, 表 1 给出了典型激光波段和微波波段不同的性质。

表 1 微波波段和光波段比较

Tab. 1 Compare microwave band with light-wave band

参数	S 波段	Ka 波段	V 波段	光波段
频率/GHz	2	27	60	-
波长/cm	15	1.1	0.5	0.83
天线孔径/m	2	2	1	0.07
天线增益/dB	30	52	53	108
光束宽/ $\mu$ rad	75 000	5 500	7 000	12

相对于星间微波通信, 光通信优点突出表现在: ①数据传输率高, 通信容量大; ②较小的发射功率需求;

\* 收稿日期: 2010-09-27

基金项目: 航空科学基金资助项目 (20095196013)

作者简介: 聂光戌 (1971-), 男, 湖北天门人, 副教授, 博士, 主要从事航空武器系统建模仿真与效能评估研究。

E-mail: zangshoufei945@yahoo.com.cn

③较小的收发天线和系统结构;④高保密性和抗干扰能力。而星间光通信系统具有较小的收发天线和轻量化,低功耗等优势,很适合在卫星平台上,特别是在小卫星通信中的应用;其抗干扰、高保密性使得其在国防军事领域有着重要应用;而它的高数据传输率和大通信容量在商业和民用上的应用前景更为广泛,所以星间光通信目前已成为卫星通信重点发展的方向之一。

星间激光通信 ATP 技术是实现可靠通信的保障,可靠的星间光通信要求光收发端之间视轴瞄准精度达到亚微弧度量级,由于卫星平台和空间环境引起的振动及其它干扰,需要 ATP 系统要有很强的扰动抑制能力,这给系统提出苛刻的控制精度和控制带宽要求。为了实现高精度高带宽的跟踪性能和误差抑制能力,就必须采用多环的控制结构,实现粗跟踪和精跟踪功能。目前,在星间光通信跟踪系统多采用复合轴控制(Composite Axis Control)结构。

## 2 复合轴跟踪控制结构及性能分析

星间光通信 ATP 系统采用复合轴控制结构通常由 2 个嵌套控制回路组成。复合轴跟踪系统的结构见图 1。通常由 2 个嵌套控制系统组成。低带宽的粗跟踪系统嵌套高带宽的精跟踪系统,通常是在大惯量常平架的主光路中插入一高谐振频率的快速倾斜镜(Fast Steering Mirror, FSM)而构成<sup>[1]</sup>。外层常平架及粗跟踪接收组件构成粗跟踪系统也叫主跟踪系统,它具有大的驱动能力和动态范围,以及较窄的控制带宽,跟踪精度低于最终要求的指标,在粗跟踪探测器的跟踪误差下驱动机架可产生大的主望远镜调转,主要用于光轴的初始定向,实现捕获和粗跟踪。精跟踪系统也叫子跟踪系统,具有很高的位置分辨能力,高的控制带宽和增益,对宽功率谱振动具有很强的抑制能力。精跟踪实质上是校正粗跟踪的残余误差,以保证快速和高精度的跟踪。

下面主要针对双检测器复合轴跟踪控制系统进行分析,双检测型采用粗、精 2 个探测器,分别构成各自的控制回路,图 2 为双检测器复合轴跟踪控制系统和其等效控制框图<sup>[2]</sup>。其中  $D_c$ 、 $D_f$  分别为粗、精探测器传递函数,  $C_c(s)$ 、 $P_c(s)$ 、 $C_f(s)$ 、 $P_f(s)$  分别为粗、精控制器和控制对象的传递函数。

