

doi: 10.3788/gzxb20124106.0649

机载光通信复合轴光路优化设计和跟瞄技术研究

吕春雷^{1,2}, 佟首峰¹, 宋延嵩¹

(1 长春理工大学 空地激光通信国防重点实验室, 长春 130022)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

摘 要:根据机载激光通信的环境和链路距离,采用光电粗精复合轴结构,提出一种双探测器、双光轴机载激光通信复合轴捕获跟踪瞄准系统方案.对整个系统的光路结构进行了分析和优化设计,使粗跟踪精度达 $120\ \mu\text{rad}$,精跟踪系统带宽大于 $300\ \text{Hz}$,执行动态范围达 $5\ \text{mrad}$,跟踪精度达 $3\ \mu\text{rad}$,并成功实现通信距离 $17.5\ \text{km}$ 、通信速率 $1.5\ \text{Gbps}$,误码率达 $1\text{E-}7$ 的飞机对地面激光通信实验.

关键词:机载激光通信;跟踪精度;粗精复合轴

中图分类号:O436; TP273

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)06-0649-5

0 引言

空间激光通信最显著的特征是具有非常小的通信束散角,它是实现光端机轻小型化和远距离传输的理论基础和技术保证^[1],同时它又要求通信两视轴必须在相对运动和平台振动的条件下实现动态高精度对准和跟踪,这将加剧空间激光通信系统设计的复杂程度.空间激光通信系统的功能主体是通信发射与接收,但是其核心关键技术和基础则是高概率、快速捕获与高精度、高带宽跟踪分系统,这在机载运动平台中表现得尤为突出^[2].

复合轴光跟瞄控制系统以欧空局(Semiconductor Laser Intersatellite Link Experiment, SILEX)计划和美国光通信终端(Optical Communications Demonstrator, OCD)复合轴控制系统最具有代表性^[3].SILEX 复合轴 APT 控制系统采用了独特的复合轴闭环回路,在闭环跟踪状态下,通过检测精跟踪系统(Fine Tracking Assembly, FTA)的位置探测器,当 FTA 偏离角较大时对粗跟踪系统(Coarse Tracking Assembly, CTA)发出卸载命令以使 FTA 归零.这种粗跟踪卸载精跟踪方式的复合轴结构有利于高精度稳定跟踪,实际的星载实验证实了这一复合轴架构的可行性.OCD 采用了传统的 FTA 补偿 CTA 残差的结构,尽管这种架构用在空间站这种大型稳定系统中并无问题,但是在太空复杂环境下小型平台上的可靠性有待检验.

在机载激光通信系统设计中,为了尽可能降低由此引起的功率损耗,一般要求跟踪精度为通信束

散角的 $1/8\sim 1/6$,由此引起的功率损耗在 $1\ \text{dB}$ 左右,以此来最大限度地保证激光通信功率裕量.为此,本文提出了一种双探测器、双光轴机载激光通信复合轴(Acquisition Pointing Tracking, APT)跟踪系统方案,对系统的整个光路结构进行了详细的分析和优化设计并给出了具体的参量,最终使跟踪精度达到 $3\ \mu\text{rad}$.

1 机载平台的约束条件及方案确定

在飞机与地面、飞机与卫星激光通信中,由于大气环境、背景光、飞机振动、通信距离等因素的影响,在通信光功率一定时,要完成高通信速率与低误码率的通信目标,通信光发散角必须很小,这样才能保证接收端的光功率有较大的信噪比,降低通信误码率,因此需要很高的跟踪精度来保证通信链路畅通^[4];同时机载平台工作时由于不确定区域和指向不确定性较大,不确定区域与跟踪精度范围之比超过千倍^[5],因此为了在大立体角空间实现快速捕获和高概率捕获,需要较大的粗信标束散角和粗跟踪视场^[6].同时为了能在动态条件下实现狭窄通信光束的视轴动态跟踪,需要宽带、稳定的跟踪系统^[7].因此本文采用主从复合轴控制系统,粗跟踪实现初始指向、开环捕获和稳定的粗跟踪,使信标光斑可靠进入精跟踪视场;精跟踪为高带、主动跟踪单元,它对粗跟踪残差进行进一步抑制,提高跟踪精度,进而满足通信要求.

