



基于偏振移位键控的 大气激光通信关键技术

刘 智 赵义武 刘 丹 著
方韩韩 倪小龙 陶宗慧

Research on Key Technology of Laser
Communication Based on Polarization Shift Keying



科学出版社

基于偏振移位键控的大气激光 通信关键技术

Research on Key Technology of Laser Communication
Based on Polarization Shift Keying

刘 智 赵义武 刘 丹 著
方韩韩 倪小龙 陶宗慧



科学出版社

北 京

内 容 简 介

偏振特性被认为是激光在大气中传输最为稳定的特征,偏振移位键控(Polarization Shift Keying, PolSK)技术属于偏振调制,是一种新兴的无线光通信调制技术,它是利用偏振光作为载波,把信息编码到它的偏振态上,是一种无阈值调制方式,对大气信道造成的影响有较强的抑制作用。因此,对基于偏振移位键控的偏振编码技术的研究将为提高空间光通信系统综合性能提供新方法与新途径。

本书对基于偏振移位键控的大气激光通信系统的原理及关键技术进行了深入研究与探讨。全书共分六个部分,分别系统介绍了空间激光通信技术、激光偏振调制技术的发展现状、基于偏振移位键控的大气激光通信系统组成和工作原理、激光信号偏振移位键控调制技术的原理和实现方法、大气信道中 GSM 光束的偏振传输特性、基于圆偏振移位键控的大气激光通信系统半实物仿真系统构建与实验结果分析、基于液晶可变相位延迟器的偏振激光信号源以及相干度精确可控的部分相关激光光源的原理和实现方法。

本书可供从事激光技术、空间激光通信技术的科技工作者研究参考,也可供光学工程、信息与通信工程领域的技术人员、大专院校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于偏振移位键控的大气激光通信关键技术/刘智等著. —北京:科学出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-03-056950-9

I. ①基… II. ①刘… III. ①激光通信 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 049729 号

责任编辑:胡庆家 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 3 月第一次印刷 印张:10 1/4

字数:200 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自由空间光通信是近年来新兴的一种通信技术,它结合了光纤通信与微波通信的双重优点,既满足通信容量大、速率高的要求,又免去铺设光纤的复杂过程,被广泛应用于各个研究领域。但是,人们发现激光信号在大气信道中传输时,受大气多重效应影响,光束质量大大降低,严重影响通信系统性能。因此,降低激光信号受大气信道影响的有效方法成为近年来的研究热点。

偏振特性被认为是激光在大气中传输最为稳定的特征,偏振移位键控(Polarization Shift Keying, PolSK)技术属于偏振调制技术,是一种新兴的无线光通信调制技术,它是利用偏振光作为载波,把信息编码到它的偏振态上,是一种无阈值调制方式,对大气信道造成的影响有较强的抑制作用。因此,对基于偏振移位键控的偏振编码技术的研究将为提高空间光通信系统综合性能提供新方法与新途径。

本书对基于偏振移位键控的大气激光通信系统的原理及关键技术进行了深入研究及探讨,主要内容包括六个部分。

(1) 在国内外相关研究成果的基础上,针对空间激光通信应用,引入偏振移位键控技术,系统地研究了基于偏振移位键控的大气激光通信系统组成及工作原理;并对圆偏振移位键控(Circle Polarization Shift Keying, CPolSK)调制信号应用于大气激光通信系统中所具有的独特优势进行具体分析:①采用 CPolSK 的大气激光通信系统收发端无需坐标轴对准;②CPolSK 调制信号具有较强的抗干扰能力。在此基础上,对目前基于偏振移位键控的大气激光通信中关键技术进行归纳和总结:①高速率偏振调制技术;②具有高精度、高稳定度输出光束偏振特性的偏振激光源;③保偏光功率放大技术;④大气信道中激光偏振传输特性研究;⑤光学系统的偏振像差分析;⑥高效率的空间-光纤耦合技术;⑦高灵敏度、抗干扰性强的偏振信号接收技术。

(2) 在偏振光学的基础上,引出激光偏振特性的斯托克斯参量表示法,并对偏振移位键控调制原理及多电平偏振移位键控进行分析,得出 CPolSK 调制信号的抗干扰能力最强。在此基础上,将偏振移位键控技术与目前空间激光通信系统中广泛采用的几种强度调制(开关键控调制、脉冲位置调制、差分脉冲位置调制、数字脉冲间隔调制、双头脉冲间隔调制等)技术的编码性能进行比较研究,结果表明,CPolSK 调制信号拥有最小的带宽需求及最大的传输容量。在相同接收信噪比条件下,更有最小的误时隙率和误包率。最后,对基于铌酸锂晶体的偏振调制技术原理及过程进行具体分析。

