

空间光通信的粗精复合轴解耦技术研究

武学颖¹, 郭永飞¹, 刘鹏²

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 长春理工大学 空间光电技术研究所, 长春 130033)

摘要: 国内外的空间光通信系统都采用粗精复合轴结构实现大视场、高精度、高闭环带宽的跟踪系统。粗精控制环解耦问题是复合轴结构控制系统中很重要的问题, 它会影响到整个 APT 系统的性能。通过软件仿真和桌面实验, 对双探测器的复合轴解耦问题进行了深入的研究, 在桌面实验系统中实现了空间光通信要求的 3 μ rad 的控制精度。

关键词: 捕获瞄准与跟踪系统; 粗跟踪; 复合轴控制; 解耦; 空间光通信

中国分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2008)09-0049-03

Study on decoupling for coarse and fine multiple-axis in space optical communication

WU Xue-ying¹, GUO Yong-fei¹, LIU Peng²

(1. Changchun Institute of Optic, Fine, Mechanics and Physics Chinese Academy and Sciences, Changchun 130022; 2. Changchun university of science and technology, Changchun 130022)

Abstract: The space optical communication systems make use of coarse and fine multiple-axis frame to come true the tracking system with large field, high accuracy and high loop bandwidth whether inland or abroad. Decoupling of the coarse and fine control-loop is a key technology in multiple-axis system and it will affect the capability of the entire APT system. The paper has made thorough study on decoupling of dual-detector multiple-axis through software simulation and desktop experiment and has achieved the accuracy of 3 μ rad.

Keywords: APT; coarse tracking; multiple-axis; decoupling; space optical communication

1 引言

随着激光技术的发展, 空间激光通信技术以其特有的优势逐渐成为各国科学家的研究重点。在空间激光通信中, 光束的捕获、瞄准、跟踪(APT)控制技术是光通信中最重要的部分。由于空间光通信的距离远, 因此激光发射的束散角较小, 大多是几个微弧度, 这样可以有效减小空间光通信的发射功率, 也给 APT 系统的跟踪误差提出了很高的要求。在卫星间激光通信中, 要达到所要求的 10^{-6} 误码率, 一般要求 APT 的控制精度要小于 3 μ rad。在卫星上要克服卫星振动实现 3 μ rad 的跟踪精度, 给 APT 控制系统提出很高的要求。可以说, APT 系统的好坏直接决定了空间激光通信的成败, 而其关键又在于粗精控制环的解耦。本文通过软件仿真

收稿日期: 2008-05-07。

基金项目: 国家 863 计划资助。

作者简介: 武学颖(1979-), 女, 博士生, 主要研究方向为光电检测技术和数字图象处理。

和桌面实验, 对双探测器的复合轴解耦问题进行了深入的研究, 在桌面实验系统中实现了空间光通信要求的 3 μ rad 的控制精度。

2 复合轴系统粗精解耦原理分析

在卫星间的光通信系统中, 通信双方既要有很大的相对运动速度, 又要求有很高的控制精度。对于一个控制系统而言, 要同时保证这两点是很难做到的。跟踪系统常用的控制结构主要有万向节和倾斜镜结构。

万向节结构的优、缺点

优点 视场运动范围大、可搭载较大负载、结构较简单、技术成熟。

缺点 自重大、惯性大、闭环带宽比较低及控制精度不高。

压电陶瓷 PZT 二维倾斜镜的优、缺点

优点 体积小、控制精度高、闭环带宽高

缺点 运动的调整范围有限(几个 mrad), 搭载重量小。

在光通信中要求实现大视场、高精度、高闭环带宽的控制, 这就需要将万向节结构和 PZT 倾斜镜组合在一起, 构成主从复合轴结构以满足空间光通信 APT 系统的要求。

主从复合轴控制系统按结构的不同可分为: 单探测器复合轴结构和双探测器复合轴结构。单探测器结构就是万向节和倾斜镜两级采用同一个探测器控制的结构。单探测器的复合轴结构中, 粗精两级采用同一探测器探测光束的偏移值, 因此单探测器的复合轴结构的解耦问题需要通过控制算法来解决。单探测器的解耦问题比较复杂, 国内外有很多科研院所先后开展了这方面的研究, 但目前还不成熟, 因此我们在进行光通信的 APT 实验中采用了双探测器的复合轴结构, 其控制框图如图 1 所示。

图中 A、B 为探测器的输出特性, D1(S)、G1(S)、D2(S)和 G2(S)分别为粗精系统的控制器和控制对象的传递函数。则可以由结构控制框图得出其系统闭环传递函数:

$$(s) = \frac{G_m(s) + G_a(s) + G_a(s)G_m(s)}{[1 + G_m(s)][1 + G_a(s)]}$$

其中: $G_m(s) = AD_1(s)G_1(s)$

$$G_a(s) = BD_2(s)G_2(s)E(s) = 1 \quad (s) = \frac{1}{[1 + G_m(s)][1 + G_a(s)]}$$

