

doi: 10.3788/lop47.040601

卫星激光通信复合轴光跟瞄技术及发展

闫爱民 周煜 孙建锋 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院空间激光通信检验技术国防科技创新实验室, 上海 201800)

摘要 卫星激光通信具有巨大的潜在应用价值,国际上已实现高码率、小型化、轻量化和低功耗激光通信终端,其中光学跟瞄系统的设计和控制是关键技术之一。由粗跟踪系统和精跟踪系统组成的复合轴系统能实现光跟瞄系统的大范围、高精度跟踪任务。对卫星激光通信光学跟瞄系统的特点和关键技术进行了讨论,介绍了光跟瞄技术中的扫描、捕获、指向、跟踪过程,综述了复合轴光跟瞄控制系统的国外研究进展。最后对卫星激光通信复合轴光跟瞄系统的应用前景进行了展望。

关键词 光通信; 卫星激光通信; 光学瞄准捕获跟踪; 复合控制

中图分类号 TN929.1 OCIS 060.4510 120.1880 文献标识码 A

Technology and Progress of Compound-Axis Pointing in Satellite Laser Communication

Yan Aimin Zhou Yu Sun Jianfeng Liu Liren

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The satellite laser communications are of potential applications and have reached a level of high data rate, compact and light construction, and low-power consumption in the world. One of the most key technologies is the design and control of pointing, acquisition and tracking (PAT) system. The composite axis system, consisting of the coarse tracking system and the fine tracking system can accomplish the wide ranging and high accuracy tracking tasks. The properties and key technologies of PAT are discussed. And the scanning, acquisition, pointing and tracking processes are introduced. International progress of the compound-axis control system of PAT is reviewed. Finally, the application prospect of compound-axis control system is given.

Key words optical communication; satellite laser communication; optical pointing, acquisition and tracking; compound-axis control

1 引言

卫星激光通信^[1-3]和现有的射频通信相比具有传输速率高、通信容量大、功耗低、体积小、重量轻、抗干扰、高保密性等诸多优势,被认为是实现星间高码率通信的最佳方案,在军用与民用领域获得广泛重视。国际上很多国家相继开展了大量的空间激光通信相关领域的研究开发工作,已经成功实现高码率、小型化、轻量化和低功耗激光通信终端,国内对卫星激光通信技术的研究也如火如荼^[4,5]。在卫星激光通信终端中光跟瞄系统扮演着极为重要的角色,它决定了一个卫星通信终端的基本架构,同时也是星间激光通信成败的关键之一。本文讨论了卫星激光通信光学跟瞄系统的特点和关键技术,综述了复合轴光跟瞄控制系

收稿日期: 2009-05-31; 收到修改稿日期: 2009-10-27

作者简介: 闫爱民(1976—),女,副研究员,主要从事衍射光学、激光雷达以及卫星激光通信等方面的研究。

E-mail: yanaimin@mail.siom.ac.cn

统的国外研究进展, 展望了卫星激光通信复合轴光跟瞄系统的应用前景。

2 卫星激光通信光学跟瞄系统

卫星激光通信系统利用非常窄的光束作为信息传输的载体, 光束传播的发散角很小。其中, 完成空间收发光束瞄准、捕获和跟踪(PAT)作用的光学跟瞄系统是非常关键技术^[6-8]。为了确保接收方能够接收到足够强的信号能量, 必须保证通信光与光轴的误差在允许范围内, PAT 技术可以确保这一高精度要求。

由于粗跟踪系统(CPA)的惯量较大, 相应的系统带宽较低, 跟踪速度较慢, 并且存在较大的机械误差, 无法单独完成 PAT 系统高精度的捕获、指向和跟踪任务。精跟踪系统(FPA)惯量小、带宽高、调整速度快、精度高, 可以满足 PAT 系统的跟踪误差要求, 但是跟踪范围小, 不能完成大范围的捕获跟踪任务。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 PAT 系统的跟瞄任务。

完整的复合轴光跟瞄系统由粗跟瞄系统、精跟瞄系统、位置探测器、辅助控制电路及控制软件构成, 包含多项关键技术^[9]。粗跟瞄系统主要完成终端的大角度范围运动和入射信号光束的粗跟瞄, 一般由粗跟瞄光机械、伺服控制光电系统和光束位置探测器组成。精跟瞄系统主要作用是捕获和精密跟踪入射光束, 一般由精密扫描光机械及其位置探测器、伺服控制电路和光电位置探测器组成。由于在星间激光通信的两终端之间存在相对运动, 导致一个终端发射的激光到达另一个终端时将产生附加的位置移动, 因此要引入一个光机械装置产生发射光束提前量偏转来进行补偿。整个光学 PAT 系统采用复合轴控制结构, 粗跟瞄装置和精跟瞄装置采取有控制规则的结合, 两者密切配合, 保证平稳、高精度和大范围的跟瞄, 需要对伺服系统的跟踪误差和带宽优化设计。