(3) 对影响激光器输出光束偏振特性的因素进行分析和研究,并通过实际测试,分析偏振激光源输出光束偏振特性的改变对 CPolSK 系统通信性能的影响。在此基础上,设计了基于液晶可变相位延迟器的偏振激光源,对其系统组成、工作原理及系统的工作性能进行分析与测试,并对设计基于液晶可变相位延迟器的偏振激光源所涉及的核心技术进行深入分析,主要包括两方面的核心技术:偏振参数控制技术与偏振参数测量技术。在分析液晶的电控双折射效应基础上,对基于液晶的激光偏振参数控制技术进行理论研究;从斯托克斯参量出发,研究傅里叶分析法激光偏振参数测量技术,对斯托克斯参量测量过程进行详细推导。

(4) 在分析大气信道湍流效应对激光信号传输的影响的基础上,结合相干性、偏振性统一理论,给出高斯-谢尔光束在湍流环境中的传输公式,并对光束在湍流环境传输过程中其偏振特性变化情况进行数值仿真研究,结果表明,激光偏振度会随着传输距离的增加而发生改变,但当传输距离足够长时,其偏振度总会恢复到与其初始值相近的状态;进一步结合湍流模拟装置,对湍流环境下激光偏振传输特性进行半实物仿真研究,通过对半实物仿真的采样数据进行统计处理得出:在湍流环境模拟参数为 $\Delta T=200^{\circ}\text{C}$ (等效于大气相干长度 $r_0=0.68\text{cm}$) 条件下,线偏振光的偏振参数波动情况为:方位角 3.627% ,椭圆率 3.436% ,偏振度 1.714% ;圆偏振光偏振参数波动情况为:方位角 1.953% ,椭圆率 1.632% ,偏振度 1.214% 。可以看出,线偏振光和圆偏振光经过湍流环境传输之后,均会发生一定程度的退偏现象。但在相同传输条件下,相对线偏振光来说,圆偏振光的退偏效果较弱,可以很好地保持原有旋向继续传输,且随着湍流强度的提高没有明显变化。

(5) 引入部分相干光的基本概念,从空间-时间域和空间-频率域两方面介绍普遍的相干理论。重点研究高斯-谢尔模型(GSM)光束,在相干性和偏振性统一理论的基础上,对相干度与偏振度的变化进行理论分析和数值仿真,为实验测试提供理论依据。考虑大气湍流效应的影响,推导并给出在湍流环境中 GSM 光束的传输公式。设计激光传输特性实验系统,在实验室内模拟湍流强度不同的大气信道,实现激光无线传输半仿真实验。结合理论分析结果,具体分析 GSM 光束传输特性的演变规律。通过对传输特性实验的采样数据进行统计处理得出结论:在 $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ (等效于大气相干长度 $r_0=1.4\text{cm}$) 和 $\Delta T=200^{\circ}\text{C}$ (等效于大气相干长度 $r_0=0.68\text{cm}$) 的传输条件下,部分相干光在保持偏振度上较完全相干光更具优势。

(6) 利用 OptiSystem 仿真软件,对平衡探测的偏振移位键控激光通信系统接收性能及高速率通信系统进行仿真研究,得出偏振移位键控信号可以在更小的传输功率条件下实现较高的通信效率;在软件仿真的基础上,结合大气湍流模拟装置,进一步开展对基于偏振移位键控的大气激光通信系统半实物仿真研究。测试结果表明,在湍流环境模拟参数为 $\Delta T=200^{\circ}\text{C}$ (等效于大气相干长度 $r_0=0.68\text{cm}$) 条件下,通信速率 100Mbit/s ,系统接收端最小可探测功率可达 -23dBm ,系统连

续工作 6 小时的功率波动约为 9%,说明调制信号具有良好的功率均衡性。

基于偏振移位键控的大气激光通信是极具前景的一种激光通信方式。日前该领域的研究工作主要集中在理论分析、方法论证和仿真研究的阶段,距离实际应用还有很大差距。因此,对基于偏振移位键控的大气激光通信关键技术的探索和研究是十分必要的。

