

卫星光通信关键技术与演示系统光学天线^{*}

何 毅^{**}

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

【摘要】 针对卫星间光通信链路需求, 分析了卫星间激光通信系统关键技术分布。介绍具有自动跟瞄功能的激光通信系统光学天线构成方式, 对主要性能参数进行了设计和计算。

关键词 卫星; 光通信; 通信链路; 光学天线

中图分类号 TN929.1; TH743

卫星作为现代通信和地球监测必不可少的信息平台近年来得到了飞速发展, 并已形成覆盖全球的通信网。各轨道面上卫星分布越来越密集, 因此探索一种高码率、无干扰、高可靠的卫星间通信手段已经变得非常迫切, 国外近年来发展了卫星间的光通信技术。

早在 70 年代, 日本和美国 NASA 等在研究光波空间传播技术的时候就提出了空间光通信概念^[1,2]。到 80 年代末 90 年代初, 国际上日益认识到建立卫星间光通信联系已经势在必行, 日本、美国、欧洲空间总署等先后制订了发展卫星间光通信的研究计划, 并取得了相当好的进展^[3~8]。在卫星与地面之间^[1,3]、地球轨道同步卫星与近地轨道卫星之间^[9]、地球轨道同步卫星之间^[2]的光通信技术都有深入探讨。一些初步设计方案和地面演示系统得以实施^[9~11], 并取得成功。综合国外的进展状况, 可以说卫星间激光通信关键技术大多得到初步解决, 如果能优化卫星的动态平稳特性, 较好地控制卫星姿态使其不产生随机章动, 则卫星间光通信链路投入使用就指日可待。

近几年, 在研究干涉滤波片的同时, 国际上成功开发了原子谱线滤波器, 其通光带宽比干涉滤波片窄两个以上数量级, 作为光学系统整体结构的无回差光机轴系也得到解决^[11]。

国内在激光无线通信技术研究方面开展了近 30 年的研究, 积累了较广泛的技术经验。但针对卫星间光通信链路技术的研究在我国几乎仍是空白。

1 卫星间光通信系统关键技术分析

1.1 概论

激光通过大气等随机介质的传播要受到非常复杂的信道干扰^[12], 包括分子吸收、散射、湍流等物理作用要引起激光能量衰减、光束扩散及波前畸变, 甚至造成激光束随机漂移。鉴于这些影响, 大气中的无线光通信技术一直发展缓慢, 未得到足够的重视。近 10 多年来, 半导体激光器及其调制, 以及高性能光电探测器得到飞速发展, 人们逐渐认识到激光潜在的优势(高码率、重量轻、体积小)可能用于卫星间及卫星与地面间的通信。

一颗卫星要实现设计功能, 除研制过程外, 还要经过发射、轨道定位、姿态调整、姿态控制等过程, 每一步骤都可能对卫星上设备造成影响。因此, 我们在探讨卫星间光通信系统技术时, 必须重视所有的环节。

1.2 关键技术分布

整机方面:

1) 要有效地降低发射成本, 提高单位重量的工作效能, 对卫星整体重量必须进行严格控制。同时, 发射过程中的加速度及火箭随机振动要对卫星负载施加影响, 因此, 研究卫星用光端机时,

1998 年 7 月 25 日收稿

* 国防科研基金资助项目

** 男 30 岁 博士 讲师

必须选择密度小、刚度性能优越的材料，如碳化硅等。同时，优化光路以尽量减少光学元件数目也很有必要。

地面和空间轨道上环境温度差异很大，光机系统必须克服温差可能带来的影响。通常把光学系统设计成反射方式有利于降低温度补偿的难度。

2) 卫星姿态调整结束后，光机扫描的动力学性能将成为影响卫星运行状态的首要因素。尽可能减轻扫描动镜的质量，增大卫星整体与动镜质量比有利于维持光束的指向精度。

3) 扫描机械轴系是保障激光通信得以可靠实现的重要部件，由于卫星间距远，信号光束散角很小 (10^{-4} rad 量级)，研究无回差机械轴系很有必要。

4) 必须有灵巧的扫描方式和良好的驱动电路来保证卫星间快速建立双向光通信联系。

光源和探测方面：

1) 光通信的最大潜力在于激光器，要充分开发出光波的优势，激光器必须具有高功率、优异的波前和卓越的调制响应性能，同时，激光器寿命和能耗决定了光通信系统的工作寿命。目前国外已经制作出平均功率为 100 ~ 200 mW，调制码率接近 1 Gbit 的半导体激光器。功率为 1 ~ 10 W 的激光器也已研制成功，但调制响应性能还有待改善。

2) 低阈值、低噪声、高线性、高响应速度的宽带激光探测器是光通信不可缺少的传感器。

3) 卫星轨道大多处于深空，但仍然要受到背景光干扰，如太阳光、星光及来自地表和云层散射光等都可能完全掩盖通信光信号，因此尽量避免背景杂散光进入探测器光敏面是设计者必须考虑的关键技术。国外已经研制成功了 $0.83\mu\text{m}$ 波段的原子谱线滤波器，其性能比干涉滤波片好两个以上数量级。我国也试制出了一种原子滤波器，波长位于 $0.78\mu\text{m}$ 波段，不过，这个波长的高功率、高调制带宽激光器尚不够成熟。实际上，原子谱线滤波器一般用在信标光检测光路中（接收视场角比信号光检测光路的接收视场角大一个量级），而高功率信标光波长一般为 $0.83 \sim 1.06\mu\text{m}$ 。

