

文章编号: 1001-3806(2002)02-0114-03

卫星光通信复合轴跟瞄控制方法研究

于思源 高惠德 王立松 董蕴华 马祖光

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨, 150001)

摘要: 提出了用复合轴瞄准控制方法实现卫星光通信跟瞄控制, 以提高卫星光通信中跟瞄系统的性能。提出了粗瞄和精瞄系统的模型, 并分别设计了控制器。在此基础上, 建立了一套跟瞄控制模拟系统。结果表明, 所设计制作的跟瞄模拟系统在跟踪的匀角速率运动时的最大跟踪角度偏差仅为 $14\mu\text{rad}$ 。

关键词: 星间光通信; 粗瞄; 精瞄

中图分类号: TN929.13 **文献标识码:** A

Multiple-axis pointing control in intersatellite optical communication

Yu Siyuan, Gao Huide, Wang Lisong, Dong Yunhua, Ma Zuguang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: A proposal is introduced in the paper that the control method of multiple axis pointing can be used to improve the tracking and pointing system in intersatellite optical communication. The models of coarse pointing and fine pointing are set up, and then a controller is designed. Based on the above conditions, a simulation control system in the laboratory has been built. It shows that the maximal angular error of the system is $14\mu\text{rad}$ while the tracked target moving at an even angular speed.

Key words: intersatellite optical communication; coarse pointing; fine pointing

引言

卫星光通信技术是未来大容量卫星通信系统的发展方向。与微波通信系统相比, 卫星光通信系统具有信息量大、体积小、重量轻、抗干扰能力强以及保密性好等优点^[1~3], 因此越来越得到各国政府的重视。在卫星光通信过程中, 由于光场束宽小、传输距离长等原因, 瞄准、捕获和跟踪 (pointing, acquisition and tracking) 问题变得尤为突出^[4]。不精确的光束跟瞄将导致接收端信号大量丢失和系统性能的严重下降。故跟踪瞄准技术是卫星光通信的关键技术之一, 而其中的跟踪瞄准控制问题就显得尤为重要, 需要建立一些辅助跟瞄控制系统用来减小由于瞄准错误而产生的信号损失。

影响跟瞄控制精度的外部因素有: 卫星的振动、参照系误差、轨道预测误差和背景光噪声^[5]。此外, 装置内部的探测器噪声、应力和安装结构等误差也对跟瞄控制性能有较大影响。故星间光通信的跟

瞄控制系统必须有较高的性能以保证信号传输。

提高跟瞄控制系统性能的有效途径之一是采用复合轴控制。所谓复合轴控制就是用低带宽的粗瞄控制系统 (coarse pointing assembly) 进行大范围跟踪, 用高带宽的精瞄控制系统 (fine pointing assembly) 对粗跟踪误差进行补偿。为此, 我们提出并实现了一套复合轴跟瞄控制实验室模拟系统并进行了仿真和模拟实验。在对星间光通信系统的各个子系统进行实验室模拟研究基础上, 既可以验证理论分析和计算机模拟结果, 对计算模型进行修正, 又可以在模拟环境中检验研究系统的可靠性。限于篇幅, 跟瞄控制过程中的空间捕获问题将另文讨论。

1 粗瞄系统模型及控制器设计

由于方位角粗瞄控制回路和俯仰角粗瞄控制回路具有相似的控制结构, 只以方位角粗瞄控制回路为例, 介绍系统的模型及控制器的设计。方位角粗瞄系统的动态结构如图 1 所示。

$D(s)$ 为位置控制器, F_d 为系统的干扰力矩, 它主要由摩擦力矩和电机本身的力矩波动所引起的。方位角粗瞄系统中的线性功率放大器的比例系数 K_v 为 11。伺服电机力矩常数 K_T 为 $0.031\text{N}\cdot\text{m/V}$ 。

