

·研究动态·

## 美国空间激光通信研究发展概况及现状<sup>\*</sup>

潘文<sup>\*\*</sup>

胡渝

(常州工业技术学院电气系 常州 213002) (电子科技大学应用物理所 成都 610054)

**【摘要】** 从 NASA 和 MIT Lincoln 实验室两大研究机构出发来探索美国激光通信的发展趋势, 主要介绍了以 LCDS 系统为例的美国激光通信系统的关键技术和单元部件, 对光、机、电系统的综合处理, 以及各系统的优化方法和主要指标。

**关键词** 激光通信; 美国; 光通信演示; 卫星光传输

中图分类号 TN929.1

美国是世界上最早开展激光通信技术研究的国家, 也是研究技术走在最前沿的国家之一, 它最主要的研究部门有美国宇航局 (NASA) 和美国空军 (Air Force)。<sup>[1,2]</sup>

NASA 首次涉足激光通信是 70 年代初, 它考虑的应用是高码率的同步卫星间 (GEO—GEO) 光连接和低码率的深空光中继。以后, 随着体积小、重量轻和成本低的近地卫星 (LEO) 的增多, 以及相应的关键技术和元器件的发展, 激光通信的应用将逐步扩展到 LEO—LEO, LEO—GEO, LEO—地面站和 LEO—飞机的光通信链路。

NASA 的代表系统是 LCDS (Laser Communication Demonstration System), 其技术要求至少有一个通信端机在太空中, 通信码率不小于 750 Mbps。按计划, LCDS 的飞行实验演示将于 1998 年实施。

NASA 还同时进行了一些自由空间激光通信的关键技术和演示系统的研究。它们是光通信演示系统 (OCD—Optical Communication Demonstration)、空对地演示系统、TOPSAT (Topographical mapping SATellite) 系统研究、大气能见度监测计划 (AVMP—Atmosphere Vision Monitor Proposal) 等。另外, NASA 还在进行如下的一些关键技术研究: 小口径光学天线的研制; 高功率的激光源及调制方法; 近量子限的高灵敏度接收机; 快速准确的 ATP 技术研究等。

美国空军是从 70 年代末开始进行激光通信技术研究的, 它的主要研究部门是 MIT 的 Lincoln Laboratory, 其早期的成果是完成了 100 Mbps 的外差接收实验系统。目前, 它最具代表性的系统是 LITE (Laser Intersatellite Transmission Experiment) 系统。

### 1 美国激光通信发展简史

早在 1980 年, 林肯实验室在射频通信领域就已具有领先地位, 同时又负责美国空间激光通信的研究, 开始建立空间激光通信系统, 从事必要部件及系统的开发研究、演示、实验论证。早期的林肯实验室从事相干光通信的研究, 其主要光源是用商用的 30 mW AlGaAs 半导体激光器。采用外差法成功地实现了终端—终端高码率卫星通信的演示实验, 并且演示了空间捕获和跟踪定位功能。

NASA 从事通信研究的历史更早, 在 70 年代初期开始, 主要研究 GEO—GEO 链路高码率通

1998 年 6 月 25 日收稿

\* 国家科委 863 高科技项目, 基金号: 863.31.5.2

\*\* 男 27 岁 硕士

信和低空链路的低码率通信。在低码率通信中涉及到激光器、探测器、定位系统、光信道等技术研究领域。

林肯实验室和 NASA 共同致力于 NASA-ACCS 通信卫星演示系统的研制。演示系统卫星于 1989 年发射,它具有外差式大地终端全双工下行链路,系统容量可达 220 Mbps,在该系统中采用了捕获、跟踪、瞄准定位技术。以后又成功地进行了 SIR-C, Radar-c/s-SAR 等系统的演示实验,目前正在进行 TDRSS (Tracking Data Relay Satellite System), DOD (Department of Defense), TOPSAT (the TOPographical mapping SATellite) 等系统的研究。

美国空军于 1985 年开始研制的 LITE 系统计划装载于 NASA 的卫星 ACTS 上,进行与地面站之间的半双工下行光链路联结实验,传输码率为 220 Mbps。这项计划已经进入了工程化阶段。Astro Terra 公司也在 Air Force 的资助下进行激光通信技术的研究,它研制的系统将装载在 1998 年发射的卫星 STRV-2 上。该通信系统的传输码率为:上行, 155 Mbps; 下行, 1.24 Gbps。另外, Air Force 还进行了一些很有价值的激光通信实验,主要有预警机与战斗机之间的通信,其作用距离为 8~64 km,飞机飞行高度为 7 600~106 000 m,可同时与 50 个目标进行通信,传输码率均为 2 Mbps,误码率优于  $10^{-6}$ 。