双探测器复合轴结构中粗精两级工作相对独立, 因此其耦合问题相对简单, 但是在设计过程中, 耦合问题对系统的精度有很重要的影响。精跟踪部分不但要对系统的高频振动有抑制作用, 还要对粗跟踪系统的跟踪残差进行有效地抑制, 而粗跟踪的控制残差的大小是由其闭环带宽决定的。

3 复合轴系统粗精解耦仿真分析

我们在精跟踪系统不变的情况下, 用 MATLAB 对不同带宽的粗跟踪系统的抑制函数和粗精复合轴系统的抑制函数分别进行模拟。

通过仿真可以看出: 当粗精两级的频带相差较小

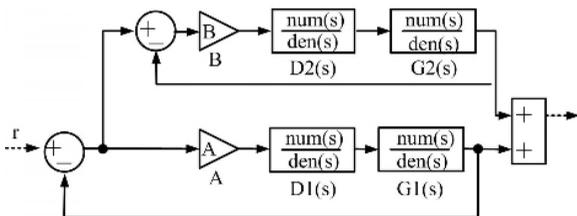


图 1 双探测器的复合轴结构控制框图

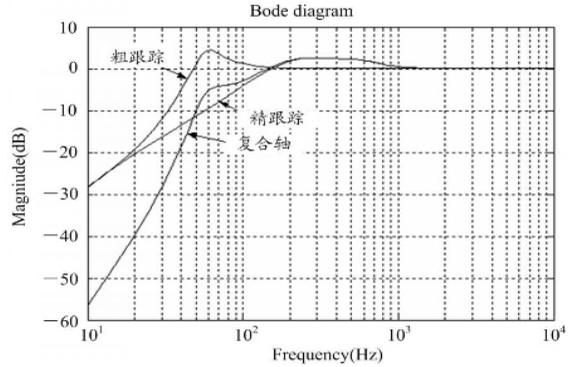


图 2 粗跟踪闭环带宽为精跟踪的 $\frac{1}{3}$ 时的抑制函数

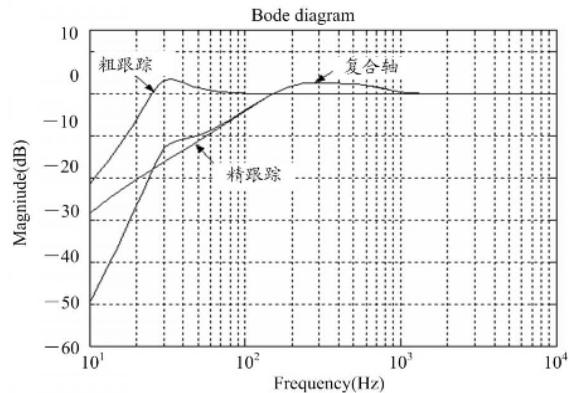


图 3 粗跟踪闭环带宽为精跟踪的 $\frac{1}{5}$ 时的抑制函数

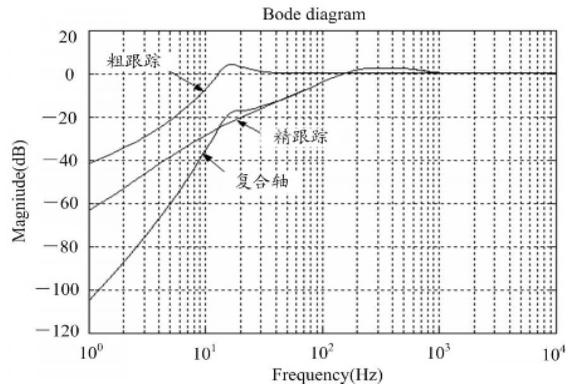


图 4 粗跟踪的闭环带宽为精跟踪 $\frac{1}{10}$ 时的抑制函数

时, 由于粗跟踪的跟踪残差频率较高, 这给精跟踪带来很大的跟踪误差。只有在粗跟踪和精跟踪系统间的闭环带宽相差大于 5~10 倍时, 精跟踪系统才会对粗跟踪残差进行有效的抑制。这样才能使粗精跟踪系统之间进行有效的解耦。但如果粗跟踪的闭环带宽太低, 会降低系统对振动的抑制能力, 增大滞后误差。因此粗精系统闭环带宽相差一般应选取 4~8 倍。

4 双探测器复合轴控制系统粗精解耦实验研究

在做 APT 仿真实验时, 我们选用两个正交的一维

摆镜模拟粗跟踪系统, 由于一维摆镜的执行速度较高, 所以系统在实验过程中对系统的精跟踪精度影响较大。为了解决这个问题, 我们在摆镜前加入两个低通的模拟滤波器, 这样有效地降低了粗跟踪的闭环带宽, 最终使复合轴模拟系统达到较高的跟踪精度。图 5、图 6 分别是复合轴模拟跟踪系统对卫星模拟功率谱进行抑制后的跟踪残差。

