

空间光通信 ATP 技术及其进展 *

皮德忠 ** 尹道素

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

【摘要】 对自由空间激光通信光束自动捕获、跟踪、瞄准 (ATP) 系统的结构与系统主要技术指标进行了分析和讨论。通过对其中典型系统的介绍,进一步描述了 ATP 技术的最新进展,论证了空间激光通信的可行性。

关键词 空间光通信; 光束捕获; 光束跟踪; 光束瞄准

中图分类号 TN929.1; TP273

自 60 年代初激光器诞生之日起,科学家们就十分关注采用激光进行通信,经过 30 多年的努力,各项基本技术有了长足的进步,并已成功地应用到各个通信领域。首先是光纤通信的发展,现已成为高速有线信息传输的骨干通路。而无线光通信技术领域,在 60、70 年代主要进行近地大气激光通信的研究,由于地面大气通道中,激光传播受到气候条件随机变化的影响,其应用受到很大阻碍。但进入 80 年代后,空间卫星通信的发展,特别是全球信息高速公路网的发展,卫星信息传输容量剧增,常规的卫星微波通信已经不能满足应用的需要。因此,与光纤通信代替了常规电缆通信类似,自由空间激光通信是未来卫星通信的主要手段,是今后卫星高码率通信的唯一解决方案,势在必行。

自由空间激光通信信道具有容量大、光发射定向性好、与微波通信相比,激光通信系统具有功耗低、体积小、重量轻、容量价格比低等优点。特别是超大容量长距离数字通信系统中,用星际光链路比地面光纤、电缆成本要低。因此,卫星通信的重要发展方向是光通信。美国、欧洲和日本等国投入大量人力、资金进行研究。主要发展同步卫星 (GEO) 之间和低轨卫星 (LEO) 之间,以及 GEO-LEO 和卫星与地面站之间的光通信系统。主要目标是解决空间大容量信息传输的问题,以适应未来信息社会的需求。

在自由空间激光通信系统中是利用极窄的光束作为信息传输的载体,光束辐射的束散角大约为几十 μrad , 它比微波通信辐射低 3~4 个数量级,因此光束的对准是应首先解决的问题,特别是当光通信设备安装在运动的卫星上,解决收发光束的捕获、跟踪、瞄准 (ATP) 就成为自由空间激光通信最关键的系统技术。本文就 ATP 技术及发展状况进行分析和介绍。

1 ATP 系统结构

自由空间光通信系统结构如图 1 所示,该系统主要由五大部分组成:

1) 光天线伺服平台: 主要包括天线平台及伺服机构,它们受计算机控制。在捕获阶段完成捕获扫描,系统处于按预定指令工作状态,将光束导引到粗定位接收视场,完成光束捕获。在跟踪、定位阶段,则根据跟踪探测器获得的误差信号,经处理后送到伺服执行机构,构成一个负反馈闭环系统,完成精定位。对于运动载体上的光通信装置,必须增加陀螺控制回路,以减小各种扰动误差的影响。

2) 误差检测器: 包括光天线及光电探测器。光电探测器一般由捕获探测器 (CCD) 和定位探测器 (QD) 组成。CCD 完成捕获与粗跟踪,并将接收光引导至 QD 上,进行精定位,最后使

收发端光束对准，精度达到 $2\mu\text{rad}$ 。

3) 控制计算机：包括中心控制处理器与输入、输出接口设备，控制计算机可以接收卫星控制指令，控制天线伺服平台粗对准光链路的连接方向（初始方位）。捕获阶段可以由预定的程序控制光束扫描和捕获。在跟踪阶段，计算机对误差信号进行计算，并实时的输出信号控制天线伺服平台的粗、精跟踪，完成光束的对准。

4) 激光器：包括信标光激光器和信号光激光器。信标信号用于调制信标光，传输信息调制信号光。

5) 通信调制/解调器。

上述前四部分是 ATP 系统的组成部分。卫星间光通信 ATP 系统的主要参数如表 1 所示。要达到表 1 所示的指标要求，技术上有相当大的难度。目前世界上正在研制的部分空间光通信 ATP 系统的结构参数示于表 2。

