

·综述·

## 空间激光通信技术及其发展 \*

胡渝 \*\* 刘华

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

**【摘要】** 描述了激光空间通信的特点、优势及其主要的关键技术, 简单介绍了国际上几个空间光通信发展的前沿国家在激光通信领域的发展动态, 以及我国在该领域的发展现状和已有基础。通过全面和极具说服力的分析, 提出了当今发展空间激光通信的必要性和可行性。

**关键词** 空间光通信; 同步卫星; 低轨卫星; 卫星通信; 捕获、跟踪、瞄准技术  
中图分类号 TN929.1

信息时代的发展需要建立传输速率快、信息量大、覆盖空间广的通信网络系统。采用波长极短的光波进行空间卫星的通信, 是实现高码率通信的最佳方案, 甚至被认为是唯一手段, 尤其是在空间卫星日益拥挤的今天, 这一点已经取得了通信领域许多专家学者的共识。实际上, 世界上各主要技术强国为了争夺空间光通信这一领域的技术优势, 已经投入大量的人力物力, 并取得了可喜的进展。

空间光通信系指利用激光束作为载体进行通信, 不仅包括深空、同步轨道、低轨道、中轨道卫星间的光通信, 还包括地面站的光通信, 有 GEO (Geosynchronous Earth Orbit—GEO) —GEO、GEO—LEO (Low—Earth Orbit—LEO)、LEO—LEO、LEO—地面等多种形式。空间机群指挥也是空间光通信的应用目标。图 1 所示为预期实现的空间—地面的激光通信系统的示意图。图 2、3 所示为美国 Thermo Trex 公司应用于军事方面的光通信计划。研究表明, 在战略导弹防御系统的大范围内, 可使用激光通信进行高速率联络, 小范围、低速率则采用射频通信。

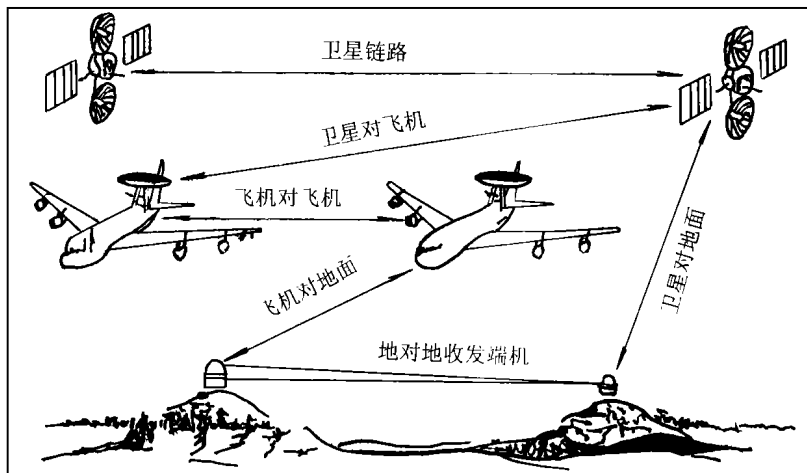


图 1 空间—地面激光通信系统示意图

相比于微波通信, 自由空间激光通信具有以下优势:

1) 发射光束窄, 方向性好。空间激光通信中, 激光光束的发散角通常都在毫弧度, 甚至微

1998年7月6日收稿

\* 电子部预研基金资助项目

\*\* 女 59岁 大学 教授 博士生导师

弧度量级, 它能较好地解决日益严重的卫星间的电磁波干扰和保密问题;

2) 天线尺寸小。由于光波波长短 (约零点几微米到几十微米), 在同样功能情况下, 光天线的尺寸比微波、毫米波通信天线尺寸要小许多;

3) 信息容量大。光波 (其相应光频率在  $10^{13} \sim 10^{17}$  Hz) 作为信息载体可传输达 10 Gbps 的数据码率, 甚至更高;

4) 功耗小, 体积小, 重量轻, 尤其适用于卫星通信;

5) 深空对于光波是一种无损耗、无干扰的良好传输介质, 传输同样速率与信息的装备, 光通信的性价比最高;

