

空间光通信系统、技术、现状及展望

作者: 季伟 赵长明 陈淑芬 北京理工大学光电工程系 来源: 互联网 发布时间: 2006-11-16

空间光通信曾掀起研究的热潮,但自从70年代光纤通信的迅速发展以及大气光通信受到天气的严重影响,使得一度辉煌的空间光通信研究陷入低谷。但随着对超稳激光器、新型光束控制器、高灵敏度和高数据率接收器和适合空间应用的先进通信电子设备的研究基本成熟,空间光通信又成为下一代光通信的发展方向之一。在过去10年内,对卫星轨道之间、空对地、地对空、地对地等各种形式光通信系统的研究在世界各发达国家中广泛进行,一些先进国家已经推出空间光通信的一些产品,如美国朗讯的2.5×4Gbps波分复用系统,日本佳能公司的无线光通信系统等。我国通信事业的迅速发展也对空间光通信提出了要求。

星际空间光通信

随着国家信息基础设施NII(National Information Infrastructure)和全球信息基础设施GII(Global Information Infrastructure)的提出,社会对通信的要求越来越高。而目前卫星通信所采用的微波通信技术因受到体积、重量、功耗等方面的严格限制不能无限制地提高传输速率与容量。在卫星通信日益拥挤的今天,光波段通信有极大的潜力,是实现高速大容量通信的最佳方案,甚至可以说是唯一的解决方案。这已经是通信领域许多专家的共识。实际上,世界各主要技术强国为了争夺空间激光通信这一领域的技术优势,已经投入了大量的人力和物力,并取得了可喜的进展。星际空间激光通信包括深空、同步轨道(GEO)、中轨道(MEO)、低轨道(LEO)卫星间、地面站之间的激光通信,还包括卫星与地面站之间的激光通信。在卫星通信中,使用激光与使用微波相比,具有不少独特的优点:

1、与微波相比,光波频率高3~5个数量级,频率资源丰富得多,可以获得高得多的数据传输速率,能满足大容量传输的要求,并为实现空间多任务提供了时间保障。

2、激光波束比微波波束的发散角小3~5个数量级,这将大大增加接收端的电磁波能量密度,有利于终端减轻重量、减少体积,降低功耗。

3、保密和抗干扰性能极好,这对军事应用十分有利。

地面无线光通信

近几年来,人们对宽带多媒体业务的需求促进了整个通信网络的宽带化发展,光波是宽带信息的最理想载体,光纤通信的迅速发展已证明了这一点。与光纤通信的应用领域有所不同,光无线通信适合于宽带无线接入。近几年来,随着计算机网络宽带化的发展,提出了用光无线接入技术来解决宽带接入中‘最后一公里’的问题。与无线电相比,光的频率高、能量集中、方向性强、可用频谱宽,无需向频谱管理部门申请频率使用许可证,并可防止通信相互干扰和窃听。与光纤通信相比,它有造价低、施工简便、迅速等优势。无线光通信技术适合于下列应用场合:

- * 在有强电磁干扰的场所；
- * 一些不宜布线的场所，比如在具有纪念意义的古建筑，危险性大的工厂、车间；
- * 在走线成本高、施工难度大或经市政部门审批困难的场合，如马路两侧建筑物之间、不易架桥的河两岸之间等；
- * 一些临时性的场所，如展览厅、短期租用的商务办公室或临时野外工作环境；
- * 一些具有移动性的场合，如使用便携式电脑的交易大厅等。

具体系统有：

点到点系统

室外点到点系统可使用高功率发射器来获得足够的功率预算储备。对于距离在视距范围内的情况，如相邻两建筑物间的通信，空气损耗比较低，并且发射器的安装和校准相对于长距离通信要容易，无需自动校准和跟踪装置，所以复杂程度和价格都大大降低。室内点到点系统与室外的的工作原理相同，但设计却有所不同。首先它们必须保证对人眼的安全，LED发射器为最佳选择，但传输能力限制在几Mb/s。另一方面，室内系统的工作环境比室外的稳定，无需应付恶劣天气情况的装置，因此造价更低。此外，通信距离在1m以内的超短距离点到点光无线系统近几年得到了很大的开发和应用。这种系统主要用于笔记本电脑、打印机、移动电话等设备的连接。

光无绳系统

光无绳系统能使光覆盖一定范围，就像无线通信中的“小区”。进入“小区”内的用户都能得到光无绳基站的服务。在小区直径为10m左右的系统，可以在许多室内公共场所广泛使用。这种系统可用于对带宽需求高的场合，如金融中心和交易所。