至于光学天线方面，目前国际上提出了多种类型的卫星激光通信光学系统，归纳起来要解决如下一些关键技术：1) 激光搜索捕获；2) 粗跟踪；3) 精跟踪；4) 光束准直；5) 光束指向提前；6) 背景光抑制。这些技术不仅取决于光学系统，还依赖于与之配套的机械和电子系统。其中搜索范围取决于轨道定位精度（通常优于 8 mrad ），粗跟踪一般通过电机驱动光学天线绕两个相互垂直的轴系独立转动来实现，精跟踪大多用压电陶瓷来微调光路。

卫星间距离典型值约有 45 000 km，而较适合卫星使用的光学天线孔径为 15 cm 左右，要使 100 mW 的激光输出在探测器光敏面上达到约 1 nW 的功率，光束发散角应小于 $15\mu\text{rad}$ （假设发射和接收效率都为 0.5），因而光束准直和精跟踪必须达到很高的精度。

2 空间光通信地面演示系统光学天线设计

目前研究的自由空间激光通信技术，目的是跟踪国外类似研究的先进技术。将在地面环境中演示具有自动跟瞄功能的光通信机，要求光机系统完成搜索、粗跟踪、精跟踪和通信功能。

2.1 光学天线构成和基本参数

2.1.1 主天线系统

如图 1 所示，它由主天线主镜 T1、副镜 T2、干涉滤波分束片 CS1、CS2、场镜 L1、L2 及探测器 Det、CCD 或 PSD 等主要元件组成。

CS1 为 45° 入射的窄带透射干涉滤波片，它选择透过信号光；CS2 为正入射的干涉窄带透射干涉滤波片，它选择透过信标光。场镜 L1 把信号光聚焦到探测器 Det 上，信号经前放 PAM.1 放大后送出；场镜 L2 把信标光聚焦到 CCD 或 PSD 上，产生的位置信号经放大器 PAM.2 放大后

送出。我们取系统等效孔径 $\phi 100 \sim \phi 120$ mm, 等效焦距 600 mm, 因此, 要使位置角精度达到 $50 \mu\text{rad}$, CCD 或 PSD 的位置分辨率至少超过 $30 \mu\text{m}$ 。

满足卫星使用要求的主天线应具有很低的温差影响系数, 通常采用反射式结构比较容易。我们考虑用透镜组成主天线, 目的是降低夹具加工成本。

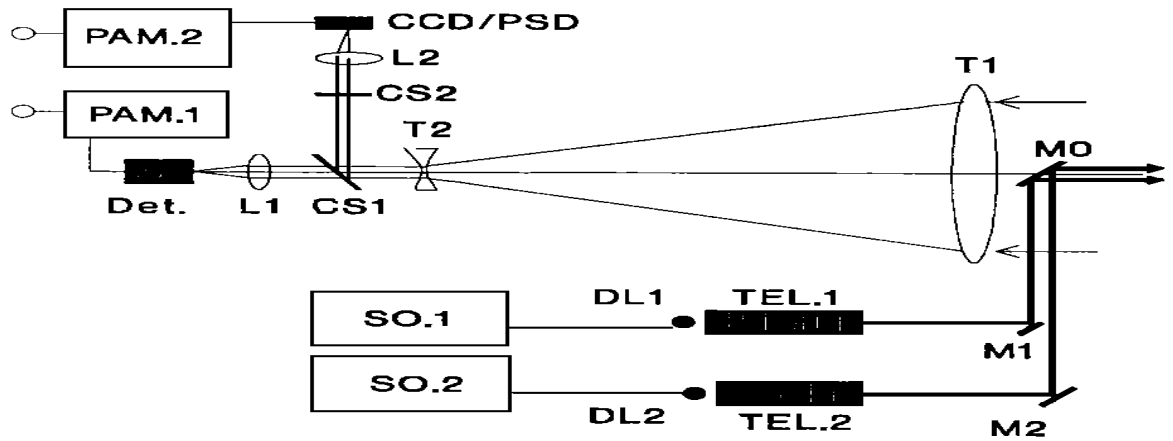


图1 光学天线示意图

2.1.2 发射光学系统

如图1所示, 驱动源 SO.1 调制并驱动半导体激光器 DL1, 发射的信号光束经准直望远镜 TEL1 准直后由反射镜 M1 反射到 M0, 并发射到对方的接收系统; 驱动源 SO.2 调制并驱动半导体激光器 DL2, 发射的信标光束经准直望远镜 TEL2 准直后由反射镜 M2 反射到 M0, 与信号光一起发射出去, 方向沿着主天线轴线。发射光路与接收光路构成收发共轴隔离系统, 隔离度为 100%。