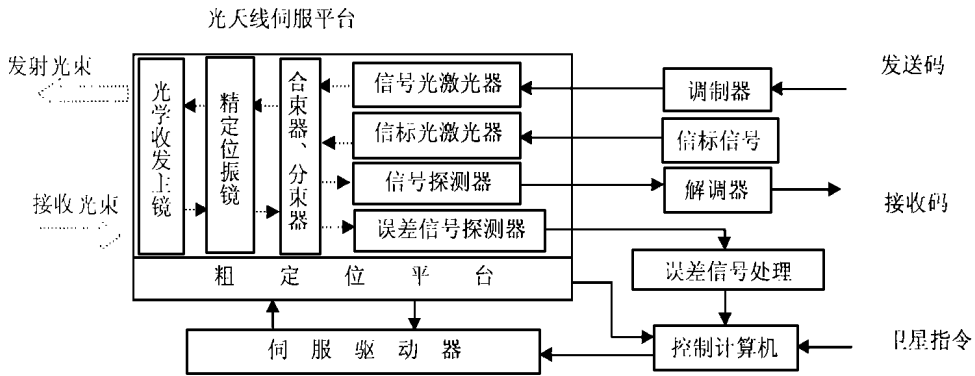


图 1 具有 ATP 功能的激光通信系统结构

表 1 ATP 系统主要参数要求

功 能	要 求	功 能	要 求
控制平台	三轴稳定	精定位精度/ μrad	1 (1σ)
卫星姿态对准精度/ μrad	180 (2σ)	光束跳动稳定误差/ μrad	0.25 (1σ)
空间距离/ km	84 000	系统捕获时间/ s	10
动态速率/ $\mu\text{rad/s}$	18 000	重新捕获时间/ s	0.5
粗定位精度/ μrad	10 ~ 100 (1σ)	系统寿命/year	10

2 ATP 技术的研究进展

自由空间激光通信发展计划主要有欧洲航天局的 SILEX (Semiconductor Intersatellite Laser Equipment) 系统，日本的 LCE (Laser Communication Equipment) 系统，美国 NASA 的 TDRSS II 系统以及美国 Thermo Trex 公司的 TTC LC 实验计划等。各个计划均以 ATP 技术作为主攻方向，建立动态状态下的光束自动捕获、跟踪、瞄准系统，保持光链路传输信息的畅通，已经有工程实验系统进行系统 ATP 技术的认证实验，取得突破性的进展，现简述如下。

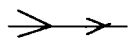
早在 1977 ~ 1980 年间，美国就已进行了用 Nd: YAG 激光进行通信的实验计划。1980 年在美国新墨西哥白沙导弹靶场进行飞机（地面站之间的激光通信实验，实验持续了三个月，总计工作 200 h。激光通信设备安装在 USAF KC-135 飞机上，围绕地面站飞行，相距在 10 ~ 100 km 之间，如图 2 所示。完成了用窄光束进行光束捕获、跟踪、定位实验认证，实现了下行 1 000 Mbps，上行 200 kbps 的信息传输。

表 2 国外空间光通信系统 ATP 结构及主要参数

系统 参数	LUCE (Japan)	LCE (Japan)	STRV-2 (USA)	SILEX (ESA)	SOLACOS (Germany)
光束波长/nm	797~808	830/510	810/852	797~853	810/1064
光束散角/ μ rad		20 (信号)	80 (信号) 750 (信标)	80 (信号) 750 (信标)	
捕获时间/s	360.00	实验中约 720.00	> 100.00	240.00	0.04
定位精度/ μ rad	2	2	2	2	0.2
探测器	CCD (捕获) QD (定位)	CCD (捕获): 捕获范围: $\pm 1.5^\circ$ 视场角: 8 mrad QD (跟踪) 跟踪精度: 2μ rad 视场角: 0.4 mrad	CCD (捕获): 捕获范围: $\pm 5^\circ$ 视场角: 70 mrad 5 \times 5 CCD (跟踪) 视场角: 15 mrad 带原子能滤光器	384 \times 384 CCD (捕获) 14 \times 14 CCD (跟踪)	256 \times 256 CCD (捕获) 光束位于 CCD 中央 (32 \times 32 CCD) 3 \times 3 CCD (跟踪)
天线/cm	Φ 26.0 收发合一	Φ 7.5 收发合一	Φ 13.7/3.8 收发分离	Φ 25.0 收发合一	收发合一
光行差校正		> ± 100			
通信距离/km	30 000	40 000	2 000	45 000	实验室内