综上所述, 使用波长极短的光波进行空间卫星通信是进一步开发太空、利用广阔的宇宙空间, 达到高速率、大容量、大覆盖传输的最好方案。

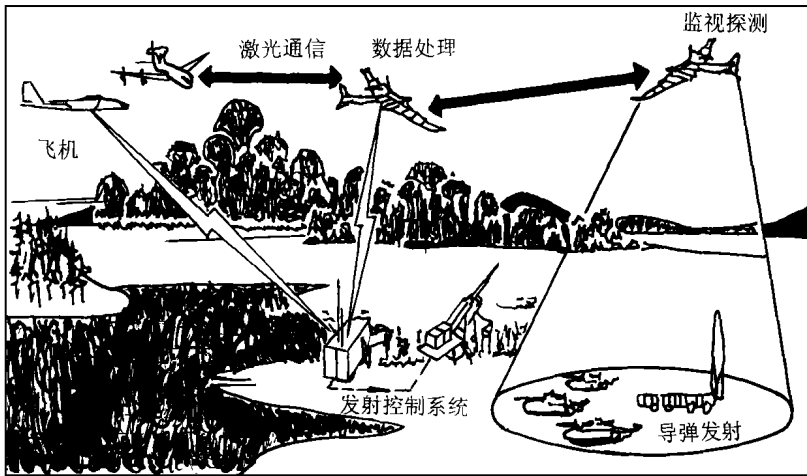


图 2 用于战略导弹防御系统的高速率激光通信网  
(大范围、高速率联络使用激光通信, 小范围、低速率联络使用射频通信)

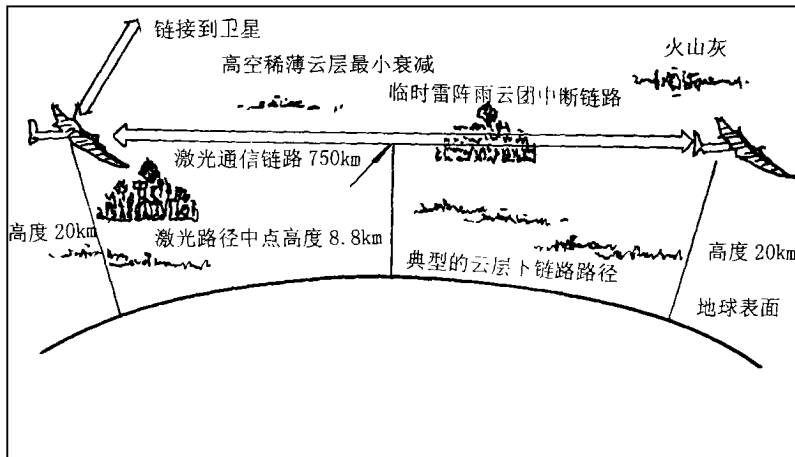


图 3 通过激光通信连接的无人驾驶飞机与云团的相对位置关系

## 1 空间光通信的特点及关键技术

空间光通信技术是覆盖多种领域的综合技术, 归纳起来有以下两个方面: 1) 远距离 (几千公里至几万公里) 的卫星间的光信号的发射与接收技术; 2) 远距离卫星间或空间站间的目标捕获与跟踪技术。

完成光的长距离传输会产生很大的光能量损失，接收的光信号往往十分微弱，此外，背景光（太阳、月亮、星体等）也将产生很强的干扰，这就大大增加了光信号的接收难度。因此，在较远的距离和较强背景光干扰的情况下，如何捕捉或跟踪空间目标，是一个光、机、电结合的精密综合技术，也是空间光通信的核心技术之一。