散射系统

这种系统使用散射通道，克服了视距通道的缺点。它的发射角大，让光从墙壁、天花板、门和家具表面反射。接收器的探测角很宽，能一并接收不同路径来的光；这样即使视距通道被挡，只要存在一条散射通道，就可进行通信，并且支持一定范围内的用户移动。

系统组成及关键技术

空间光通信系统包括发射、接收和ATP(捕获、追踪和瞄准)三种功能的光学系统。发射部分的主要组成：1、信号输入和处理电路；2、半导体激光器发射光源及其驱动电源；3、发射光学系统。接收部分的主要组成：1、接收光学系统；2、光电探测器；3、信号处理和输出电路。ATP伺服控制系统中包括有信号模/数转换与处理、控制计算机与接口、信号数/模转换与处理、控制校正网络、伺服驱动单元、反馈控制机构和伺服电机组等部分组成。归纳起来，空间光通信主要包括以下五个方面的关键技术：

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Nd: YAG固体激光器作为信号光和信标光源,其工作波长满足大气传输低损耗窗口,即0.8-1.5 μm 的近红外波段。用于ATP系统的信标光源(采用单管或多管阵列组合,以加大输出功率)要求能提供数瓦连续光或脉冲光,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。用于数据传输的光信号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。据报道,贝尔实验室已研制出调制频率高达10GHz的光源。此外激光器的热稳定性和频率稳定性及工作寿命等性能都是需要考虑的因素。如采用直接调制方式,还需考虑频率啁啾、相位调制及电光延迟和张弛延迟等效应。

精密、可靠的光束控制技术。在发射端,由于半导体激光器光束质量一般较差、发散角大,而且水平和垂直两个方向发散角不相等,因此必须进行准直,先将发散角压缩到毫弧度级,然后再通过发射望远镜进一步准直成微弧度级光束。在接收端,接收天线的作用是将空间传播的光场收集并汇聚到探测器表面。发射和接收天线的效率及接收天线的口径都对系统的接收光功率有重要影响。国际上现有系统的天线口径一般为几厘米至25厘米之间。

高灵敏度和高抗干扰性的光信号接收技术。空间光通信系统中,光接收机接收到的信号是十分微弱的,加上高背景噪声场的干扰,会导致接收端 $S/N < 1$ 。为快速、精确地捕获目标和接收信号,通常采取的措施有:一是提高接收端机的灵敏度,达到 $\text{nW} \sim \text{pW}$ 量级。这就需要选择量子效率高、灵敏度好、响应速率快、噪声小的新型光电探测器件;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,如吸收滤光片、干涉滤光片和新型的原子共振滤光器等,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。

快速、精确的捕获、跟踪和瞄准技术(ATP—Acquisition, Tracking, Pointing)技术。这是保证实现空间远距离光通信尤其是星际间光通信的必要核心技术。ATP系统通常由两部分组成:(1)捕获(粗跟踪)系统。捕获范围可达 $\pm 1^\circ - \pm 20^\circ$ 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。(2)跟踪、瞄准(精跟踪)系统。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 μrad ,跟踪精度为 μrad ,跟踪灵敏度大约为几 nW 。

大气信道。在地对地、地对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。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。

另外选择适当的调制方式、编码方式及解调方式也会对通信系统的性能有很大的影响。目前空间光通信系统多采用IM-DD(强度调制、直接检测)方式,主要考虑系统能比较简单的实现这种方式。采用的编码方式多为开关键控(OOK)编码和曼彻斯特编码方式。在实际应用中,采用曼彻斯特编码方式的接收误码率通常比采用OOK编码要低。

对于完整的星际间光通信系统还包括相应的机械支撑结构、热控制、辅助电子设备等部分及系统整体优化等技术。这些技术的难度较大,但十分重要。

发展现状

在地面无线光通信方面,1998年2月,朗讯公司制造了一套10Gb/s的无线光通信实验系统。由于在大气中传输,通信性能受通信距离、气候条件等因素限制。由于大气的吸收与散射,通信距离达到5km已经算相当长了,如果大于5km,要提高探测器的灵敏度,保持光束的准直性,同时要考虑建筑物的热胀冷缩影响光束的准直性。AstroTerra公司在该系统中加入自动跟踪系统以修正建筑物的影响,采用内置相机获得方向的变化量,反馈给电子执行单元,以保持光束的准直性。1998