1996年12月美国 Thermo Trex 公司在 San Diego 进行了飞机—地面站远距离的激光通信试验, 系统安装有原子滤光器, 抑制背景光, 改善信噪比, 使其优于倍。机上 ATP 系统, 粗跟踪万向支架水平可在 $\pm 180^\circ$ 、垂直 $+10^\circ \sim -90^\circ$ 范围内转动, 信标光束散角为 2 mrad, 信号光为 100μ rad, 飞机—地面站距离 20~30 km。系统用全球卫星定位 (GPS) 系统引导到初始位置, 进行捕获, 继而转入跟踪该系统实验成功, 为战略导弹防卫系统的高速率激光通信网的建立打下了基础。系统如图 3 所示。

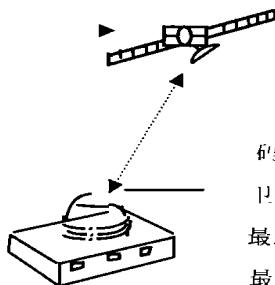
飞机至卫星的交换链路



链路距离范围 R

俯仰角 δ

山顶上的光通信终端



码率: 124 Mbps

卫星轨道 $410 \text{ km} \times 1750 \text{ km} \times 70^\circ$

最近距离: $R=1060 \text{ km}$, $\delta = 38^\circ$

最远距离: $R=1800 \text{ km}$, $\delta = 15^\circ$

实验持续时间: 400 s

图 3 STRV-2 光通信试验系统

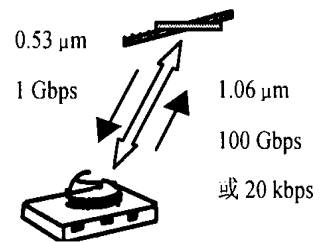


图 2 USAF KC-135 飞机光通信实验系统

日本的 LCE 计划, 1994 年 ETS-VI 卫星升空, 从 1994 年 12 月 ~ 1996 年 7 月, 完成了系统试验, 下面对这个系统进行较为详细的解释。

3 典型 ATP 系统介绍

1986 年日本通信研究实验室 (CRL) 启动同步工程测试卫星 (ETS-VI) 与地面站间的光通信设备 (LCE) 研制。1994 年 8 月 LCE 设备装载与 ETS-VI 卫星上, 由日本国家宇航局 (NASDA) 发射升空。从 1994 年 12 月 ~ 1996 年 7 月完成了星际光链路的认证和评估, 预定实验计划几乎全部完成。参加实验的还有美国喷气动力实验室 (JPL), 联合试验利用日本 NASDA 和美国 NASA 的深空网络作支撑, 完成了 ETS-VI/LCE-地面站间的光通信实验, 这是自由空间激光通信技术发展史上的突破性进展, 证明在非同步轨道上的卫星可以和世界任何地方实现激光信息传输是可行的。

地面站一个在日本东京, 由日本 CRL 利用日本 NASDA 跟踪与控制中心进行激光链路的连接。另一个地面站是美国 JPL 的 TMF, 位于加州 Wightwood Table 山顶, 海拔 2 300 m, 利用 NASA 的深空网络 Gold Stone 站进行跟踪与控制, 完成光链路的连接。其工作过程如图 4 所示。当卫星通过地面站时, 地面站利用日本 NASDA 或美国 NASA 卫星测控系统调整卫星姿态, 卫星上 LCE 设备由地面站指令控制, 使光天线视场瞄准地面站, 而地面站光天线对准卫星, 发射宽束散角的信标光。当信标光处于星上接收视场内, 被 CCD 探测器检测捕获到, 便转入闭环控制, 根据 CCD 探测器输出的误差信号, 调整粗跟踪二轴万向支架, 使卫星上光天线光轴对准地面站, 并使卫星上 LCE 设备接收到的光斑处于 CCD 的中央, 将接收光斑引导到跟踪探测器 QD 上。此后, LCE 发射一窄光束给地面站, 地面站收到后, 再发射窄的信号光至卫星, 至此完成光链路连接, 地面站和卫星双方进入闭环精定位, 保持光链路连接, 使光通信链路信息传输畅通。光链路的连接是由粗跟踪和精跟踪组合机构完成, 系统误差优于 $2 \mu\text{rad}$ 。日本 LCE 系统的试验成功地实现了 ETS-VI 与地面站间的双向激光通信, 通信距离大于 40 000 km。试验从 1994 年 12 月 ~ 1996 年 7 月 4 日 (卫星在轨寿命结束前一天)。