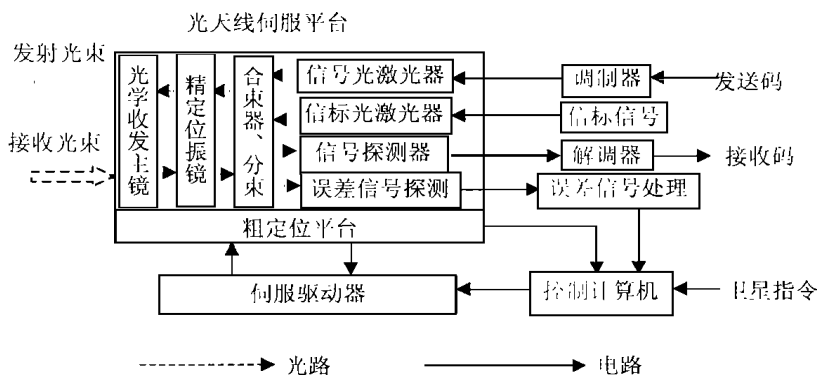


图 4 卫星激光通信系统主要部件原理方框图

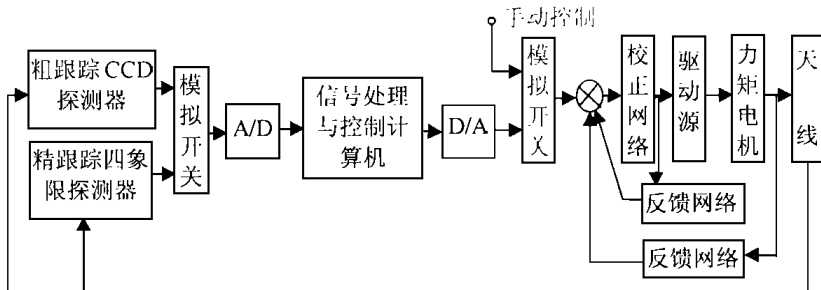


图 5 卫星光通信系统 ATP 单元原理方框图

图 4、5 为空间光通信系统的原理方框图。要完成空间光束的捕获、跟踪及瞄准，通常采用信标光来完成。信号的接收由信号光来完成。归纳起来，空间光通信主要包括以下五个方面的关键技术。

1) 高功率光源及高码率调制技术。在空间光通信系统中大多可采用半导体激光器或半导体泵浦的 YAG 固体激光器作为信号光和信标光光源，其工作波长为 0.8 ~ 1.5 μm 近红外波段。信标光源（采用单管或多个管芯阵列组合，以加大输出功率）要求能提供在几瓦量级的连续光或脉冲光，以便在大视场、高背景光干扰下，快速、精确地捕获和跟踪目标，通常信标光的调制频率为几十赫兹至几千赫兹或几千赫兹至几十千赫兹，以克服背景光的干扰。信号光源则选择输出功率为几十毫瓦的半导体激光器，但要求输出光束质量好，工作频率高（可达到几十兆赫至几十 GHz）。具体选择视需要而定。据报道，贝尔实验室已研制出调制频率高达 10 GHz 的光源。

2) 高灵敏度抗干扰的光信号接收技术。空间光通信系统中，光接收端机接收到的信号是十分微弱的，又加之在高背景噪声场的干扰情况下，会导致接收端  $S/N < 1$ 。为快速、精确地捕获目标和接收信号，通常采取两方面的措施：一是提高接收端机的灵敏度，达到 nW ~ pW 量级；其次是对所接收信号进行处理，在光信道上采用光窄带滤波器（干涉滤光片或原子滤光器等），以抑制背景杂散光的干扰，在电信道上则采用微弱信号检测与处理技术。

3) 精密、可靠、高增益的收、发天线。为完成系统的双向互逆跟踪，光通信系统均采用收、发合一天线，隔离度近 100% 的精密光机组件（又称万向支架）。由于半导体激光器光束质量一般较差，要求天线增益要高，另外，为适应空间系统，天线（包括主副镜，合束、分束滤光片等光学元件）总体结构要紧湊、轻巧、稳定可靠。国际上现有系统的天线口径一般为几厘

米至 25 厘米。

4) 快速、精确的捕获、跟踪和瞄准 (ATP—Acquisition, Tracking, Pointing) 技术。这是保证实现空间远距离光通信的必要核心技术。ATP 系统通常由以下两部分组成:

(1) 捕获 (粗跟踪) 系统。它是在较大视场范围内捕获目标, 捕获范围可达  $\pm 1^\circ \sim \pm 20^\circ$  或更大。通常采用阵列 CCD 来实现, 并与带通光滤波器、信号实时处理的伺服执行机构完成粗跟踪即目标的捕获。粗跟踪的视场角为几 mrad, 灵敏度约 10 pW, 跟踪精度为几十 mrad;

(2) 跟踪、瞄准 (精跟踪) 系统。该系统的功能是在完成了目标捕获后, 对目标进行瞄准和实时跟踪。通常采用四象限红外探测器 QD 或 Q—APD 高灵敏度位置传感器来实现, 并配以相应的电子学伺服控制系统。精跟踪要求视场角为几百  $\mu$ rad, 跟踪精度为几  $\mu$ rad, 跟踪灵敏度大约为几 nW。

5) 大气信道的研究。在地-地、地-空的激光通信系统的信号传输中, 涉及的大气信道是随机的。大气中的气体分子、水雾、雪、霾、气溶胶等粒子, 其几何尺寸与半导体激光波长相近甚至更小, 这就会引起光的吸收、散射, 特别是在强湍流的情况下, 光信号将受到严重干扰甚至脱靶。因此, 如何保证随机信道条件下系统的正常工作, 对大气信道的工程化研究是十分重要的。自适应光学技术可以较好地解决这一问题, 并已逐渐走向实用化。