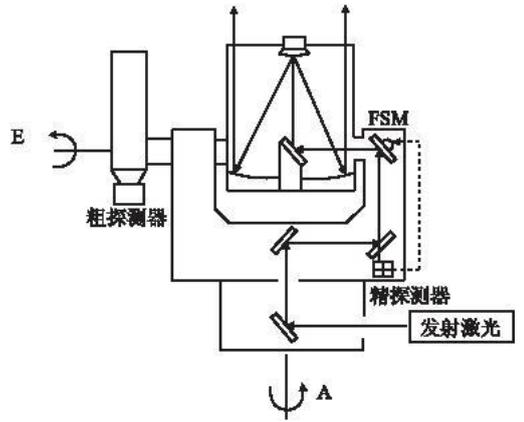


图 1 复合轴跟踪系统结构示意图

Fig. 1 Schematic constitution of the composite axis system

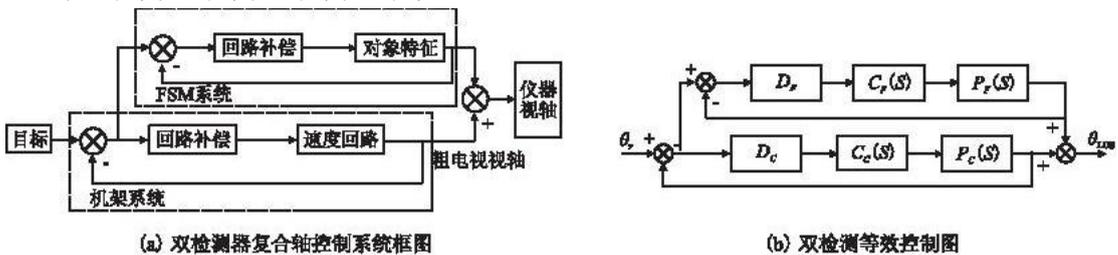


图 2 双检测器复合轴跟踪控制系统和其等效控制框图

Fig. 2 Block diagram of the composite axis system with double sensor and the composite axis equivalent control system

双检测型复合轴控制系统中,粗跟踪系统通过粗跟踪探测器得到的视轴误差,调节主望远镜指向,实现捕获和粗跟踪,并将光信号引入精跟踪视场;精跟踪探测器探测视轴残余,由精跟踪系统的控制器控制精跟踪执行机构对视轴进行精校正,达到跟踪精度。在双检测型复合轴控制系统中,由图 2(b)得粗、精跟踪系统的闭环等效传递函数分别为:

$$G_c(s) = \frac{D_c C_c(s) P_c(s)}{1 + D_c C_c(s) P_c(s)} \quad (1)$$

$$G_f(s) = \frac{D_f C_f(s) P_f(s)}{1 + D_f C_f(s) P_f(s)} \quad (2)$$

双检测型的闭环等效传递函数为:

$$G(s) = \frac{D_c C_c(s) P_c(s) + D_f C_f(s) P_f(s) + D_c C_c(s) P_c(s) D_f C_f(s) P_f(s)}{[1 + D_c C_c(s) P_c(s)][1 + D_f C_f(s) P_f(s)]} \quad (3)$$

由式(1) - (3)可见,双检测型复合轴系统的特征方程为粗、精跟踪系统的特征方程的乘积,即粗、精跟

踪系统的极点都是复合轴系统的极点,所以,只有粗、精跟踪系统都稳定,则复合轴系统才是稳定的<sup>[3-4]</sup>。

由式(3)可知双检测型复合轴系统的误差传递函数  $R(s)$  为:

$$R(s) = 1 - G(s) = \frac{1}{[1 + D_C C_C(s) P_C(s)][1 + D_F C_F(s) P_F(s)]} \quad (4)$$

粗、精跟踪系统的误差传递函数分别为:

$$G_1(s) = \frac{1}{1 + D_C C_C(s) P_C(s)} \quad (5) \quad G_2(s) = \frac{1}{1 + D_F C_F(s) P_F(s)} \quad (6)$$

可见  $R(s)$  是粗、精跟踪系统误差传递函数的乘积,故复合轴系统可以达到很高的控制精度。

从图 2(b) 可知,精跟踪系统的误差为:

$$e_F(s) = \frac{e_c(s)}{1 + D_F C_F(s) P_F(s)} = \frac{\theta_r}{[1 + D_C C_C(s) P_C(s)][1 + D_F C_F(s) P_F(s)]} \quad (7)$$

式中  $e_F, e_c$  分别是精、粗跟踪系统的误差,故复合轴系统误差等于精跟踪系统的误差。精跟踪系统实际上是对粗跟踪系统误差进行前馈补偿。

由图 2(b) 和式(2)得开环传递函数为:

$$G_{open}(s) = D_C C_C(s) P_C(s) + D_F C_F(s) P_F(s) + D_C C_C(s) P_C(s) D_F C_F(s) P_F(s) \quad (8)$$