4 结束语

自由空间激光通信是卫星通信发展的重要方向, 是实现未来超大容量通信的主要手段。ATP 技术的进展和空间认证系统的试验成功, 为自由空间激光通信的工程实现展现了光明的应用前景。本文研讨了 ATP 系统的总体结构, 综述了系统参数, 为 ATP 系统的设计提供了依据。

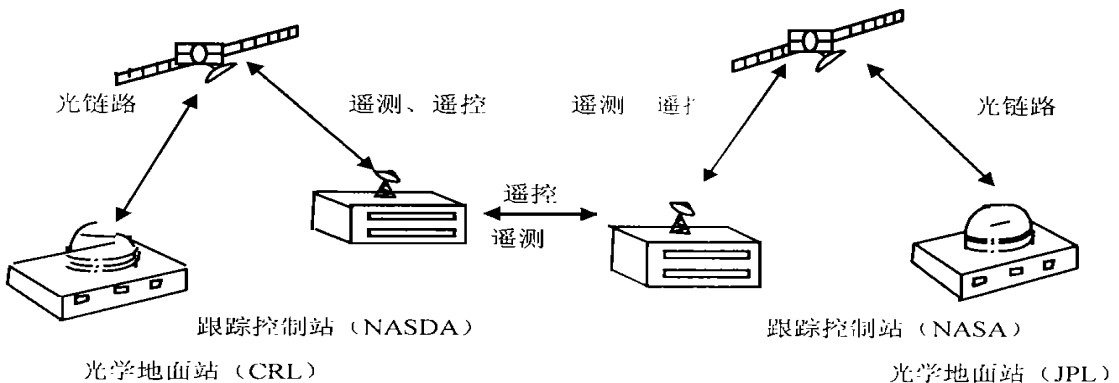


图 4 LCE-地面站深空网络测控系统

参考文献

- 1 Arimoto Y, Toyoshima M, Toyoda M. Preliminary result on laser communication experiment using (ETS—VI) . SPIE, 1995, 2 381; 151~159
- 2 Shikatani M, Yoshikado S, Arimoto Y. Optical intersatellite link experiment between the earth station and ETS—VI. SPIE, 1990, 1 218; 2~12
- 3 Komukai, Toshihachō, Saiwaiku *et al.* Performance evaluation of laser communication equipment onboard the ETS—VI Satellite. SPIE, 1996, 2 699; 52~60
- 4 Jeganathan M, Ttoyoshima M *et al.* Data analysis results from the GOLD experiments. SPIE, 1997, 2 990; 70~81
- 5 Chen C, Lesh J R. Overview of the optical communications demonstrator. SPIE, 1995, 2 381; 85~95
- 6 Roy S B. Overview of lasercom program at Lincoln Laboratory. SPIE, 1995, 2 381; 2~3
- 7 Korevaar E J, Schuster J J, Adhikari P *et al.* Description of STRV—2 lasercom flight hardware. SPIE, 1997, 2 990; 38~51
- 8 Korevaar E J, Schuster J J, Adhikari P *et al.* Description of STRV—2 lasercom experimental operations. SPIE, 1997, 2 990; 60~69
- 9 Katzman Morris Edition. Laser satellite communication. London; Prentice—Hall International Limited, 1987

Acquisition, Pointing, Tracking Technology and Its Development for Free—space Laser Communication

Pi Dezhong Yin Daosu

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

Abstract Acquisition, pointing and tracking—ATP technology is one of the key techniques of free—space laser communication system. The architecture and main parameters of ATP system for free—space laser communications are analyzed and discussed in this paper. America, Japan and Europe countries dominate the field of free—space laser communications, and their latest development of ATP technology is described by introducing its topic system. The feasibility of space laser communication is also proved.

Key words space laser communication; laser-beam acquisition; laser-beam pointing; laser-beam . tracking