此外, 完整的卫星间光通信系统还包括相应的机械支撑结构、热控制、辅助电子学等部分及系统整体优化等技术。这些技术的难度较大, 但也是十分重要的。总的来讲, 空间光通信是包含多项工程的交叉科学研究课题, 它不仅在空间要完成一系列重要的技术功能, 还需要有步骤地从地-地、地-空、空-空获取许多试验数据和技术考验。

值得提出的是, 空间光通信的发展是与高质量大功率半导体激光器、精密光学元件、高质量光滤波器件、高灵敏度光学探测器及快速、精密的光、机、电综合技术的研究和发展密不可分的。近几年来光电器件、激光技术、电子学技术的发展, 为空间光通信奠定了物质基础, 在人力、物力上也作了准备, 更由于信息社会发展的需要, 空间卫星间激光通信已是指日可待了。

## 2 国际上空间光通信发展动态

美国是世界上开展空间光通信最早的国家, 主要研究部门是美国宇航局 (NASA) 和美国空军。美国宇航局选择喷气推进实验室 (Jet Propulsion Lab—JPL) 进行卫星激光通信系统的研制, 1995 年完成了激光通信演示系统 (Laser Communication Demonstration Systems—LCDS), 数据率为 750 Mbps。该室目前正在进行激光通信演示系统 (Optical Communication demonstration—OCD) 研究, 主要进行航天飞机与地面间通信链路的性能演示, 传输速率为 100 Mbps。在工业界的资助下, JPL 还正在开发 500 Mbps 激光通信设备, 已完成分析和设计工作, 一些关键子系统也已研制成功, 并正在进行子系统的工程组装工作。JPL 目前还正在研制高功率 (3.5 W) Nd—YAG 激光器、窄带激光滤波器及地面和空间的激光卫星跟踪网络。此外, 美国宇航局还支持 JPL 进行其他卫星通信计划, 如实现图像功能的窄带激光滤波器以及地面和空间的激光卫星通信跟踪网络。

美国的战略导弹防御组织 (BMDO) 也正在积极进行空间激光通信的研制开发工作, 该工程由空军提供主要经费, 由 MIT 林肯实验室进行有关关键技术和系统技术的研究。现已研制出激光通信终端设备, 并进行了作用距离 42 km、信息率 1 Gbps、误码率  $P_e$  为  $10^{-6}$  的全天候跟瞄实验。林肯实验室还研制出了窄带并且具有空间搜索和跟踪功能、达到量子限的收发光端机, 该端机采用单模光纤进行内部连接。新近又研制出蓝绿光接收系统的快速原子谐振滤波器, 相关合成技术的光多孔排列装置, 宽角多址系统的码分多址技术, 高功率 (3.5 W) 半导体激光功率放大器, 1~2 Gbps 高速编码芯片, 掺铒光纤功放/发信机, 10 Gbps 高速调制器和具有近量子

极限性能的高速接收装置等。

美国还紧密依靠和支持一些学校与公司开展有关空间光通信的关键技术的研究。例如美国TT公司负责激光对目标卫星的跟踪与锁定,以及对太阳本底噪声有高抑制作用的超窄带光滤波器的研究。TT公司首次在跟瞄系统中应用原子滤光器(FADOF),实验表明,可以在大视场角下获得较高的信噪比,满足通信系统的快速捕捉及跟瞄的要求。此外,美国宇航局也鼓励工业界积极参与卫星激光通信技术的研究,并签定了有关合同,共同开发卫星激光通信市场,包括政府和未来个人通信网络的需求<sup>[1~9]</sup>。