### 3 扰动误差抑制能力分析

#### 3.1 带宽与误差的关系

探测器噪声等效角可用 NEA (Noise Equivalent Angle) 表示,探测器噪声模型可以用幅值为 NEA 的白噪声通过跟踪系统采样来表示<sup>[5]</sup>。设系统的闭环传递函数为  $H(s)$ , 采样频率为  $f_s$ , 采样过程相当于一个低通滤波,其转折频率为  $f_s/2$ , 见图 3, 其中  $\theta_{LOS}$  为视轴跟踪误差。

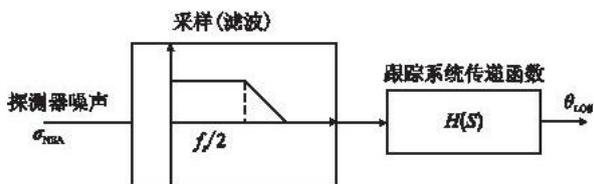


图 3 跟踪探测器噪声模型

Fig. 3 The model of tracking detector noise

噪声等效角的功率谱密度为  $S_{NEA}(f) = \sigma_{NEA}^2(f)$ , 则可得到:

$$\theta_{LOS} = \left[ \frac{1}{2\pi j} \int_{-\frac{f_s}{2}}^{\frac{f_s}{2}} S_{NEA}(f) |H(2\pi jf)H(-2\pi jf)| d\omega \right]^{\frac{1}{2}}$$

设闭环传递函数的带宽  $f_c$ , 阻尼系数为  $\xi$ , 则上式<sup>[6]</sup>为:

$$\theta_{LOS} = \sigma_{NEA} \left[ \frac{1 + 2\xi}{(1 + 2\xi) \left(1 - \pi \frac{f_c}{f_s}\right) - 1} \cdot \frac{f_c}{f_s} \right]^{\frac{1}{2}}$$

图 4 给出了探测器均方值误差与闭环带宽和系统采样频率比值的关系, 取  $\sigma_{NEA} = 0.1$ , 从图中可以看出, 探测器噪声对跟踪系统的影响与系统带宽有关。采样频率一定的情况下, 系统带宽越窄, 探测器噪声对系统影响就越小。

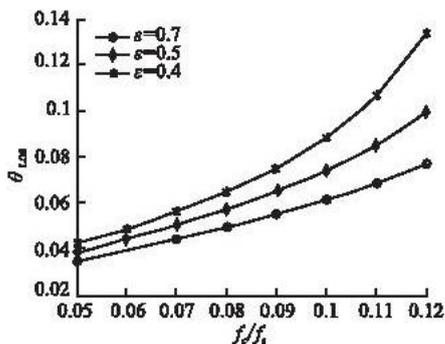


图 4  $\theta_{LOS}$  与  $f_c/f_s$  的关系

Fig. 4 The relation of  $\theta_{LOS}$  and  $f_c/f_s$

#### 3.2 复合轴的带宽及带宽比分析

粗跟踪系统和精跟踪系统的开环传递函数形式均为:  $\frac{K(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{s^2(T_3s + 1)(T_4s + 1)}$ , 取粗、精跟踪系统的开环传

递函数分别为  $G_{o1}(s) = \frac{100(0.4s + 1)(1.2s + 1)}{s^2(4s + 1)(0.02s + 1)}$ ,  $G_{o2}(s) = \frac{320(0.6s + 1)(2.2s + 1)}{s^2(7s + 1)(0.03s + 1)}$ , 可以得出该 II 阶粗、精跟踪系统的复合轴的幅频特性和误差函数, 见图 5。

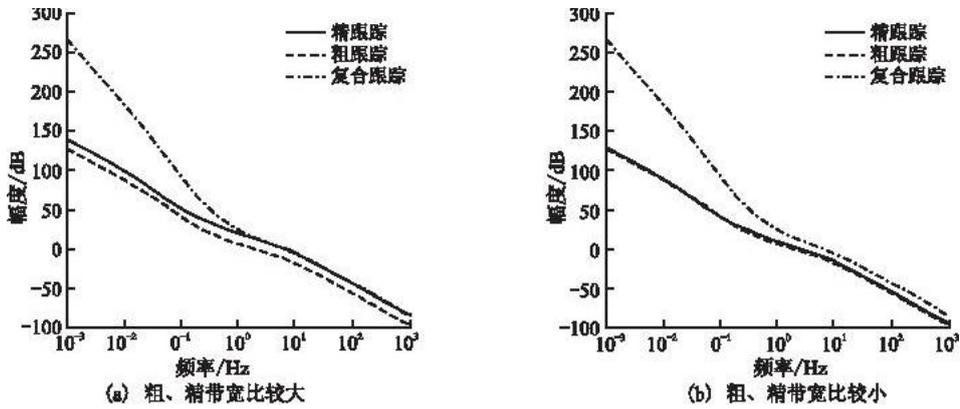


图5 复合轴开环幅频特性

Fig. 5 Open-loop amplitude-frequency characteristics of the composite axis system