3 国外研究进展

在卫星激光通信中, 建立高速精确的光学跟瞄系统是激光通信成功的关键。美国、日本和欧洲等在制定总体技术研究计划的同时, 也对 PAT 及其控制技术进行了深入研究, 并取得了一些突破性的研究成果。复合轴光跟瞄控制系统以欧空局 SILEX(Semiconductor laser intersatellite link experiment)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。

3.1 欧空局 SILEX 计划

欧洲空间局(ESA)SILEX 计划^[10-18]始于 20 世纪 80 年代推行的星间激光通信计划, 由法国的 Matra Marconi Spac 全面负责, 目的是要通过法国地面观测低轨卫星 SPOT4(1998 年发射)与高轨通信卫星 ARTEMIS(2001 年发射)之间的光学链接证实星间激光通信的可行性。同时实现 ARTEMIS 卫星与欧洲光学地面站(OGS)的激光通信, 并借助激光通信链路将 SPOT4 拍摄的图像实时地通过 ARTEMIS 卫星传送到法国的地面中心。

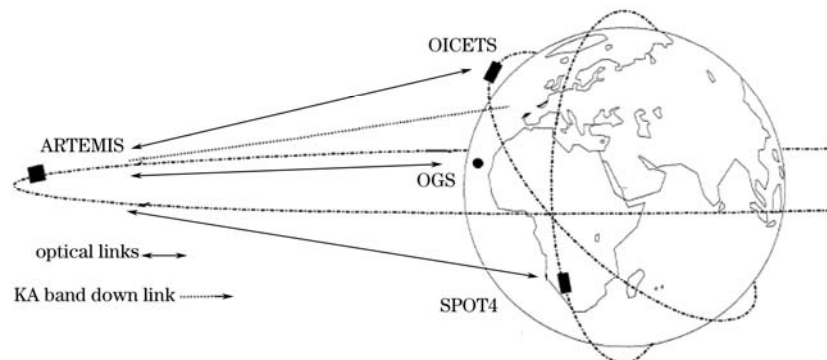


图 1 SILEX 计划任务示意图

Fig.1 SILEX mission

ARTEMIS 卫星还将与日本国家空间局(NASDA)在 1998 年发射的低轨光学星间通信工程测试卫星 OICETS 之间建立激光连接,如图 1 所示。

具有里程碑意义的是 2001 年 11 月 SILEX 系统成功实现了同步轨道卫星 ARTEMIS 与法国地面观测卫星 SPOT4 之间的星间激光通信。采用直接检测非相干通信技术路线,光源为激光二极管,波长为 800 nm,天线口径为 250 mm,码率为下行 2 Mbit/s,上行 50 Mbit/s,质量约 150 kg。值得提出的是,两个卫星之间的第一次成功通信是在 ARTEMIS 卫星没有完全进入同步轨道时完成的,这说明 SILEX 计划的方案是极其成功的,验证了星间激光通信的可行性。SILEX 计划解决了激光通信终端的精密光学瞄准捕获跟踪这一主要关键技术,所发展的复合轴粗-精跟踪系统能够出色完成高精度、高速率的激光通信连接任务。

欧洲在执行 SILEX 计划中在 PAT 系统上投入了大量的精力,设计出了性能完善可靠的复合轴 PAT 系统,在高轨通信卫星没有进入同步轨道的情况下仍然完成了与低轨卫星的互联通信,展现了很高的系统冗余度,其控制系统结构如图 2 所示。SILEX 复合轴 PAT 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,探测器的光点探测信号并不直接导入 CPA 控制环,而是通过检测 FPA 的位置探测器,当 FPA 偏离角较大时对 CPA 系统发出卸载命令以使 FPA 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,特别是平台存在扰动时可以有效地实现 PAT 过程,而实际的星载实验检验了采用这一复合轴架构的可行性。