另一个较为成功的激光通信实验是由国防部资助的海岛与海岛之间的通信,通信距离达到 240 km。该系统的研制单位为 Thermo Trex 公司。该公司还于 1996 年 12 月进行了飞机与地面站的光通信实验。飞机的飞行高度为 1 100 m,作用距离为 20~30 km,传输码率为 1 Gbps。信号光的发散角为 0.1 mrad,信标光的发散角为 2 mrad。

## 2 LCDS 系统介绍

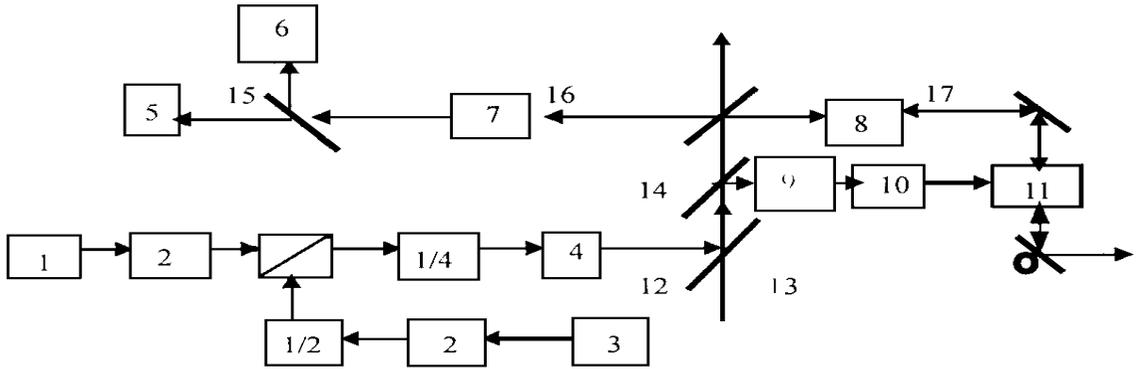
下面以 NASA-LCDS 为例,介绍其系统结构、性能及其关键技术和发展趋势。

LCDS 的研究目的有两个:1) 演示两个运动平台之间及 77 平台与地面站之间的高码率光通信连接;2) 论证在未来的卫星通信中,激光通信与 RF 通信相比,在性能、体积、重量、功耗及传输码率等方面的优势,该系统已处于试运行阶段<sup>[3]</sup>。

在 LCDS 研制的合作队伍中,领头的是 Bell Aerospace, 伙伴单位有 ThermoTrex (泰克) 公司, Comsat 实验室, Doedalian 技术公司, Motorola 公司和 Artin Maritta 公司,系统演示实验将于 1998 年进行。LCDS 系统应用于卫星链路所存在的问题主要有:1) 卫星链路网络中结点间远距离双工通信;2) 宽角度光学瞄准定位;3) 高速率高码率的通信;4) 在上行与下行通信链路中云雨的色散和衰减影响。

如图 1 所示为 1G bps 的 LEO-LEO 上行链路的演示系统,其他演示系统如 GEO-GEO, GEO-地面, GEO-空载飞船与此类似。该系统由 11 部分组成:1) 激光器部分。由 1.2W Al-GaAs MOPA 激光器、致冷器、散热片、激光控制和监控电路、偏置电路与光束整形光学部分组成;2) 光学元件部分。由偏振合束片,分束片、延迟光学系统、聚焦透镜、折射镜等组成;3) 捕获/跟踪探测部分。由 CCD (Charge Couple Device) 阵列探测器、带通滤波片、偏置及信号处理电路组成;4) 信号光探测部分。由 APD、带通滤波器及信号处理电路组成;5) 精扫部分。由快速驱动镜及安装台、位置传感器及相应电路组成;6) 万向支架控制部分。由椭圆镜片、保护板、方位罗盘、水平镜片、位置传感和前放、轴承、旋柄及垫圈组成;7) 发射/接收天线。直径为 10 cm 的离轴天线;8) 辅助电子部分。万向支架微动镜驱动和伺服电路、激光器驱动电路、探测处理电路、调制电路、控制器和飞行器车辆耦合电路等组成;9) 热控制部分。由辐射器、散热器、热敏电阻及控制电子组成;10) 机械结构部分。由支撑结构、双位置光束扩束选择器、光缆和连接器组成;11) 电源组件。由 APD 电源、飞行器初级和次级界面配置电源组成。该系统采用收发合一天线,通过收发光波长的不同加以区别。