本书是在长春理工大学大气激光通信传输特性及应用研究团队承担的国家自然科学基金项目“大气激光通信系统中偏振特性及其应用技术研究”(编号:60677009)和吉林省科技厅重点科技攻关项目“基于偏振移位键控的大气激光通信关键技术研究”(编号:20120365)课题研究成果的基础上进一步修改补充完善而成的,是团队全体成员辛勤工作所取得结果的概括和总结,更是他们的心血和结晶。

长春理工大学大气激光通信传输特性及应用研究团队是在国家“863”“十五”重点项目研究过程中组建的新技术研究组基础上发展壮大的,依托长春理工大学空间光电技术研究所开展工作,拥有良好的科研环境和浓郁的学术氛围,在研究过程中也得到了长春理工大学空间光电技术研究所各位领导、老师和研究生们的大力支持和帮助。团队建立初期对激光的重要特性参数之一的偏振特性及其在大气激光通信系统中的应用方法进行了探索,并进而对大气信道对激光通信系统影响的自适应校正技术开展了研究,逐步认识到大气信道环境对激光传输过程影响决定大气激光通信系统性能的重要性,并开始系统地开展激光在复杂信道环境中传输特性及其对激光通信系统工作性能影响的具体研究工作,是国内较早开展激光在大气中传输特性、大气对激光通信系统影响与自适应校正技术研究的研究团队之一。

本团队在复杂大气信道和海水信道环境的模拟技术、大气激光通信系统理论与仿真测试技术、激光在大气和海水信道中传输特性理论研究和性能测试技术研究方面处于国内领先地位,先后承担了国防“863”课题、国家自然科学基金课题、国家自然科学基金重点课题、国防科工局重点基础科研课题、吉林省科技厅重点科技攻关课题等 20 余项国家及省部级课题的研究工作,在激光通信系统和激光应用装备的设计、装调和性能测试,激光在复杂信道中传输特性基础研究方面积累了大量理论分析成果和宝贵的实测数据,这些都为本书的顺利出版提供了重要的帮助。

在课题的研究和本书的编校过程中,付强副教授、陈纯毅教授等和王璞瑶、赵怡春、陈曦、宋卢军等研究生同学给予了课题组大力支持与帮助,还要特别感谢的是为本书内容修改完善和校对过程中付出辛勤劳动的刘艺和齐冀同学。在此向以上老师和同学一并致以最诚挚的谢意。

在本书的写作过程中,参考了大量的文献资料,其中大部分已经在书中作了注

明,但也有少量资料因很难查找出处而未能一一标注,在此向作者表示谢意和歉意。

由于作者水平有限,时间仓促,书中难免有欠缺和不足之处,恳请广大读者予以批评指正。

作 者

2017年8月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的与意义	2
1.3 国内外研究现状	3
1.3.1 空间激光通信技术研究与应用概况	3
1.3.2 激光偏振调制技术相关研究与国外研究概况	21
1.3.3 激光偏振调制技术相关研究与国内研究概况	27
1.4 主要内容及结构安排	31
第 2 章 基于偏振移位键控的大气激光通信系统原理	35
2.1 引言	35
2.2 基于偏振移位键控的大气激光通信系统的组成	36
2.3 CPolSK 调制在大气激光通信系统中的优势	39
2.3.1 通信系统收发端无需坐标轴对准	39
2.3.2 调制信号抗干扰性强	42
2.4 基于 PolSK 的大气激光通信系统的关键技术	46
2.5 本章小结	49
第 3 章 激光信号偏振移位键控调制技术	51
3.1 引言	51
3.2 激光偏振特性描述	52
3.2.1 光波偏振态	52
3.2.2 光波偏振度	54
3.3 偏振移位键控技术原理	55
3.4 大气激光通信系统中的强度调制与偏振调制性能比较	57
3.4.1 各种激光强度调制方式介绍	57
3.4.2 调制方式性能分析	59
3.5 基于铌酸锂晶体的偏振态调制技术	65
3.6 本章小结	69
第 4 章 大气信道中 GSM 光束的偏振传输特性	70
4.1 引言	70