作者简介: 于思源, 男, 1974 年 11 月出生。博士研究生。现从事卫星通信方面的研究工作。

收稿日期: 2001-01-09

齿轮的减速比 K_ω 为 1/10。 $G_j(s)$ 为万向转台方位角方向机械本体模型, 由于测得机械本体的谐振频率为 400Hz, 远远高于系统的带宽要求, 因此, 可将 $G_j(s)$ 简化为低频比例系数 1。 K_d 代表 CCD 的电路放大倍数, 将其作为比例环节, K_d 为 1。 θ_i 为输入角度信号, θ_o 代表万向转台方位角方向的实际角度输出。建模中将系统可能存在的高频振荡模态作为未建模动态特性处理。

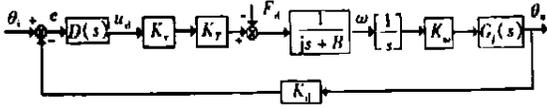


Fig. 1 Dynamic structure of coarse pointing system (azimuth)

为了获得系统的实测模型, 利用频率法对系统进行辨识, 从电机的线性功率放大器的输入端输入正弦扫频信号, 输出角度由光电码盘读取, 辨识得到图 2 所示的系统开环传递函数为:

$$G_x(s) = 0.74/s(0.0035s + 1) \quad (1)$$

由辨识得到的开环传递函数可算出, 负载转动惯量 $j = 0.216\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

本系统为 iv 型系统, 对这类控制系统的设计一般归结为如何将系统设计成宽带宽、高刚度伺服系统, 以保证系统较快的响应速度和较强的抗干扰能力。 $D(s)$ 采用了 $K(Ts + 1)/s$ 形式的控制器, 由于 $D(s)$ 中含纯积分环节, 系统的静态伺服刚度为无穷大, 所以, 系统可以有效地抑制电机轴上阶跃干扰力矩的影响。系统较好的阻尼特性可通过调整参数 T 而获得。折衷考虑系统的响应速度、噪声误差和未建模动态特性的影响, 我们将系统的带宽设计为 10Hz, 最后可确定控制器为:

$$D(s) = 185.60(0.32s + 1)/s \quad (2)$$

2 精瞄系统模型及控制器设计

精瞄控制系统动态模型如图 2。 θ_{zi} , θ_{li} 分别为水平和俯仰方向信标光角度分量输入信号。 θ_{zo} , θ_{lo} 代表水平和俯仰方向对应的信号光角位移输出。 K_{s1} 和 K_{s2} 分别代表测量信号光和信标光角度分量的四象限光电探测器的比例系数, 其值为 $0.025\text{V}/\mu\text{rad}$ 。 $D_1(s)$ 和 $D_2(s)$ 为方位角方向和俯仰角方向的位置控制器。系统采用的二维高速倾斜镜的驱动电源频响大于 1000Hz, 故可将其看成一个比例环节 K_{power} , 其值等于 60。 K_n 为压电陶瓷驱动系数为 $5\mu\text{rad}/\text{V}$, $G_{fine1}(s)$ 和 $G_{fine2}(s)$ 分别代表二维高速倾斜镜两轴的传递函数, F_d 为系统干扰力。

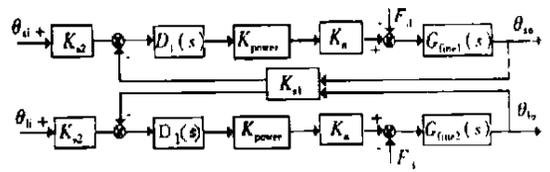


Fig. 2 Dynamic structure of fine pointing system

为实现精瞄系统的闭环控制, 采用频率法测量了俯仰角和方位角系统的开环频率特性。俯仰角和方位角系统在低频段频率响应曲线比较平坦, 当频率接近 500Hz 处俯仰角系统出现了较大的谐振峰值, 而频率接近 650Hz 时方位角系统出现了谐振峰。故精瞄系统位置控制器的设计目标就是扩展系统带宽, 以提高系统的刚度, 从而系统可以有较快响应速度和抗干扰能力。我们在控制器中通过引入二阶微分环节来抵消系统中的谐振峰, 同时为了消除系统中的稳态误差, 在控制器中还加入了积分环节, 则最终控制器具有标准的 PID 形式, 即:

$$D_n(s) = \frac{k_{1n}}{s} \left[\frac{k_{Dn}s^2}{k_{1n}s^2} + \frac{k_{Pn}}{k_{1n}s} + 1 \right] \quad n = 1, 2 \quad (3)$$