接收机中的探测器有4个: CCD阵列探测器, Q-APD, Q-PIN及单元APD探测器。512×512像素的CCD探测器用于捕获, 其接收功率为5.2 pW, 视场角为0.5 μrad。Q-APD用于跟踪探测以及GEO范围内的低码率(10 Mbps DPPM调制方式)信号光的探测, 接收功率均值220 pW, 视场角为150 μrad, 调制频率为5 kHz, 另外Q-APD还要完成接收光路和发射光路的周期检查, 及轴线校准纠正。接收机约1%的光功率用Q-PIN光电管监控光形差校正镜, 该探测器也对传输光的捕获进行控制。单元APD用于高速率通信(1 Gbps)探测。



1. 860mm (MOPA) LD 2. 整形光学 3. 备用激光器(同1) 4. 成像光学  
5. APD探测器 6. 捕获/跟踪探测器 7. 830mm接收光带通滤波片 8. 延迟光学  
9. ND滤波片 10. QPIN 11. 同轴万向支架 12. 光行差校正镜 13. 万向支架平面镜  
14. 光行差校正分束片 15. 分束片 16. 分束片 17. 精扫镜

图1 系统原理方框图(无QAPD)

### 3 激光通信关键技术

激光通信的研究是一个包括光、机、电的综合研究课题。其主要关键技术有:

#### 3.1 高功率的光源及调制方法

发射端机的信号光波长和信标光波长都是860 nm, 接收端机的光波长和信标光波长都是830 nm。光源是输出功率大于1.2 W的, 用AlGaAs半导体激光泵浦的Nd:YAG固体激光器。最初, NASA对光源有两种选择: (1) 850 nm AlGaAs-MOPA半导体激光器; (2) 1550 nm In-GaAs激光器(带掺铒光纤放大器EDFA)。选择第一种光源的主要原因是许多器件的性能在860 nm较好, CCD探测器也与该波长兼容。信号光和信标光都采用该类型光源。信号光的调制方式有两种选择: (1) 采用(OOK)(On-Off Key)调制方式, 其优点是对激光器频率稳定性要求不严格, 缺点是接收机不可能达到量子极限; (2) 采用差分脉移(DPPM)键控方式调制, 其优点是可达到近量子极限, 但对激光器光源频率的稳定性要求较严格。NASA选择了第一种调制方式。

#### 3.2 近量子限接收机

近量子限高灵敏度接收机的发展是空-基光链路中一项很关键的技术, 因为近量子限探测器可减少了对发射功率的要求。获得近量子限的方法是在接收机中运用EDFA。由光电子理论可知: 量子限接收机与相干接收机相比对调整率的接收性能几乎一致。但近量子限接收机有三个优点: (1) 近量子限接收机的接收数据是对数字基带调制信号的探测, 而相干接收机则需要2~3倍的基带宽度, 这意味着在同等性能要求下, 近量子限探测可提高传输速率; (2) 近量子限接收机需要的泵浦激光光源比相干接收机需要的本振激光器的条件限制要弱得多, 不一定需要单模、锁频; (3) 在两种接收机中, 非理想元件都将影响接收机的性能, 但量子限接收机可通过光学增益得到补偿, 而相干接收机中则不能。

### 3.3 高速精确的跟瞄技术

跟瞄技术 (ATP) 是 LCDS 系统中极为关键的技术。用于 ATP 的探测器在上一部分已有介绍。信标光与信号光用同一激光器, 根据调制方式的不同加以区分, 信号光采用 OOK 调制方式或 DPPM 调制方式, 而信标光采用 CW 调制方式 (捕获光调制频率为 120 Hz, 跟踪光调制频率为 12 kHz)。信标光和信号光采用不同分光比, 信标光分配光功率多而且发散角大, 信号光分配光的功率少且发散角窄。