4.2 大气信道的湍流效应·····	71
4.2.1 大气湍流的形成·····	71
4.2.2 大气折射率结构常数·····	74
4.2.3 大气折射率起伏功率谱密度·····	76
4.3 大气湍流对激光传输的影响·····	77
4.4 部分相干、部分偏振的 GSM 光束偏振传输特性研究·····	78
4.4.1 相干性和偏振性统一理论·····	78
4.4.2 GSM 光束在湍流环境中的传输公式·····	79
4.4.3 GSM 光束在湍流环境传输的偏振特性研究·····	82
4.5 湍流环境激光偏振传输特性半实物仿真研究·····	88
4.5.1 大气湍流模拟装置介绍·····	89
4.5.2 湍流环境激光偏振传输特性半实物仿真系统组成·····	90
4.5.3 半实物仿真结果分析·····	92
4.6 本章小结·····	95
第 5 章 基于 CPolSK 的大气激光通信系统半实物仿真 ·····	96
5.1 引言·····	96
5.2 偏振移位键控系统与 OOK 系统性能对比·····	96
5.2.1 偏振移位键控与 OOK 通信系统构建·····	96
5.2.2 性能分析·····	98
5.3 高速 CPolSK 通信系统的仿真研究·····	103
5.4 基于 CPolSK 的大气激光通信系统半实物仿真研究·····	106
5.5 本章小结·····	108
第 6 章 基于液晶可变相位延迟器的偏振激光源 ·····	110
6.1 引言·····	110
6.2 影响激光器输出光束偏振特性改变的因素及对 PolSK 系统的 ——影响·····	111
6.2.1 影响激光器输出光束偏振特性改变的因素分析·····	111
6.2.2 激光源输出光束偏振特性改变对 CPolSK 系统性能的影响·····	114
6.3 基于液晶可变相位延迟器的偏振激光源·····	117
6.3.1 基于液晶可变相位延迟器的偏振激光源系统组成及工作原理·····	117
6.3.2 基于液晶可变相位延迟器的偏振激光源性能测试·····	119
6.4 基于液晶的激光偏振参数控制技术·····	121
6.4.1 液晶的电控双折射效应·····	122
6.4.2 基于液晶的光波偏振态控制技术·····	123
6.5 傅里叶分析法激光偏振参数测量技术·····	126

6.5.1 激光偏振特性的斯托克斯参量表征	126
6.5.2 傅里叶分析法偏振参数测量	126
6.6 本章小结	129
第7章 相干度精确可控的部分相干激光源	131
7.1 引言	131
7.2 部分相干光基本理论	131
7.2.1 空间-时间域互相干函数	131
7.2.2 空间-频率域的交叉谱密度函数	132
7.2.3 空间-频率域的交叉谱密度矩阵	132
7.2.4 GSM 光束	133
7.3 GSM 光束产生实验原理	134
7.3.1 毛玻璃法	134
7.3.2 空间光调制器法	135
7.4 GSM 光束生成实验系统	137
7.4.1 实验系统原理框图	137
7.4.2 GSM 光束的生成	137
7.4.3 光束相干度检测	138
7.5 本章小结	139
第8章 结束语	140
8.1 主要研究内容	140
8.2 主要创新点	143
8.3 未来展望	143
参考文献	145
附录	150

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

根据信号的传输信道特性可将通信分为有线通信和无线通信,其中有线通信可分为明线通信、电缆通信和光纤通信,而无线通信根据工作频段的不同又可分为微波通信和光通信。为满足 21 世纪信息多元化的要求,信息与通信技术的飞速发展已经超过了人们的预期。现代社会信息量日益膨胀,对信息交换的容量、信息传输的实时性、速率、保密性、抗干扰性等提出了更高的要求。为解决日前出现的微波通信频带拥挤、资源匮乏问题,自由空间光通信(Free Space Optical Communication, FSO, 又称作无线光通信)作为一种新兴通信方式应运而生。它以激光光波作为信息载体,大气信道作为主要传输介质的光通信系统,实现远距离无线通信。它有效地结合了微波通信与光纤通信的双重优点,满足大通信容量、高速率通信的要求,且无需铺设光纤,同时具有成本低、灵活性好、抗干扰能力强的优点。因此,近年来世界各国纷纷向空间光通信领域投入大量的人力、物力,并取得大量研究成果。

自由空间光通信系统中的通信范围所指的是广义的空间,所以其涵盖的范围广泛,如局域网连接、“最后一公里接入”、卫星间通信、卫星-地面通信、临近空间-地面通信、卫星-飞机通信等领域。通过在不同平台间建立通信链路可构成整个空间光通信网络体系,能够为各种应用场景提供高速、便捷、保密的信息传输服务。如图 1.1 所示。