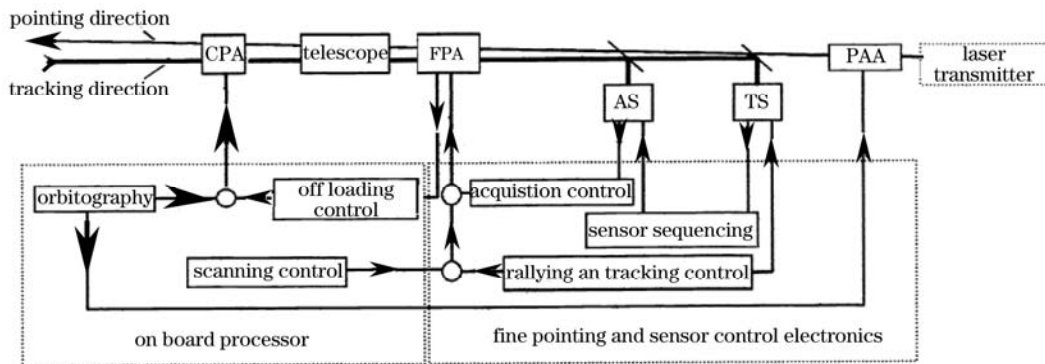


图 2 SILEX 复合轴 PAT 控制系统图

Fig.2 Function diagram of SILEX compound axis PAT control system

在完成星间激光通信后,欧空局还和日本宇航局合作于 2005 年 12 月完成了高轨 ARTEMIS 卫星和低轨 OICETS 卫星上激光通信终端(LUCE)的通信^[19-21]。LUCE 的性能参数和 SILEX 计划的终端相匹配,也采用复合轴跟瞄控制 PAT 系统,如图 3 所示。粗跟踪传感器采用 CCD 探测器,精跟踪传感器采用四象限探测器 QD。

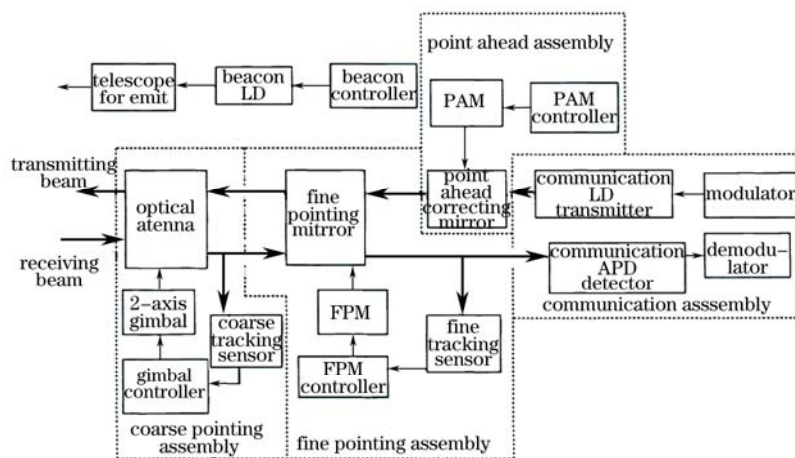


图 3 LUCE 光跟瞄系统框图

Fig.3 Block diagram of LUCE terminal PAT system

在这些成果的基础上, 2006年12月在40 km的距离上又成功进行了ARTEMIS卫星和法国达索航空公司Mystère 20飞机上的激光通信终端LOLA激光通信链路的试验。在九千多米的高度, 利用其LOLA机载激光链接系统与超过 4×10^4 km外的ARTEMIS卫星之间成功建立了6条双向激光通信链路。此后, 在2007年5月的巴黎航展上进行了实时的飞机和ARTEMIS卫星之间的通信展示, 这是世界上首次实现卫星和飞机之间的激光通信。

欧空局同时发展了世界上唯一的新一代高码率星间激光通信终端产品系列, 即OPTEL系列, 包括适用于所有低轨卫星、高轨卫星、深空通信、空间站的5种型号, 其中OPTEL-02, OPTEL-25(发射功率1.25 W, 质量40 kg, 功耗175 W)和OPTEL-80终端的码率约为1 Gbit/s, 作用距离分别从2000~80000 km不等, OPTEL系统组成框图如图4所示。OPTEL终端均采用相位调制和零差检测的相干通信体制, 复合轴光跟瞄系统的光源为激光二极管抽运Nd:YAG激光器加光纤激光放大器, 其波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 。上述发展的SOUT, OPTEL系列等终端尽管在主镜结构、精跟踪探测器和通信系统上与SILEX终端有了很大的不同与改进, 但是其复合轴PAT系统结构并没有发生多大变化, 进一步证明了采用卸载模式的复合轴光跟瞄系统的可行性。