图5(a)仿真结果是对粗、精系统带宽比较小的时候,由图5(a)可知在全频阶段复合轴的开环频率特性满足上述  $\omega_{o1}/\omega_{o2} \ll 1$  时所述关系:在低频段开环传递函数是粗、精跟踪环的乘积,具有较高的静态误差抑制能力,而在中、高频段,复合轴系统具有和精跟踪系统相同的特性,有较高的带宽和动态误差抑制能力,精跟踪系统的稳定性和控制精度决定了复合轴的稳定性和精度<sup>[7]</sup>。改变精跟踪系统的开环传递函数使其带宽变小,取为  $G_{o2}(s) = \frac{120(0.5s+1)(1.5s+1)}{s^2(5s+1)(0.03s+1)}$ ,则再次仿真得到复合轴的开环幅频特性图5(b)。比较图5(a)和图5(b)可得:带宽比越大,这种关系越背离。当粗、精系统带宽比较大时,复合轴的幅相稳定裕度要低于精跟踪系统的稳定裕度。相位裕度低,表明系统振荡指标大,容易引起系统的不稳定。特别是在粗跟踪系统未处于稳定跟踪的时候,精跟踪系统无动作,即贡献为零,跟踪误差完全取决于粗跟踪系统,因此粗跟踪系统必须是稳定的,这是复合轴跟踪系统的稳定跟踪的前提<sup>[8]</sup>。

在复合轴系统中,精跟踪系统对粗跟踪系统的残差进行校正,因此对精跟踪系统带宽要求主要取决于粗跟踪系统残差的高频部分和精跟踪探测器的信噪比。粗跟踪系统残差的高频噪声直接影响精跟踪系统的跟踪精度和稳定性,精跟踪系统的稳定性又影响复合轴系统的稳定性。图6是复合轴及粗、精跟踪系统的误差传递函数幅频特性曲线。可以看到,粗、精跟踪系统带宽比较大时,如图6(a)所示,过零峰值较接近,误差信号被放大,降低了误差有效抑制范围,影响系统的稳定性。而降低粗、精跟踪系统的带宽比,如图6(b)所示,可以提高误差的抑制范围和系统的稳定性。降低粗、精跟踪系统的带宽比可以避免对噪声信号的放大,保证复合轴系统的稳定性。

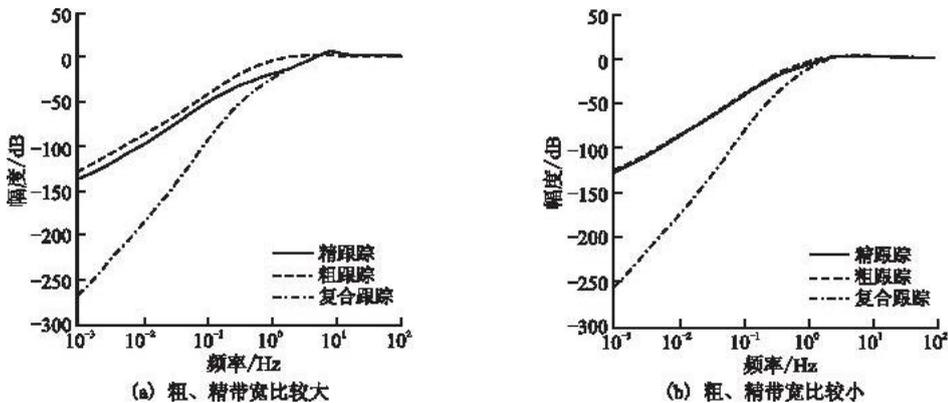


图6 复合轴及粗、精跟踪系统的误差传递函数幅频特性曲线

Fig. 6 Error curves of amplitude-frequency characteristics of the composite axis system and coarse extractive tracking system