但是,当空间激光通信系统发射的激光信号通过大气信道传输时,激光信号会与大气中的气溶胶、水蒸汽等微粒相互作用,形成大气吸收与散射效应。这些效应会引起系统接收端信号功率降低、激光光斑弥散等效果,最终影响系统通信性能。大气信道中的湍流现象还会引起激光发生光强闪烁、光束扩展和漂移、到达角起伏等湍流效应,这些效应会严重影响在大气信道中传输的激光光束质量,综合影响整个光通信系统,导致空间光通信系统总体性能的下降。

为克服以上因素的影响,有效提升空间光通信的传输性能,满足高速率、远距离、低误码率的要求,在设计大气激光通信系统时,有必要采取有效措施来避免或者降低激光信号传输过程中受大气湍流等效应的影响。美国、德国、法国、日本等国家都已开展自由空间光通信方面的研究多年,在抑制大气信道影响方面取得了

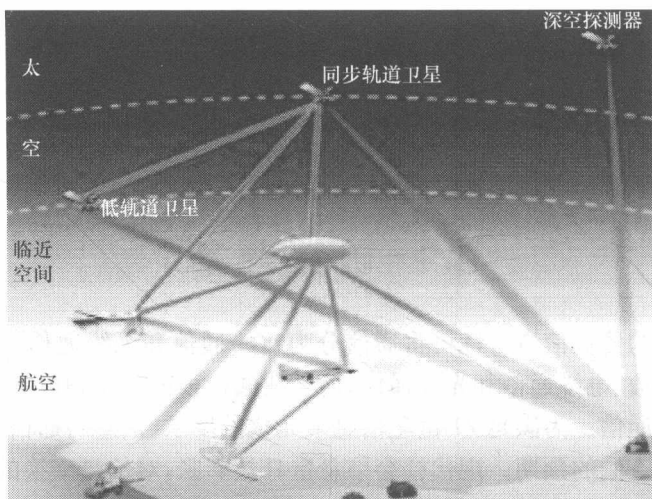


图 1.1 自由空间光通信网络体系

较多成果;但截至目前,大气信道环境的影响仍是阻碍自由空间光通信向更高速率、更远距离、更低误码率方向发展的主要因素。

基于上述背景,本书立足我国目前空间激光通信技术的研究现状,对偏振移位键控调制技术及基于偏振移位键控的大气激光通信中的关键技术展开研究,并通过理论分析、数值仿真和半实物仿真实验研究相结合的方法对基于偏振移位键控的大气激光通信关键技术及其关键技术进行深入的研究,探索提高大气激光通信性能的新方法和新手段,为实现低成本、高性能的大气激光通信提供有力的理论和实验基础。

1.2 研究目的与意义

现代社会信息的日益膨胀和复杂化,迫使信息传输容量剧增,对信息交换的容量、信息传输的实时性、信息速率、保密性、抗干扰性等提出了更高的要求。微波通信逐渐出现频带拥挤、资源缺乏的问题,开发大传输容量、高通信速率的无线通信系统成为未来空间通信发展的主要趋势。激光通信技术以激光作为载波,通过对激光的某一特性进行调制来完成数据信息传输、信息交换的过程。激光因其具有微米量级或更短的波长特性,使得频带较宽,可提供较高的数据传输速率;激光光束发散角很小,有很强的指向性,使得信号光束很难被截获,能有效提高通信安全。

传统的激光通信系统一般采用强度调制、频率调制或者相位调制,在光谱域和频域进行处理。激光信号在大气信道传输过程中不可避免地会受到大气湍流、扰

动和背景光噪声等因素的影响,从而导致系统的可靠性降低。已有研究显示,激光的偏振态是携带信息的又一理想载体,其优越性体现在它是电磁场性质更全面、更深层次的描述,对偏振的控制与探测实际上是对表征电磁场性质的激光特性参数的综合利用。其优势有:

(1) 表征偏振态的椭圆率角和方位角等信息随光的传播而满足一定的演化规律,按照这些规律,可反演出光在传播过程中所经历的调制、变换作用,进而对传输过程中光波偏振性能的变化进行修正;

(2) 与激光强度调制技术相比,利用激光偏振调制技术进行信息的编码与传输可以大大减少激光信号在大气信道中传输所受到的不利影响,减小误码率,提高通信准确率,且编码与解码方法简单、易于实现;

(3) 激光偏振态的调制与解调技术已在光纤通信中得到广泛应用,其偏振参数的测量方法与技术手段相对比较成熟;

(4) 偏振移位键控(Polarization Shift Keying, PolSK)是一种利用光波的偏振态进行编码的调制技术,该技术采用不同偏振态来表示逻辑信号“0”和“1”,实现激光的编码通信过程。