通过调整 k_{1n} , k_{Dn} 和 k_{Pn} 的参数, $D_n(s)$ 可分别提供一对复数零点来抵消对象在 500Hz 和 650Hz 处的谐振峰。最后, 分别在控制器中加入了剪切频率为 1000Hz 的低通滤波器, 来降低系统高频段幅值, 从而减小未建模动态特性和高频噪声对系统的影响。 $D_n(s)$ 中零点位置取在略小于谐振频率处, 使系统对参数变化有较好的鲁棒性。俯仰角和方位角系统的实际调整后的位置控制器均为:

$$D_n(s) = 1548.2 \frac{(0.0000022s^2 + 0.000073s + 1)}{s(0.00032s + 1)} \quad (4)$$

3 跟瞄控制模拟系统结构及工作原理

在粗瞄控制器和精瞄控制器的基础上, 设计复合轴跟瞄控制模拟系统的装置框图如图 3 所示。信号光和信标光均采用半导体激光器 (650nm) 作为光源, 束宽约为 1mrad。采用 10 倍开普勒型望远系统作为发射和接受共用光学天线。跟瞄控制系统由粗瞄和精瞄两个子系统组成。在粗瞄系统中, 采用两路交流力矩电机驱动万向转台实现水平角和俯仰角定位, 由电荷耦合器件 (CCD) 检测信标光信号作为角位置反馈。设计 CCD 的角度分辨率为 $10\mu\text{rad}$ 。在精瞄系统中, 利用压电陶瓷驱动二维偏转镜实现水平角和俯仰角的角度精调, 采用四象限光电二极管分别作为信标光角位置探测器 QD_1 和信号光角位置探测器 QD_2 。设计 QD_1 和 QD_2 的角度分辨率

分别为 $2\mu\text{rad}$ 。

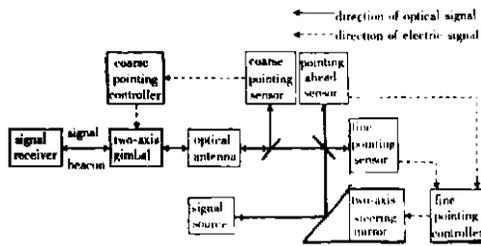


Fig. 3 Block of track and pointing control system

在星间光通信过程中, 卫星在某一时刻的位置和速度可通过监测手段和动力学方程进行预测。同时, 由于星间光通信的传输距离大、传输弛豫时间长, 当两星间发生相对运动时, 发送光束必须进行超前瞄准, 以补偿卫星在光束弛豫时间内所发生的附加移动^[5]。因此, 我们利用跟瞄控制系统的粗瞄系统实现预测跟踪和捕获; 同时利用精瞄系统完成偏移量跟踪和超前瞄准^[6]。在工作过程中, 粗瞄系统首先根据卫星轨道预测值, 控制力矩电机驱动万向转台进行空间瞄准以使发送光场光束覆盖接收机。在一定的角度不确定域中, 利用万向转台扫描或 CCD 宽视域探测进行信标光捕获。锁定信标光后, 粗瞄系统进入跟踪状态。这时, 信标光进入 QD 视域, 精瞄系统开始工作。精瞄系统通过 QD 对信号光与信标光的角方向进行实时测量, 将计算出的角度偏移量与该时刻的超前瞄准量叠加作为精瞄指令信号, 控制驱动二维偏转镜实现精密位置跟随。