由于激光功率和通信速率的限制,要达到高通信速率和低误码率,要求精跟踪和通信单元的视场

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2011AA7034054C)资助

第一作者:吕春雷(1980-),男,讲师,博士,主要研究方向为空间激光通信. Email:kevindmu@163.com

收稿日期:2011-11-14;修回日期:2012-01-11

较小,粗跟踪单元视场较大,因此采用一路光学系统无法完成,为此将粗精跟踪分成两个光学系统来实现。

2 方案设计

系统主要包括粗跟踪单元、精跟踪单元、通信接

收单元、通信发射单元和光学部分,结构如图 1。其中精跟踪伺服单元包括精信标发射、精跟踪控制、提前量伺服三个部分,粗跟踪包括粗信标发射、粗跟踪控制。在系统设计时必须详细考虑粗跟踪光学部分、精跟踪光学部分、通信光部分、提前量光学部分的因素关系,以此达到高通信速率、低误码率目的。

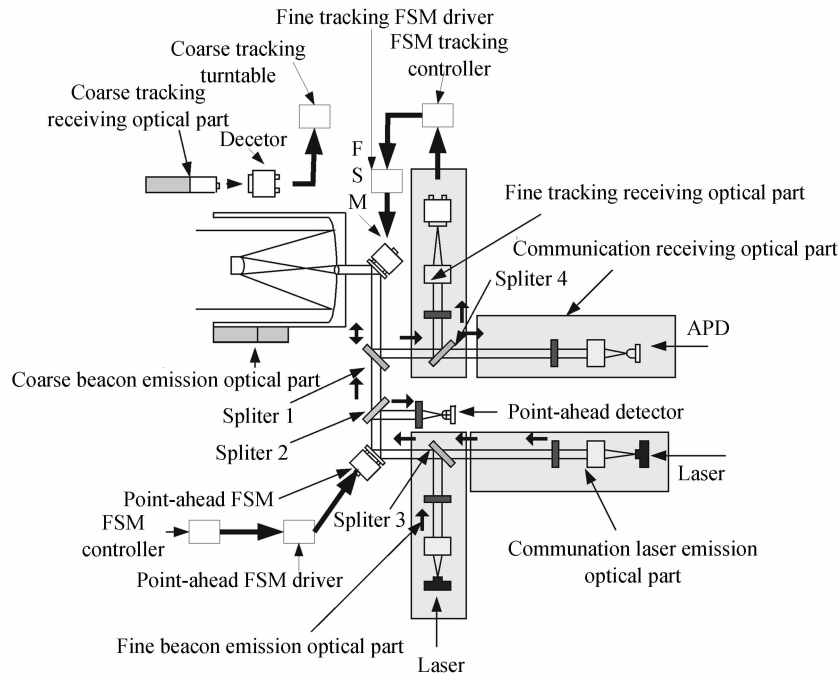


图 1 机载激光通信光端机跟踪对准光路结构

Fig. 1 Optical-path structure of airborne laser communication

2.1 光学系统结构

光学分系统是光端机的重要组成部分,涉及到通信接收、通信发射、精信标探测、粗跟踪探测和粗信标发射各个单元,由光学分系统完成各单元的集成,形成五轴精密光机系统。其中视场较大的粗跟踪探测和束散角较大的粗信标分别采用独立小口径收发,其余三路共用卡赛格林望远单元实现收发,提高视轴一致性和轻小型设计,系统采用双色分光片实现收发分离和合束、采用部分分光镜实现信标探测和通信接收分离。卡萨格林系统为卡塞格伦结构加透镜结构的形式,主次镜直径之比不小于 6.5,等效焦距不小于 1 m,主镜光学口径不小于 120 mm。

2.2 粗、精跟踪系统

粗跟踪伺服环由粗跟踪 CCD 相机、粗跟踪伺服控制单元、两轴四框架伺服转台构成,完成视轴的初始指向、开环捕获、动态粗跟踪。粗跟踪环具有较大的跟踪视场(10 mrad)以减小捕获时间,其跟踪精度受到 CCD 分辨率和伺服带宽的限制,初步实现 $150 \mu\text{rad}(3\sigma)$ 跟踪精度,满足复合轴 ATP 匹配设计要求;精跟踪伺服环由二维快速倾斜 PZT 振镜、高采样频率的光斑质心检测单元和数字伺服跟踪单元构成,它具有较小的视场($160 \mu\text{rad}$)、高伺服带宽