欧洲航天署(ESA)于80年代后期开始确立了一项宏伟计划——SILEX(Semiconductor Laser Inter-Satellite Link Experiment)系统研制计划,该计划的目的是在两颗卫星间建立实验性的激光通信链路,其中高轨道(GEO)终端机置于ESA的ARTEMIS同步卫星上,低轨道(LEO)终端将载于法国的地球观测卫星SPOT4上。SILEX计划重点是研究卫星光通信光发射和接收端机等关键技术。该系统传输距离45 000 km,系统采用半导体激光器,波长范围为797~853 nm,信号光激光器平均输出功率为60 mW,光束发散角为10~16  $\mu$ rad。作为捕获、跟踪和瞄准的信标光激光器平均输出功率为700 mW,由19支700 mW的半导体激光器组成,发散角为750  $\mu$ rad。在接收端机中采用384×288 CCD阵列和14×14 CCD阵列分别作为光束的粗跟踪(捕获)和光束的精跟踪(跟踪、瞄准)探测器,其搜索范围为7  $\mu$ rad,跟踪定位精度<2  $\mu$ rad。系统所用天线的口径仅为25 cm。整个SILEX系统从SPOT4(LEO)至ARTEMIS(GEO)的通信码率和从ARTEMIS(GEO)至SPOT4(GEO)的码率分别为50 Mbps和2 Mbps。按计划SPOT4在1998年进入轨道,而ARTEMIS将于2000年由日本的H2A火箭发射升空。ESA与日本宇航发展局(NASDA)还于1993年达成协议,在载于ARTEMIS上的GEO端机与日本的LEO卫星OICETS上的光端机LUCE之间进行光通信实验<sup>[13~19]</sup>。

欧洲的空间光通信的发展基于欧洲各国(包括德国、法国、西班牙、奥地利等国)的合作,而各国又有自身的特点,尤其是德国。

德国空间光通信研究致力于发展高码率激光卫星空间系统,例如于1989年开始的空间固体激光通信系统(Solid State Laser Communications in Space—SOLACOS)。该计划主要包括两方面的工作,即建立一套完整的计算机仿真设计系统和一套实验室模拟演示系统。该系统的光源分别采用1 064 nm的YAG固体激光器和810 nm半导体激光器,两端机的通信码率分别为650 Mbps和10 Mbps。系统采用的实验平台可以模拟卫星的相对运动和抖动,并通过计算机仿真进行参数测试和系统的优化设计<sup>[10~12]</sup>。

日本的空间光通信的研究单位主要是日本航天局(NASDA)和邮电部通信研究实验室(Communication Research Lab—CRL)。日本航天局的主要系统是始于1985年的LUCE(Laser Utilizing Communication Equipment),它安装于OICETS卫星上,其目的是建立卫星间光链路。该系统将于1998年发射升空,并与欧洲航天署的ARTEMIS卫星上的SILEX系统进行光通信实验。目前NASDA正在进行LUCE的工程模型计划,各单元子系统的温度和机械冲击实验,以及关键元器件(LD、APD、CCD、QD等)的考核和可靠性检测。

日本邮电部的CRL从70年代初就开始空间光通信相关技术的研究工作,主要进行卫星间的空间光束跟踪技术研究,以及地—空激光通信技术的理论和实验研究,取得了满意的结果。CRL从1987年开始空间光通信设备(Laser Communication Equipment—LCE)的研制。该系统于1990年开始制作工程飞行模型,1993年全部完成,装载于1994年发射的ETS—VI技术实验卫星上,并在1994年12月和1996年7月期间完成了卫星间光通信的演示和评定实验。虽然该卫星没有被发射到原计划的同步轨道上,但几乎所有计划都基于地面阶段完成的新操作方法和硬件得到完成。值得一提的是,1995年6月日本用“菊花—6”(EST—VI)技术实验卫星与美

国的大气观测卫星成功地进行了双向激光数字通信, 在相距  $3.2 \times 10^4$  km 距离上成功地通话 8 min。同年 7 月 ETS-VI 又实现了卫星与地面站的双向光通信。同年 11 月至次年 5 月, ETS-VI/LCE 还与美国 JPL 成功地进行了卫星与地面站间的光通信实验, 在 37 800 km 距离上实现了传输码率为 1.024 Mbps、误码率达  $10^{-6}$  的通信。ETS-V/LCE 激光通信演示系统是自由空间激光通信技术的研究史上高度成功的范例之一, 大大加快了空间光通信的实用化进程, 并证明, 空间光通信计划的实现采用国际间有关技术的合作是十分重要和必要的。