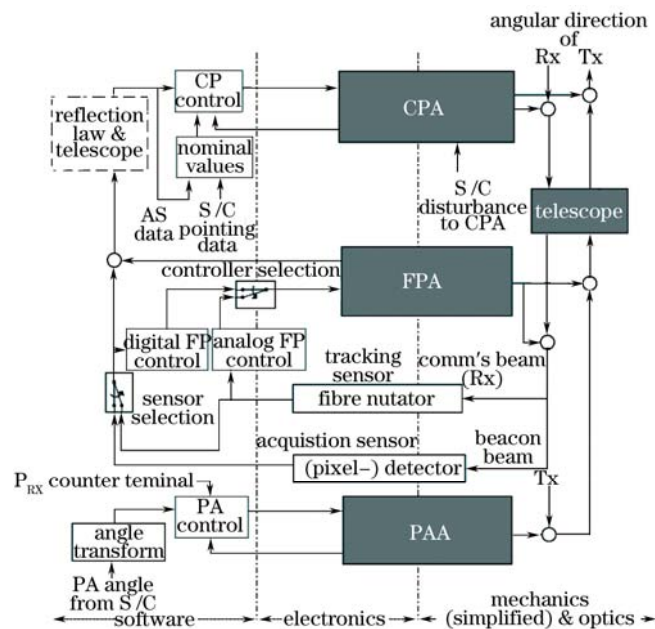


图4 OPTEL 复合轴光跟瞄系统组成框图

Fig.4 Block diagram of OPTEL compound axis PAT system

3.2 美国光通信终端

美国主要致力于星地激光通信技术的研究, 其中以美国国家宇航局(NASA)中心和喷气推进实验所(JPL)联合研制的光通信终端^[22-25]最为著名。它是区别于SILEX系统的另外一种复合轴光跟瞄系统的典型代表。OCD是一个满足低轨卫星与地面站链接的激光通信终端, 其目的是在实验室条件下验证降低结构复杂性的自由空间激光通信技术的可行性。

OCD在PAT系统中采用了高速单探测器二开窗结构, 仅仅在发射光路中采用FPA系统, 而省略了提前量系统(PAA), 能够用于近距离对地单向发射。图5为OCD光跟瞄结构示意图。此外OCD的复合轴控制架构如图6所示, 采用了传统的FPA补偿CPA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。