(300 Hz)和高跟踪精度,可对粗跟踪残差进一步抑制,使复合轴 ATP 控制总精度满足通信要求。对于粗跟踪单元,为减小天空背景光影响,粗跟踪 CCD 探测单元采用 $\varphi=20 \text{ mm}$ 的独立小口径接收,采用面阵 CCD 探测器接收 800 nm 附近的信标激光。CCD 相机输出的视频信号经过图像处理,将判断信标光斑的有无(捕获过程)或光斑质心(跟踪过程),然后送入粗跟踪控制单元。经过数字伺服补偿后,将控制信息传送到伺服转台,进而实现对准、捕获和粗跟踪等过程;对于精跟踪单元,波长为 800 nm 附近的精信标光,被口径为 120 mm、放大倍数为 12 倍的卡赛格林望远系统接收后,形成直径为 10 mm 光束;经口径为 15 mm、 45° 倾斜放置的精跟踪振镜,再经双色分光片被高帧频 CCD 相机接收,经信号处理后得到光斑脱靶量,再经过数字精跟踪伺服补偿后,将控制信息送入二维倾斜振镜,进而实现闭环动态跟踪。由于精跟踪所采用的光斑检测单元帧频达 3 000 Hz 以上、振镜的谐振频率大于 1 600 Hz,精跟踪的伺服带宽可达 300 Hz 以上,可以对宽谱扰动进行有效抑制。

2.3 提前量控制系统

在飞机对卫星激光通信中,由于提前量调整的

信息完全依赖于 GPS/INS 的数据,通常量据更新频率为 20 Hz 左右^[8],所以此对提前量振镜的控制带宽不高.在每次 GPS/INS 的数据更新后,由提前量控制器解算出精信标光偏转提前量对应的模拟电压,送给提前量振镜驱动器进行功率放大,驱动提前量振镜对己方精信标光微调,分光片 2 将信标光的一部分功率反射回提前量探测器,由提前量控制器检测微调是否到位.

3 FPGA 精跟踪图像处理单元的设计

系统采用具有对感兴趣区域开窗口功能 (Region Of Interest, ROI) 和像素合并技术

(binning)的高帧频相机进行光斑探测^[9],有效数据数量为 80×80 ,精跟踪视场为 $160 \mu\text{rad}$,像元分辨率为 $2 \mu\text{rad}$.相机包括相机时序产生单元、CCD 传感器及驱动单元、CCD 信号处理单元、相机数据接口与控制单元,最终生成的数字图像通过 CAMLINK 线送入基于 FPGA 的实现光斑解算处理单元.为了抑制大气湍流散斑效应对跟踪精度的影响,采用最大似然值形心检测^[10],最终形成的脱靶量信息以高速串口的形式下载到精跟踪控制单元中.为了便于实时监控,光斑的功率分布、光斑的总功率、光斑的背景电平采用模拟视频的方式实时输出(如图 2).

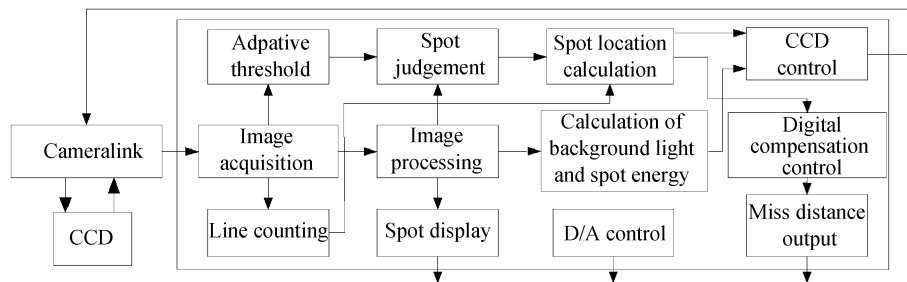


图 2 嵌入式精跟踪系统单元框图
Fig. 2 Block diagram of embedded fine tracking assembly

4 APT 跟踪精度仿真实验及野外通信试验

根据飞机平台的振动功率谱生成时域振动曲线,输入到光学式视轴抖动平台振动模拟系统(其模拟带宽可达 100 Hz,模拟幅度大于 $\pm 1^\circ$,振动幅值模拟精度优于 $2 \mu\text{rad}$),作为复合轴 APT 跟踪实验系统的激励源,用于检验复合轴 APT 系统抑制平台振动的能力.