表 1 世界各国空间光通信发展现状

| 国别  | 研究机构                              | 系统名称                                  |
|-----|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 美国  | NASA's Goddard Space Ctr          | 激光通信转发器 (LCT) 用于自由号空间站, 实现 GEO—LEO 联接 |
| 美国  | 林肯实验室 Lincoln Lab/ MIT            | 10 Gbps 高速调制及量子限接收                    |
| 日本  | 邮电省通信研究实验室 (CRTL)                 | 初步实现地面站—GEO 之通信, 制作 LCE               |
| 日本  | 日本空间发展局 (NASDA)                   | 计划实现 GEO—LEO, GEO—GEO (ILC)           |
| 日本  | 电信新技术研究所 (ATR)                    | 模拟太空环境, 提供地面测试条件                      |
| 欧洲  | 欧洲航天局 (ESA)                       | 实现 GEO—LEO 通信系统 SILEX                 |
| 英国  | 皇家空军 DMA 研究所 ESA                  | LEO 数据中继网络的实现                         |
| 加拿大 | MPB 技术公司                          | 用于星际连接的半导体高传输率外差系统                    |
| 法国  | 欧洲航天署                             | 空间通信天线设计                              |
| 意大利 | FIAR                              | 二极管泵浦 Nd: YAG 激光器相关探测技术               |
| 西班牙 | Universidad politecnica de Madrid | 模拟空间光通信实验                             |
| 德国  | RGKT                              | 使用 LD 泵浦 Nd: YGA 激光器的自由空间光通信实验装置      |
| 奥地利 | 维也纳技术大学 (TUM)                     | LD 泵浦 Nd: YGA 激光器的外差传输                |
| 荷兰  | ESA 电信局 (ESTEC)                   | 参与 SILEX 计划总体设计, 利用现有卫星进行环境测试         |

### 3 结束语

空间光通信与微波、毫米波通信相比是一种新兴的通信技术。但由于信息产业市场发展的需求及近年来迅速发展的空间卫星光通信技术, 一些难度大的关键技术 (空间光束跟瞄技术、高背景噪声抑制技术等) 已经得到较好的解决, 研究更加深入, 技术也更加成熟。因此, 国际上几个重要研究单位的系统已经接近实用化和产品化。从世界上空间光通信发展格局与特点来看有以下四个方面:

#### 1) 空间光通信技术与系统的日趋完善

随着空间光通信涉及的关键技术的解决, 系统实验已不限于地面, 有些技术与系统已进行了星上实验。例如, 日本的 ETS-VI 工程实验卫星和位于美国加州地面站之间激光双向通信实验, 从 1995 年 11 月一直持续到 1996 年 1 月中旬, 具体的实验是每隔三个夜晚进行大约 3 h 的通信实验 (当卫星位于近地点附近)。该实验还同时评估了地球的背景辐射和地球大气对卫星和地面上端机的跟瞄、通信的影响。

另外, 美国的 Thermo Trex 公司在美国国防部的支持下, 也较为成功地进行了海岛—海岛的陆海通信实验, 通信距离 150 km。该实验将光通信系统置于振动平台上, 验证了光通信系统用于飞机间通信的可能性, 同时也测试和分析了光通信受大气湍流影响的情况。

在日本的工程实验模型和林肯实验室的研究中, 已开始考虑火箭发射时的振动、过荷, 以及卫星在空间工作时的高温、低温和高真空、宇宙射线等因素对光通信系统的影响。

## 2) 卫星光通信体制和通信协议的建立已被列入议事日程

随着卫星光通信技术系统的实用化和产品化,证明可以实现卫星干线网络,并连接至下层卫星和地面站,同时,下层卫星和小型固定目标间的激光通信也被证明是可行的,随之而来的问题便是建立激光通信的体制和协议。日本提出围绕地球上下两层卫星,覆盖全球的全光通信网模型。另一种建议是在干燥晴朗的地区建立若干地面站和卫星进行激光通信,地面站和公用网以及地面站之间仍以光纤通信链路连接。

## 3) 卫星单元技术研究的进一步深化

卫星光通信的关键技术中以空间光束捕获跟瞄(ATP)技术最为重要,但目前较成熟的系统均采用机电式跟瞄控制,它存在响应速度受限及跟瞄系统存在惯性等缺点。德国空间研究所采用相干检测进行跟踪系统的性能分析和样机实验,并在实验室作了成功的模拟实验。这种系统体积小、灵敏度高,对背景噪声不敏感。该所还与罗马实验室合作,提出将液晶偏振光束用于跟瞄系统的可能性。这种新方案可以大大改善ATP系统的性能,更适用于空间卫星的工作。