年8月，两公司对无线光通信系统的原型机进行了测试：链路距离2.5km，数据率2.5Gb/s，是无线光通信系统新的最高记录。并于2000年夏季推出4波长波分复用10Gb/s，传输距离达5km的商用系统。表1是世界各公司推出的地面无线光通信产品。

在星际光通信系统方面，美国是最早进行星际光通信研究的国家。从80年代中期到1994年间，美国空军支持麻省理工学院林肯实验室建起了高速星间激光通信实验装置LITE(Laser InterSatellite Transmission Experiment)。该实验采用了30mW半导体激光器，8英寸口径的望远系统，数据率为220Mb/s，模拟星际间通信距离达4万公里。另外由弹道导弹防御组织与空间和导弹防御司令部共同资助的STRV2星地激光通信计划的两个地面实验终端已加工装配成功。计划在低轨道卫星与固定地面站间建立光链路，斜距达2000km，数据率达1Gb/s。

欧洲方面，欧洲空间局为连接低轨道星与同步轨道星，进行了轨道间激光通信实验，已经制造好两个卫星终端设备。一个名为PASTEL终端，已经搭载在法国地球观测卫星SPOT4(1998年3月22日发射成功)上，是第一个在轨光学终端；另一个名为OPALE终端，搭载在欧洲先进数据中继技术卫星ARTEMIS上(2000年第一季度发射)。OPALE终端采用的波长为800-850nm，通信光功率不超过60mW，信标捕获与链路建立过程中，信标光功率小于500mW。

日本从80年代中期就开始星间激光通信的研究工作，主要有邮政省的通信研究实验室(CRL)、高级长途通信研究所(ATR)的光学及无线电研究室进行此方面的研究工作。ATR主要对光束控制、调制等关键技术进行研究和论证，并建立了一套自由空间模拟装置进行地面模拟实验。CRL主要进行地面站与工程实验卫星ETS-VI之间的激光通信实验，以试验星间链路要求的几种基本功能，如高精度跟踪、双向链路光通信、高精度高度测量等，并于1995年7月成功地进行了ETS-VI与地面站间的光通信实验，这是世界上首次成功进行的星地间激光通信实验，该实验的成功证明了星地间激光链路的可行性。

发展趋势与展望

随着通信需求和设备技术的进步，在卫星链路中，空间光通信系统已开始进入实用化研究阶段。从文献报道可以看到近年来几个发展趋势和特点：

空间激光通信技术的可行性问题已经解决，虽然至今尚未真正实现星际间正式通信，但是原先顾虑的发射功率小、接收灵敏度低、捕获、瞄准要求高、热和机械稳定性要求高等关键技术近几年已取得明显进展。相信不久的将来，激光通信将取代微波通信成为星际间通信的主要手段。

空间激光通信已开始向民用方向发展，它的商业应用价值已被看好，有人甚至提出，激光通信在性能价格比上可以同海底光缆通信开展竞争。

空间激光通信系统原来多采用800nm波段光源，这是由于此波段的激光器、接收器体积小、重量轻、效率高，比较成熟、有成品，同时该波段的窄线宽滤波器也有比较成熟的铯原子滤波器。近年来，各国纷纷把光纤通信的成熟技术和器件引入卫星激光通信，相应地工作波段也向1550nm波段发展，波分复用技术也已经应用于空间激光通信。90年代以来国外的空间激光通信研究已从概念和部件技术研究转入系统研究阶段，目前将进入应用性能测试阶段。

在地面空间光通信的应用中，它将作为一个主要的手段进入本地宽带接入市场，特别是通常没有光纤连接的中小企业。保守地估算，这一市场到2005年将增长到几亿或十几亿美元，也有人预测能达到20亿。现在普遍认为，一、二年内这一技术就会形成有规模的市场。

无线电系统和光无线系统在许多方面可互为补充，光无线系统能提供小区域的高速连接，而无线电系统能提供大区域内低速通信。各种系统的无缝连接将能使用户得到更方便的服务。比如，在办公楼的办公桌附近，用户用便携式电脑通过10Mb/s的光无绳系统或IrDA系统接入网络，当他在办公楼里漫游时，他的电脑通过40kb/s的楼内微波链路继续与网络连接，而当离开办公楼时，则转用GSM网提供的9.6kb/s的链路进行通信。另外微波系统还可作为光无线系统的备用设备以克服空间光通信受天气因素影响大的缺点。当天气情况过于恶劣以至无法进行光通信时，自动启动微波通信系统，大大提高了空间光通信系统的可靠性。