实现稳定粗跟踪后,先启动精跟踪探测单元,不进行闭环控制,记录粗跟踪残差,如图 3.由于每个像元对应的分辨率为 $2 \mu\text{rad}$ (精跟踪视 $160 \mu\text{rad}$,相机分辨率 80×80),因此从图 3 可知粗跟踪准确

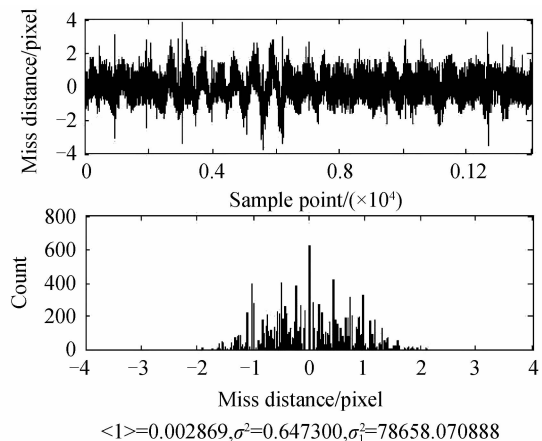


图 4 精跟踪抑制残差时域曲线及其统计直方图
Fig. 4 Residual error curve and histogram after fine tracking
度为 $120 \mu\text{rad}$ (3σ),满足粗跟踪设计要求,完全可以保证将信标光斑可靠引入精跟踪视场;然后启动精跟踪伺服系统,视轴立即被对准在精跟踪视场的中心,这时光斑脱靶量非常小,从而可以获得较高的跟踪精度,如图 4 所示.每个像元对应的分辨率为 $2 \mu\text{rad}$,根据统计精跟踪脱靶量 99% 保持在 1.5 像素以内,因此有充分的理由认为跟踪精度为 $3 \mu\text{rad}$ (3σ),实现了 APT 总体性能指标要求.

为了验证光端机性能,进行了机载光端机与地面站之间开展了通信试验.试验条件如下:天气晴朗,风力 3 级,地面温度 24°C ,能见度 10 km,地面海拔高度 800 m,飞行高度 3 km,通信距离 17.5 km

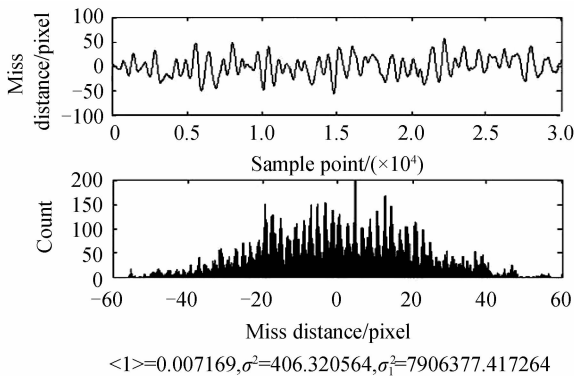


图 3 粗跟踪残差采样曲线及其统计直方图
Fig. 3 Residual error curve and histogram of coarse tracking

($R=17.5$ km), 通信波长 1550 nm($\lambda=1550$ nm), 通信速率 1.5 Gbps. 采用幅度调制直接探测(IM/DD), 最终得到的系统平均误码率为 $1E-7$.

已知发射光路损耗 -2.22 dB(发射光学效率 0.6), 接收光路损耗 -3.98 dB(接收光学效率 0.4); 根据公式 $G=10\lg(\pi D/\lambda)^2$, 计算出发射和接收天线增益均为 106.7 dB; 根据公式 $L_r=(\lambda/4\pi R)^2$, 计算出自由空间参量损耗为 -221 dB; 根据统计分析, 在海拔高度 800 m, 能见度为 10 km 的情况下, 激光传输 1 km, 引起的功率衰减为 0.98 dB, 由此可知大气信道功率衰减为 -17.25 dB; 由于通信光束散角 $\theta=200$ μ rad, 而不是以衍射极限角 $\theta_{div}=31.5$ μ rad 发射, 因此需要考虑实际束散角 θ 比衍射极限束散角 θ_{div} 大所引起的额外损耗, 根据公式 $\eta=20\log(\theta/\theta_{div})$ 计算得到为 -8 dB.

除未考虑 APT 失瞄引起的功率损耗外, 以上计算已经包含了影响链路功率的各个因素. 在不考虑 APT 失瞄情况下, 发射功率为 24 mW(23.8 dBm) 时, 由上述增益和衰减导致的接收端理论功率为 -15.25 dBm(298 μ W). 如图 5 所示, 实际 APD 接收到的平均功率为 -16.06 dBm(24.744 μ W), 由此可以得到因 APT 失瞄引起的损耗为 0.81 dB, 因此该实验也从链路功率角度佐证了该复合轴 APT 系统的跟踪精度.