背景辐射对激光通信系统的性能影响也是一个十分重要的问题。美国的Thermo Trex公司于1993年首次研制成功的原子滤光器可以很好地解决这个问题,它的光频带宽为 $0.01 \sim 0.001$  nm,而一般光滤波器带宽为nm量级。使用原子滤光器可将接收信号与噪声比提高 $10 \sim 100$ 倍,从而大大改善空间跟瞄精度和灵敏度,目前,TT公司采用原子滤光器的ATP系统已经接近实用化。美国的Astro Terra公司,也采用了原子滤光器技术,使跟瞄系统有效克服了背景辐射的影响。该公司研制的信标光系统的发射功率仅为50 mW,发散角达2 mrad,但系统可以在各种背景辐射环境条件下较好地完成跟瞄任务。

日本ATR光波微波通信研究实验室提出一种新的方案用于信标光的光束瞄准,即采用相控阵列光学天线来实现光束的高速偏转。该方案具有精度高、没有惯性、响应速度快等特点。

此外,采用多路并行光放大技术,可以避免采用高速率调制器和大功率发射光源,以使用同一个天线同时发射多路信号,从而实现多址。

## 4) 空间激光通信应用范围的扩大

早期的空间激光通信的主要的目标是LEO和GEO间的通信,随着卫星光通信关键技术的发展及信息传输的要求,目前的光通信应用范围已扩大到LEO与地面、高空飞机之间、高空飞机与地面、卫星作为地面之间的光中继点等。例如:日美进行的卫星地面间的光通信实验,对卫星与地面站间光通信的可行性及参数进行了评估;美国的贝尔航天技术公司进行了卫星作为地面站之间的光中继站的现场实验,卫星上有一面反射镜,通过跟瞄系统的精密控制,能够准确地将一个地面站发出的激光束反射到另一个地面站上。Thermo Trex公司的海岛之间通信实验的目标是用于军用飞机之间光通信。卫星通信技术中的ATP技术,经过改造,还可以用于运动目标间的通信。在现代化军事指挥系统,野战网的连接设备,空间机群指挥等系统中,也采用具有ATP技术的激光通信。

综上所述,可以归纳为:

- 1) 光通信的独特优点,决定了它在日益拥挤的空间卫星通信系统应用的必要性和重要性;
- 2) 目前空间光通信技术及系统发展的成熟决定了在卫星系统及空间站上采用光通信是可行和现实的;
- 3) 我国早已开始了空间光通信系统与单元技术的研究,为卫星间光通信技术研究奠定了基础;
- 4) 卫星空间光通信技术的发展和应用将为高空机群间指挥及高空飞机与地面甚至水下通信等领域采用光通信提供有益的依据。

不难看出,虽然目前空间光通信的研究基本上用于军事目的,但从国内外现状及其发展趋势

势来看, 卫星空间光通信的国防应用不是其唯一的目的, 它还将会在未来的移动通信民用市场上占有十分重要的地位。1995年, 国际光学工程学会(SPIE)的自由空间激光通信技术(Free-Space Laser communication Technology-FSLCT)年会上, 来自世界各地的科学家和工程技术专家们达成共识: 空间光通信技术是今后信息社会高码率通信的唯一解决方案, 它将直接关系到一个国家在即将面临的信息革命中的地位。发展和应用不仅为空间通信信息产业的发展创造了条件, 开拓了市场, 其关键技术的实现也为在未来移动通信、计算机多媒体通信等终端联网, 以及轻便无线光通信等民用和军用方面采用空间光通信技术奠定了基础。

综上所述, 全球大容量、多波段、立体覆盖的信息产业和通信技术的发展需求, 将必然为空间光通信开辟广阔的天地, 对从事空间光通信的科技和工程人员是机遇, 也更是挑战, 但相信通过共同的努力, 实现空间光通信是指日可待的。