4 实验结果

为验证我们所设计的控制器的有效性, 将上文数字化实现后的位置控制器分别应用于粗瞄和精瞄系统。在粗瞄系统中, 采用交流力矩电机经齿轮传动进行控制, 最小控制角度 $60\mu\text{rad}$, 控制角度范围为 $\pm\pi\text{rad}$ 。CCD 采用台湾敏通公司的 M1881。精瞄系统中, 采用了重复精度小于 $3\mu\text{rad}$ 的 MK-0201 二维高速倾斜镜系统, 其倾斜范围为 $\pm 3\text{mrad}$ 。

信标光由另一万向转台进行控制, 信标光天线与信号光天线相距 4m。采用伺服电机控制一维导轨以模拟星间光通信中两星间的角度偏移。由于星间光通信过程中两星间的相对角速率变化平缓^[7], 只需考虑匀角速率情况。实验中, 将整个跟瞄控制系统置于一维导轨之上, 导轨线速度为 2.0m/s , 即信标光天线与信号光天线间的角速率约为 $500\mu\text{rad/s}$, 该值远大于同步轨道卫星与低轨道卫星间链路时的最大相对角速率。

首先, 只使用粗瞄系统进行跟踪模拟实验。图

4 为跟踪误差曲线: 横轴为测试时间; 纵轴为瞄准角度偏差, 即信号光角方向与信标光角方向间的夹角, 测试采样频率 5Hz 。实验结果: 平均角度偏差 $298\mu\text{rad}$, 最大角度偏差 $670\mu\text{rad}$ 。

Fig. 4 Error curve of coarse pointing

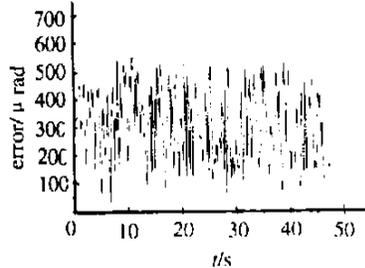


图 5 为采用粗精跟瞄结合的复合轴控制系统的跟踪误差曲线, 其横纵轴的定义与图 4 相同, 测试采样频率 25Hz 。实验结果: 平均角度偏差 $5\mu\text{rad}$, 最大角度偏差为 $14\mu\text{rad}$ 。

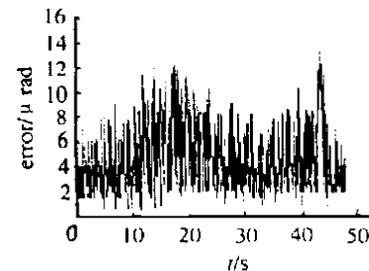


Fig. 5 Error curve of multiple axes pointing

由图 5 可知, 复合轴控制系统的瞄准角度偏差呈现出一定的波动, 这主要是由于背景光噪声和光电探测器工作不稳定造成的。

5 结论

研究了具有粗瞄和精瞄两个子系统的复合轴跟瞄控制系统, 通过实测粗瞄和精瞄系统的频率模型, 分别采用了经典控制方法为两系统设计了控制器, 并将所设计的控制器应用于实际系统中。实验表明, 采用复合轴跟瞄控制方法可有效提高系统跟瞄性能, 系统最大跟踪角度偏差为 $14\mu\text{rad}$ 。考虑到星上的高频振动对星间激光链路的影响, 设计复合轴控制系统中的精瞄子系统具有较高控制带宽进行补偿。该工作还有待于进一步实验验证。

星间光通信实验室模拟跟瞄控制技术在我国是一项崭新的研究领域。我们所做的工作为进一步研究星间光通信中跟瞄控制技术打下了一定的基础。

参考文献

[1] Sandusky J.V. SPIE, 1998, 3266: 128~ 134.
 [2] Schex A. SPIE, 1996, 2699: 218~ 226.
 [3] Lutz H P. ESA bulletin-Opt Commun in Space, 1997, 91: 25~ 33.
 [4] Witting R. Space Communications, 1994, (12): 255~ 289.
 [5] Gagliardi R M, Karp Sh. 光通信技术与应用, 北京: 电子工业出版社, 1998.
 [6] Russell D. SPIE, 1994, 2123: 294~ 302.
 [7] 罗先明. 卫星通信, 北京: 人民邮电出版社, 1995.