综上所述可得:粗、精跟踪系统带宽比越小,抑制能力越高,系统的稳定性越好。这样复合轴系统才能体现出其低频误差抑制能力是粗、精跟踪系统抑制能力之和,而中、高频与精跟踪系统相近。所以在设计复合轴系统时,两个系统都要有足够的稳定裕度,且频带宽度要有一定的差别,以防止跟踪中发生竞争。一般情况下要求精跟踪系统的带宽大于粗跟踪系统的带宽。在实际应用中,具体带宽比的大小选择还需要考虑系统的工作频率,扰动的带宽以及系统要求的精度分配,进行合理选择。

## 4 结束语

复合轴以其独特的结构特点,实现了星间光通信的高精度和快速性要求,确保了在背景噪声和扰动下通信链路的建立。本文主要分析了复合轴跟踪结构的性能和系统带宽对误差的抑制能力,得出围绕系统的工作要求,选择合适的跟踪系统带宽及带宽比对系统的跟踪性能有很大的影响,本文的研究不仅对星间通信技术有一定帮助,对同样采用复合轴跟踪结构的激光武器跟踪瞄准技术也提供了一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光电工程,1989,16(3):20-25.  
MA Jiaguang. The basic technique of tracking and pointing system[J]. Opto - electron engineering,1989,16(3):20-25. (in Chinese)
- [2] 傅承毓,马佳光,叶步霞. 复合轴控制系统应用研究[J]. 光电工程,1998,25(4):1-12.  
FU Chengyu,MA Jiaguang, YE Buxia. The application research of the composite axis control system[J]. Opto - electron engineering,1998,25(4):1-12. (in Chinese)
- [3] 刘廷霞. 光电跟踪系统复合轴伺服控制技术的研究[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所,2004.  
LIU Tingxia. The research of compound - axis servo control technique of O - E tracking system[M]. Changchun:Changchun institute of optics - fine mechanics and physics,2004. (in Chinese)
- [4] 于淼. 车载平台系统的稳定研究[D]. 长春:长春理工大学,2008.  
YU Miao. Study on stabilization of carborne equipment platform system[D]. Changchun:Changchun University of science and technology,2008. (in Chinese)
- [5] 胡浩军. 运动平台捕获、跟踪与瞄准系统视轴稳定技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005.  
HU Haojun. Line - of - sight stabilization of acquisition, tracking and pointing system on moving bed[D]. Changsha:National university of defense technology, 2005. (in Chinese)
- [6] Held K J, Barry J D. Precision optical pointing and tracking from spacecraft with vibration noise[J]. SPIE, 1986,22(1):231-237.
- [7] 李文军. 复合轴光电跟踪系统控制策略的研究[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所,2006.  
LI Wenjun. Study on control strategy of O - E tracking systems with compound axis[D]. Changchun:Changchun institute of optics - fine mechanics and physics,2006. (in Chinese)
- [8] 彭绪金,马佳光,光电精密跟踪中的复合轴控制系统的实验和研究[J]. 光电工程,1994,21(5):2-8.  
PENG Xujin, MA Jiaguang. The research and experiments of compound - axis control system in opto - electronic accurate tracking[J]. Opto - electron engineering,1994,21(5):2-8. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

## Study of Capability and Error Restraint Ability of Optical Inter - satellite Communications Compound Axis Tracking Structure

NIE Guang - shu<sup>1</sup>, ZANG Shou - fei<sup>1</sup>, ZHENG Lei - gang<sup>1</sup>, ZANG Xu<sup>2</sup>

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Military Representative Office in Shenyang Aircraft Industry ( Group) LTD Company, Shenyang 100850, China)

**Abstract:** In space laser communication system, acquisition, tracking and pointing (ATP) technology is quite important. The pointing precision of the ATP system is a decisive factor in the success of the whole communication system. The article mostly analyzes the compound axis tracking in space laser communication system. Firstly, the conception of the optical inter - satellite communications and the excellences of realizing the inter - satellite communications by laser are introduced. Then the traits of compound axis tracking are analyzed, the field of view matching of compound axis tracking and its capability analysis are given. Finally, through the simulation and comparison the conclusion that choosing appropriate bandwidth and bandwidth ratio can restrain system error is obtained.

**Key words:** optical inter - satellite communications; compound axis; tracking; stabilization