本文在撰写中得到自由空间光通信课题组及潘文、尹道素、周宇等同志的大力支持, 在此致以谢意。

### 参 考 文 献

- 1 Begley D L. Proposed near-term 1Gbps space laser communication demonstrate system. SPIE, 1996, 2 669: 24~37
- 2 Freidell J E. Commercial opportunities Versus government programs will likely drive the future of laser communication SPIE 1995, 2 381: 2~3
- 3 Wilson K E, Page N, Biswas A *et al.* The lasercom test and evaluation station for flight terminal evaluation SPIE 1997, 2 990: 152~157
- 4 Jemmy R L. Overview of NASA R&D optical communications SPIE, 1995, 2 381: 4~11
- 5 Roy S B. Overview of lasercom program at Lincoln laboratory. SPIE, 1995, 2 381: 2~3
- 6 Begley D L. Proposed near-term 1Gbps space laser communication demonstration system SPIE, 1996, 2 699: 24~37
- 7 Freidell J E. Commercial opportunities versus government programs will likely drive the future of laser communication SPIE, 1996, 2 699: 2~11
- 8 Chan V, Arnold R. Results of 1 GBPS aircraft to ground lasercom validation demonstration SPIE, 1997, 2 990: 52~59
- 9 Yan Tsun-Yee, Jeganathan Muthu, Lesh James R. Progress on the development of the optical communications demonstrator. SPIE, 1997, 2 990: 94~101,
- 10 Pribil K, Flemmig J. SLACOS—system Implementation. Proc SPIE, 1996, 2 381: 142~150
- 11 Pribil K, Serbe C. SOLACOS YKS—an optical high data rate communication system for intersatellite link applications Proc SPIE, 1996, 2 381: 83~88
- 12 Pribil K, Flemmig J. SOLACOS high data rate satellite communication system verification program. Space Optics' 94, 1994
- 13 Oppenhauser Gotthard. SILEX program status—a major milestone is reached Proc SPIE, 1997, 2 990: 2~9
- 14 Laurent B, Planche G. SILEX overview after flight terminals campaign Proc SPIE, 1997, 2 990: 10~22
- 15 Popescu A F, Furch B. Status of the European developments for laser intersatellite communications. Proc SPIE, 1993, 1 866: 10~20
- 16 Nielsen Toni Tolder. Pointing, acquisition and tracking system for the free space laser communication system. SILEX Proc SPIE, 1996, 2 381: 194~205
- 17 Cockshott Robert, Purll David. SILEX acquisition and tracking sensors Proc SPIE, 1996, 2 381: 206



~ 214

- 18 Renard M, Dobie P, Gollier J *et al.* Optical telecommunications—performance of the qualification model SILEX Beacon. Proc SPIE, 1996, 2 381: 289 ~ 300
- 19 Jonas Reginald P. Optical pupil relay design for SILEX; optimizing wavefront error and transmit/ receive beams co—alignment. Proc. SPIE, 1992, 1 635: 99~108
- 20 Araki T, Nakamori S, Hisada Y *et al.* Present and future of optical intersatellite communication research at the national space development agency of Japan (NASDA). SPIE, 1994, 2 123: 2~13
- 21 Nakagawa K, Yamamoto A. Preliminary design of laser utilizing communications equipment (LUCE) installed on optical inter—orbit communications engineering test satellite (OICETS). SPIE, 1995, 2 381: 14~25
- 22 Arimoto Y, Toyoshima M, Toyoda M *et al.* Preliminary result on laser communication experiment using (ETS—VI). SPIE, 1995, 2 381: 151~159
- 23 Shikatani M, Yoshikado S, Arimoto Y *et al.* Optical intersatellite link experiment between the earth station and ETS—VI. SPIE, 1990, 1 218: 2~12
- 24 Toshiyachō Komukai, Kawasaki Saiwaku, Ikebecho *et al.* Performance evaluation of laser communication equipment onboard the ETS—VI satellite. SPIE, 1996, 2 699: 52~60
- 25 Toyoda M, Toyoshima M, Takahashi T *et al.* Ground to ETS—VI narrow laser beam transmission. SPIE, 1996, 2 699: 71~80
- 26 Toyoshima M, Fukazawa T, Toyoda M *et al.* Measurements of background noise from the earth surface using the ETS—VI/LCE. SPIE, 1996, 2 699: 93~102
- 27 Jeganathan M, Toyoshima M *et al.* Data analysis results from the GOLD experiments. SPIE, 1997, 2 990: 70~81
- 28 Araki K, Toyoshima M, Takahashi T *et al.* Experimental operations of laser communication equipment on board ETS—VI satellite. SPIE, 1997, 2 990: 264~275

## Technology and Development of Free—space Laser Communication

Hu Yu     Liu Hua

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

**Abstract** In this paper, the characteristics, advantages and key technologies of free—space laser communication are described. The status on the field of free—space laser communications on several main countries are introduced, as well as the development and basement of lasercom in our country. Through wholly and strong persuading analysis, it is shown that free—space developing lasercom is in demand, and its application is also the possibility.

**Key words** free—space laser communication; geosynchronous earth orbit; low—earth orbit; inter—satellite communication; acquisition tracking pointing