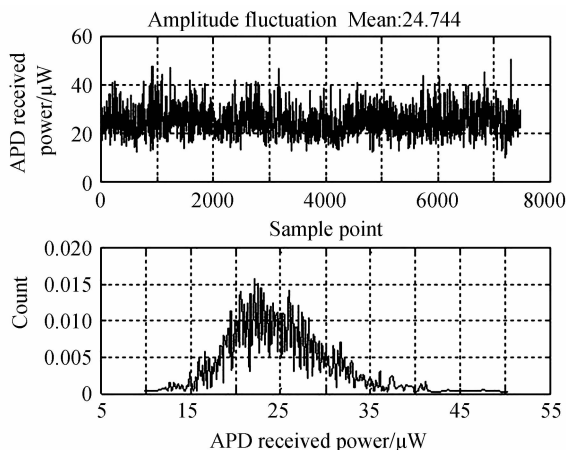


图 5 飞机与地面激光通信接收能量分布

Fig. 5 Received energy distribution of ground optical terminal

5 结论

本文提出了一种双探测器、双光轴机载激光通

信复合轴 APT 跟踪系统方案, 对系统的整个光路结构进行了详细的分析和优化设计并给出了具体的参量, 使粗精跟踪单元的控制不需要粗精解耦, 简化控制方式, 最终使跟踪精度达到 3 μ rad, 并在机载空间激光通信系统得到成功应用, 实现通信距离 17.5 km、通信速率 1.5 Gbps, 误码率达 $1E-7$ 的飞机对地面激光通信任务, 具有一定的实用价值和借鉴作用.

参考文献

- [1] HAN Cheng, BAI Bao-xing, YANG Hua-min, *et al.* Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 89-94.
韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 空地激光通信跟踪精度主要外界影响因素研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 89-94.
- [2] WANG Yong, YU Lei, ZHANG Ya-bin, *et al.* Influence of fog on atmospheric laser communication system and the relevant methods[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3275-3278.
王勇, 于蕾, 张雅彬, 等. 雾对大气激光通信系统的影响及克服方法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3275-3278.
- [3] YAN Ai-min, ZHOU Yu, SUN Jian-feng, *et al.* Technology and progress of compound-axis pointing in satellite laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(040601): 1-5.
- [4] LU Ning, KE Xi-Zheng, ZHANG Hua. Research on APT coarse tracking in free-space laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(5): 994-995.
卢宁, 柯熙政, 张华. 自由空间激光通信中 APT 粗跟踪研究[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(5): 994-995.
- [5] TOYODA M. Acquisition and tracking control of satelliteborne laser communication systems and simulation of downlink fluctuations[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(3): 4-12.
- [6] TOLKER-NIELSEN T, OPPENHAEUSER G. In orbit test result of an operational intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4 SILEX[C]. *SPIE*, 2002, **4635**: 1-15.
- [7] NIKULIN V, KHANDEKAR R, SOFKA J, *et al.* Acousto-optic pointing and tracking systems for free-space laser communications[C]. *SPIE*, 2005, **5892**: 1-15.
- [8] BOUZOUBAA M, NIKULIN V V, SKORMIN V A., *et al.* Model reference control of a laser beam steering system for laser communication applications[C]. *SPIE*, 2001, **427**: 93-103.
- [9] SOFKA J, NIKULIN V. Bit error rate optimization of an acousto-optic tracking system for free-space laser communications[C]. *SPIE*, 2006, **6015**: 1-7.
- [10] CHRIS T, PENINA A. Formation design in eccentric orbits using linearized equations of relative motion[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2006, **29**(1): 147-153.

Optical-path Optimization Design of Compound Axis and APT Study of Airborne Laser Communication

LÜ Chun-lei^{1,2}, TONG Shou-feng¹, SONG Yan-song¹

(1 *National Defense Key Laboratory of Air to Ground Laser Communication, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

(2 *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130022*)

Abstract: A dual-detector compound-axis APT scheme of airborne laser communication is proposed, according to the environment of communication link. The compound axis consists of Coarse Tracking Assembly (CTA) and Fine Tracking Assembly (FTA). A detailed analysis and optimization design of whole optical path structure is carried out. Then a technique about switching between coarse beacon and fine beacon is put forward. This way improves energy density of fine beacon and therefore can make CCD high frame work. Finally, it improves servo bandwidth of FTA. CTA performs a wide range of pointing and tracking, with tracking accuracy of up to $120 \mu\text{rad}$. However, servo bandwidth of FTA is greater than 300 Hz, with dynamic range of 5 mrad and tracking accuracy of $3 \mu\text{rad}$. The plane-to-ground laser communication demonstration experiment is successfully completed, with the distance of 17.5 km, the communication rate of 1.5 Gbps, and BER of less than $1\text{E-}7$.

Key words: Airborne laser communication; Tracking accuracy; Coarse and fine compound-axis tracking