2.1.3 基本设计参数

- 信号光功率: > 10 mW;
- 信号光发散角: 0.5 mrad;
- 信标光功率: $> 1\ 000$ mW;
- 信标光发散角: 5 mrad。

2.2 光学天线的特点

1) 发射效率高。激光器发出的信号光和信标光功率在光学前端系统中仅受到准直望远镜损耗影响。两束光并束时, 没有采用分束片, 而是独立入射的全反射镜片上, 由于信标光和信号光都具有一定的发散角, 对远处目标, 两束光在反射镜 M0 上的位置差不会影响合束的效果, 这些措施保证了较高的发射效率, 使其超过 0.5。

2) 接收效率高。入射到主天线上有效孔径面上的光功率主要损耗来自于反射镜 M0 的挡光。但是 M 孔径与主天线孔径面积之比约为 0.04, 再考虑到 M0 支架的挡光, 总损耗低于 0.1。因此, 天线接受效率可以达到 0.5。

3) 信标光与信号光共用 T1 和 T2, 保证了系统跟瞄的可靠性。

4) 天线结构紧凑, 光路简明, 收发隔离度高, 完全避免了本端机反馈干扰。

2.3 背景光的影响

由于演示系统在地面操作, 因而日光、月光、星光及灯光和建筑物辐射的近红外光等都构成背景光。取天线发射效率为 0.5, 接收效率为 0.5; 信号光功率 10 mW, 发散角 0.5 mrad, 信标光功率 1 W, 发散角 5 mrad; 接收天线孔径 100 mm; 信标光探测器接收视场角 25 mrad, 信号光探测器接收视场角 0.25 mrad; 背景光照度 100 000 勒克斯, 天线对背景光接收效率 0.01

(干涉滤波片具有窄带透过性能); 信道衰减系数 1.5 dB/km。我们计算了信号光和信标光探测器光敏面上信号光和信标光功率与背景光功率之比, 结果如表 1 所示。可见, 这样设计可以充分保证探测器具有足够的信噪比。

表 1 不同距离上信号光和信标光与背景光功率比

L/km	1	2	3	4
$P_{\text{信号}} / \mu\text{W}$	86	18.5	7	3
$P_{\text{信标}} / \mu\text{W}$	86	18.5	7	3
$P_{\text{信号}} / P_{\text{背景}}$	10^5	2×10^4	8×10^3	3×10^3
$P_{\text{信标}} / P_{\text{背景}}$	10^3	2×10^2	80	30

3 结 论

本文分析了卫星间光通信系统光学天线的关键技术, 并介绍了演示用光学天线系统的设计方案和基本参数。在图 1 所示的光学天线外光轴上设置扫描镜, 或者把整个天线系统安装在扫描平台上即可实现跟瞄功能。根据本文参数计算表明天线具有足够的信噪比, 因而可以保证概念性演示系统对信号的需求。

参 考 文 献

- Shikatani M, Yoshikado S, Animoto Y *et al.* Optical intersatellite link experiment between the earth station and ETS-VI SPIE, 1990, 1 218: 2~12
- Lesh J R, DePaula R. Overview of NASA R&D in optical communications. SPIE, 1995, 2 381: 4~11
- Komatu K, Kanda S, Hirako K *et al.*, Laser beam acquisition and tracking system for ETS-VI laser communication equipment (LCE). SPIE, 1990, 1 218: 96~107
- Marshalek R G, Begley D L. Lightweight, high-data-rate laser communications terminal for low-earth-orbit satellite constellations. SPIE, 1995, 2 381: 72~82
- Nielsen T T. Pointing, acquisition and tracking system for the free space laser communication system (SILEX). SPIE, 1995, 2 381: 194~205
- Oppenhauser G, Wittig M. The European SILEX project: concept, performances, status and planning. SPIE, 1990, 1 218: 27~36
- Krainak M A. Optoelectronics research for communication programs at the Goddard space flight center. SPIE, 1992, 1 635: 154~168
- Seery B D. The Goddard optical communications program. SPIE, 1990, 1 218: 13~26
- Nakagawa K, Yamaoto A. Preliminary design of laser utilizing communications equipment (LUCE) installed on optical inter-orbit communications engineering test satellite. SPIE, 1995, 2 381: 14~25
- Shikatani M, Toyoda M, Takami H *et al.* Ground system development for the ETS-VI/LCE laser communications experiment. SPIE, 1993, 1 866: 21~29
- Korevaar E, Bloom S, Slatnick K *et al.* Status of SDIO/IS & T lasercom testbed program. SPIE, 1993, 1 866: 116~127
- 吴 健, 乐时晓. 随机介质中的光传播理论. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1988

Key Techniques for Inter—satellite Optical Communication and Preliminary Design of Optical Antenna of Demonstrator System

He Yi

(Institute of Applied Physics, UEST of China, Chengdu 610054)

Abstract According to the demands of the optical communication links between satellites, the key techniques are analyzed briefly. The preliminary design of the optical antenna of a demonstrator system is also introduced in this paper. This demonstrator system has the automatic tracking function, in which the dominant parameters are given.

Key words satellite; optical communication; communication link; optical antenna