图 5 中的时域信号的时间单位为 1s, 幅度单位

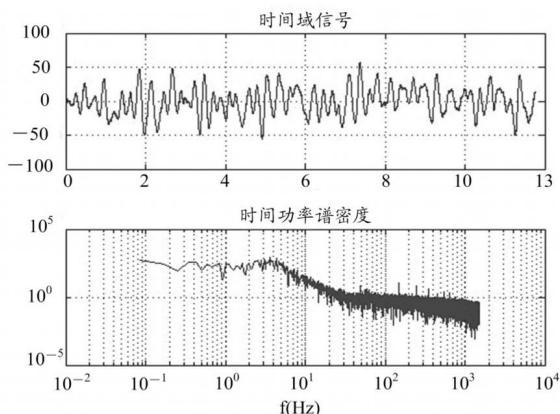


图 5 粗跟踪残差曲线和残差振动功率谱

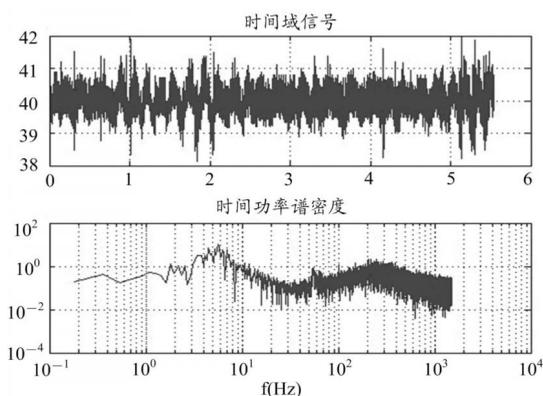


图 6 精跟踪残差时域曲线和振动功率谱

为 μrad 。可以看出粗跟踪的残差幅度为 $50\mu\text{rad}$, 谐振峰值在 4~6Hz 处。

图 6 中的时域信号的时间单位为 1s, 幅度为对应的 CCD 相机的像元数。其中每一个像元对应的视场为 $2\mu\text{rad}$ 。我们可以看到, 通过合理调节粗精两级复合轴的闭环带宽, 我们通过桌面半实物仿真成功实现了光通信要求的 $3\mu\text{rad}$ 的跟踪精度要求。通过分析精跟踪的跟踪残差功率谱, 可以看到其有两个谐振峰值, 一个在 4~6Hz, 这是粗跟踪的跟踪残差带来的低频谐振峰值; 一个在 200~300Hz, 这个峰值是精跟踪系统本身的控制带宽。这与控制仿真的结果是一样的。

5 结束语

综上所述, 在光通信中设计复合轴跟踪系统时, 粗精解耦问题是系统设计中的一个重要问题。相比较单探测器的复合轴跟踪系统相比, 双探测器系统的解耦技术比较成熟。本文主要针对双探测器的系统的解耦问题进行研究, 提出对于双探测器复合轴结构, 若粗精跟踪环的闭环带宽相差 8~10 倍时就能有效的抑制粗跟踪系统带来的控制残差。通过粗精复合轴控制系统的有效设计, 在桌面上实现了空间光通信要求的 $3\mu\text{rad}$ 跟踪控制精度, 达到了预先的设计要求。

参考文献:

- [1] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 第四版. 北京: 科学出版社, 第四版, 2001.
- [2] 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.
- [3] 李 洁, 葛文奇, 关贵柱, 等. 精稳控制系统与跟踪架运动耦合问题的分离[J]. 光电工程, 2002, 29(5): 8-11.
- [4] 李文军, 陈 涛. 基于卡尔曼滤波器的等效复合控制技术[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 279-284.
- [5] 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光学工程, 1989, (3): 1-42.

参考文献著录规则(四)——学位论文与论文集的著录格式

学位论文的著录格式:

[序号] 著者. 题名[D]. 出版地: 出版者, 出版年: 起-止页码.

[1] 张志祥. 简断动力系统的随机扰动及其在守恒律方程中的应用[D]. 北京: 北京大学数学学院, 1998.

[2] CALMS R B. Infrared spectroscopic studies on solid oxygen[D]. Berkeley: Univ. of California, 1965.

论文集的著录格式:

[序号] 著者. 题名[C]// 著者. 专题名: 其他题名. 出版地: 出版者, 出版年: 起-止页码.

[3] 白书龙. 植物开花研究[C]// 李承森. 植物科学进展. 北京: 高等教育出版社, 1998: 146-163.

[4] WEINSTEIN L, SWERTZ M N. Pathogenic properties of invading microorganism [C] // SODEMAN W A, Jr., SODEMAN W A. Pathologic physiology: mechanisms of disease. Philadelphia: Saunders, 1974: 745-772.