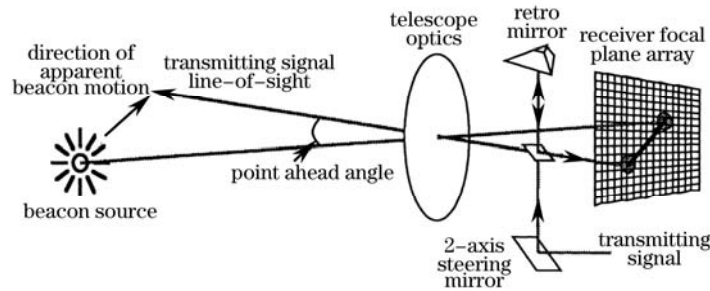


图 5 OCD 光跟瞄结构示意图

Fig.5 OCD spatial tracking system

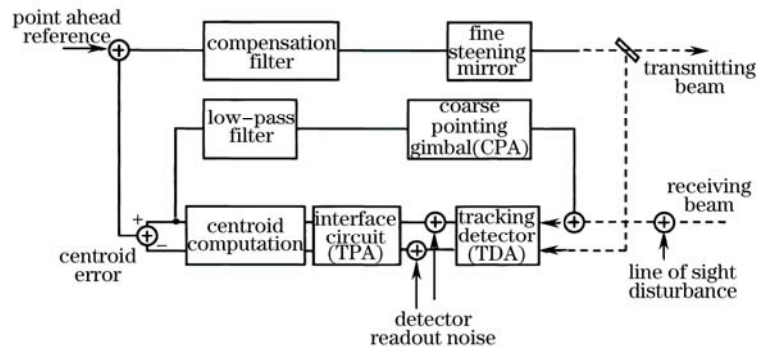


图 6 OCD 的 PAT 控制系统结构

Fig.6 Block diagram for PAT control system of OCD

4 展 望

复合轴光跟瞄技术是卫星激光通信 PAT 系统提高其跟踪精度的有效技术途径,使很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。目前卫星激光通信技术研究开发正在火热进行中, SILEX 实际的通信试验证明了卫星激光通信的可行性,并且可以采用低重量和低功耗的终端来提供更高的数据传输率,而且具有很好的安全保密性和抗干扰能力。随着人们对卫星激光通信相关关键技术研究的进一步成熟和对数据传输速率保密性能要求的不断提高,卫星激光通信将具有巨大的发展潜力和越来越广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 S. G. Lambert, W. L. Casey. Laser Communications in Space[M]. Boston, London: Artech House, 1995
- 2 Ma Huijun, Zhu Xiaolei. The latest progress of free space laser communications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(3): 7~10
马惠军, 朱小磊. 自由空间激光通信最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(3): 7~10
- 3 Wang Ling, Feng Ying. Progress and trend in satellite coherent optical communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(6): 49~53
王 玲, 冯 莹. 卫星相干光通信的研究进展及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(6): 49~53
- 4 Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~20
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 3~20
- 5 Liu Liren. Laser communications in space II test and verification techniques on the ground[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 147~155
刘立人. 卫星激光通信 II 地面检测和验证技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 147~155
- 6 E. Perez, M. Bailly, J. M. Pairet. Pointing acquisition and tracking system for Silex inter-satellite optical link [C]. *SPIE*, 1989, **1111**: 277~298

- 7 S. Lee, J. Alexander, M. Jeganathan. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground [C]. *SPIE*, 2000, **3932**: 150~157
- 8 Liu Ximin, Liu Liren, Lang Haitao. Study on APT technology and its control system of space laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(3): 2~6
刘锡民, 刘立人, 郎海涛. 星间光通信中的APT技术及其控制系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(3): 2~6
- 9 Zhang Binghua. Opto-Electronic Imaging Tracking System[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2003
张秉华. 光电成像跟踪系统[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2003
- 10 G. Oppenhauser, M. Witting. The European SILEX project: concept, performance status and planning [C]. *SPIE*, 1990, **1218**: 27~37
- 11 B. Laurent, O. Duchmann. The SILEX project: the first European optical intersatellite link experiment [C]. *SPIE*, 1991, **1417**: 2~12
- 12 M. Bailly, E. Perez. The pointing, acquisition and tracking system of SILEX European program: a major technological step for intersatellites optical communication [C]. *SPIE*, 1991, **1417**: 142~157
- 13 T. T. Nielsen. Pointing, acquisition and tracking system for the free space laser communication system, SILEX [C]. *SPIE*, 1995, **2381**:194~205
- 14 T. T. Nielsen, G. Oppenhauser. In orbit test result of an operational intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX [C]. *SPIE*, 2002, **4635**: 1~15
- 15 http://www.esa.int/esaCP/SEMN6HQJNVE_index_1.html
- 16 http://www.esa.int/esaCP/SEMIJVVWLWFE_index_0.html
- 17 M. Toyoshima, S. Yamakawa, T. Yanawaki *et al.*. Ground-to-satellite optical link tests between the Japanese laser communication terminal and the European geostationary satellite ARTEMIS [C]. *SPIE*, 2004, **5338**: 1~15
- 18 T. Jono, Y. Takayama, N. Kura *et al.*. OICETS on-orbit laser communication experiments [C]. *SPIE*, 2006, **6105**: 610503
- 19 G. Baister, T. Dreischer, M. Tüchler *et al.*. OPTEL terminal for deep space telemetry links [C]. *SPIE*, 2007, **6457**: 645706
- 20 T. Araki, S. Nakamori, Y. Hisada *et al.*. Present and future of optical intersatellite communication research at NASDA[C]. *SPIE*, 1994, **2123**: 2~14
- 21 T. Dreischer, A. Maerki, T. Weigel *et al.*. Operating in sub-arc seconds: high precision laser terminal for intersatellite communications [C]. *SPIE*, 2002, **4902**: 87~99
- 22 D. Russell, H. Ansari, C. C. Chen. Lasercom pointing acquisition and tracking control using a CCD-based tracker [C]. *SPIE*, 1994, **2123**: 294~303
- 23 C. Chen, J. R. Lesh. Overview of the optical communications demonstrator [C]. *SPIE*, 1994, **2123**: 87~95
- 24 L. Voisinet. Control processing system architecture for the optical communications demonstrator[C]. *SPIE*, 1994, **2123**: 393~398
- 25 M. Jeganathan, A. Portillo, C. Racho *et al.*. Lessons learnt from the optical communications demonstrator (OCD) [C]. *SPIE*, 1999, **3615**: 23~31