### 3.4 系统整体优化

LCDS 系统包含几个大的部分, 从研究计划上分: (1) 光通信演示 (OCD) 发展计划; (2) TOPSAT 任务研究; (3) 空一地演示系统研究; (4) 大气能见度监测计划。

系统测试可分为六个阶段: (1) 飞行器—地面站测试; (2) LEO—LEO 测试; (3) 飞行器—LEO 测试; (4) GEO—地面站测试; (5) 飞行器—GEO 测试; (6) 数据的色散与衰减测试。

如此巨大的工程必须过合理的规划设计, 对各个项目的研究顺序必须给予合理的安排, 才能获得最大成功。经各会员组研究决定按以上顺序进行测试和研究, 遵循的原则是从简单向复杂过渡, 从技术上最成熟的系统开始。

### 3.5 激光防护技术

激光在工程和科研中发挥着巨大的作用, 但它在操作不当时也会给人类带来灾害。保护科研人员的安全和实验基地居民的安全是首当其冲的。在望远镜孔径设置传输光的发散光, 用以使发射灵敏度小于近红外眼睛保护极限  $2 \text{ mW/cm}^2$ 。

## 4 NASA 与 LINCOLN 未来激光通信发展趋势

NASA 在 LCDS 系统研究中, 未来需解决的技术有:

- 1) 跟瞄及相关飞行器运动的影响 (RVM);
- 2) 精扫性能, 包括相关飞行器和空间飞行器运动的功率密度和传递函数;
- 3) CCD 阵列探测器和 APD 辐射硬件, 包括重量与形状的关系;
- 4) 接收天线反射体长度与太阳光、杂散光的关系;
- 5) 激光器终端的重量和结构与光学和光学材料的关系, 包括价格和进程;
- 6) 系统的可靠性, 备用器件及重量/体积/价格的影响。

Lincoln 实验室准备研制传输码率为 10 Gbps 的通信演示系统, 光源发射功率为 1 W, 具有体积小、保密性好、功耗小和传输码率高等优点, 但同时还存在许多技术难点。从发展历史来看, 激光通信才经历了几十年的研究历史, 而 RF 通信有着上百年甚至几百年的历史, 在技术上比较成熟, 这也许会成为光通信在卫星间应用的障碍。但激光通信本身就是意味着挑战, 在美国如此, 在其他各国也是如此。演示系统将充分显示激光通信的优点, 使人们看清激光通信的前途光明。美国的 LCDS 系统的目的也是如此。

当政府仍保持着对光通信研究和实验投资时, 商业化的需求将进一步刺激激光通信的发展。激光通信必须从其“发展阶段”向“实用阶段”过渡。一方面美国政府对光通信研究投资的相对减少, 另一方面商品化市场化的用户需求相对增加。LCDS 系统的演示将指明未来通信的前途, 从而争取更多的用户向激光通信研究投资, 加快激光通信“实用化”的步伐。

未来的商业需求将来自于通信革命, 据预测这场革命会超过微机的发展。正如 R. L. Jemmy 所言, “此时不用, 何时再用”<sup>[4]</sup>, 可见激光通信革命是紧迫的, 同时也带有一定的冒险性, 但相信前途一定会是十分光明的。

## 参 考 文 献

- 1 Jemmy R L. Overview of NASA R & D optical communications. SPIE, 1995, 2 381: 4~11
- 2 Roy S B. Overview of lasercom program at Lincoln laboratory. SPIE, 1995, 2 381: 2~3
- 3 Begley D L. Proposed near-term 1Gbps space laser communication demonstration system , SPIE. 1996, 2 699: 24~37
- 4 Freidell J E. Commercial opportunities, versus government programs, will likely drive the future of laser communication , SPIE. 1996, 2 699: 2~11

## Development and Status of Laser Communication in America

Pan Wen

(Department of Electronics, CITC 213002)

Hu Yu

(Institute of Applied Physics, UEST of China 610054)

**Abstract** In this paper, the development of the laser communications explored by NASA and MIT Lincoln Lab is described. The key techniques and key components units of the laser communication system are introduced for LCDS system. Its composite proceeding for optical, mechanical, electrical elements and the optimization of the whole system and the main performances are also discussed.

**Keywords** optical communications; American; laser communication demonstration system; laser intersatellite transmission experiment