由于偏振移位键控编码的激光信号具有良好的功率均衡性,即传输不同数据符号时的激光信号功率相同,因此可有效解决功率波动问题,降低通信系统的非线性效应,提高谱效率。因此,对基于偏振移位键控的偏振编码技术的研究将为提高空间光通信系统综合性能提供新方法与新途径,具有重要的应用前景。

1.3 国内外研究现状

1960 年在美国诞生了世界上第一台红宝石激光器,自此后不久,人们即开始尝试利用激光进行无线通信。20 世纪 80 年代,大气激光通信掀起研究热潮,世界各国纷纷开展相关研究。但是受当时技术条件和元器件的限制,通信效果较差。近十几年来,随着半导体激光器及其相关技术的快速发展,大量关键技术和器件被突破,如半导体激光器技术,快速高精度指向、捕获、跟踪(PAT)技术,大气湍流效应及补偿技术,窄线宽大功率激光调制发射技术,低噪声光放大技术和高灵敏度 DPSK/BPSK/QPSK 光接收技术等,空间激光通信再度引起各国政府的重视,并逐渐引入到实际应用中。

1.3.1 空间激光通信技术研究与应用概况

目前,美国、日本、欧洲是开展激光通信试验研究的主要国家和地区,它们广泛开展空间激光通信链路理论研究、原理样机研制、地面和通信演示验证等工作,涉及卫星与卫星间、卫星与飞机间以及卫星与地面间等多种形式的通信链路,并且各

自都依托天文观测站建立了相应的地面激光通信站,建立了比较全面的检测与评估体系。

图 1.2 为目前已经开展的空间激光通信链路技术示意图。从同步轨道卫星、中轨道卫星和低轨道卫星以及临近空间浮空平台、飞机、地面站等,都已经开展了激光通信链路技术试验验证,初步建立起立体化空间通信网络的框架。从该图可以看出,同步轨道卫星的中继作用非常明显和重要。基于空间激光通信信息网络的实际需求,世界各国围绕以同步轨道卫星为核心的激光通信网络系统的构建开展了长期研究。下面对国际上部分国家及国际组织在空间激光通信领域的典型实施案例进行简单介绍与分析。

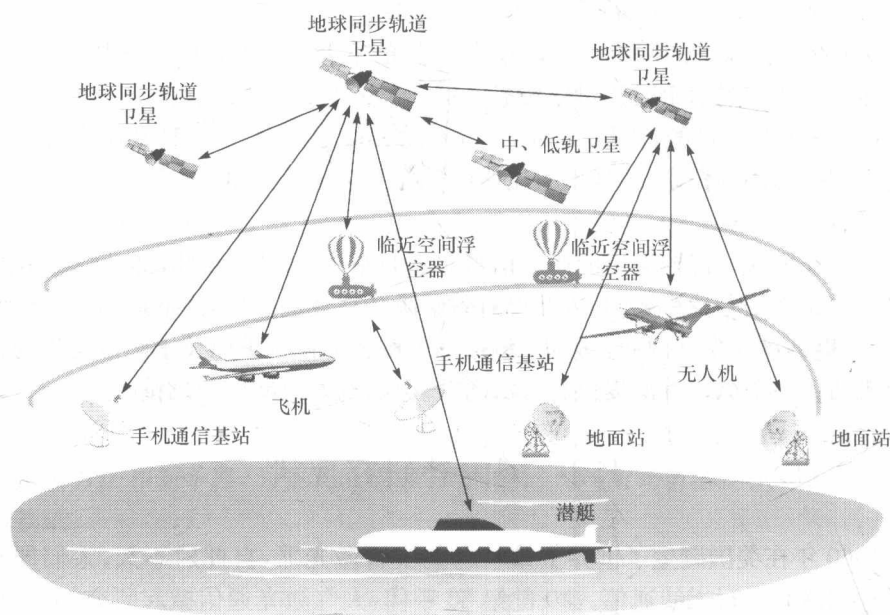


图 1.2 空间激光通信链路技术示意图

(1) 欧洲航天局的 SILEX 项目 (Semi-Conductor Inter Satellite Link Experiment, 半导体激光卫星间光通信链路试验)

1991 年,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)开展 SILEX 项目研究,将其作为未来欧盟卫星通信网络的主体。SILEX 项目目的是实现高轨道同步卫星 ARTEMIS(Advanced Relay Technology Mission Satellite, 先进中继技术任务卫星)与低轨道卫星 SPOT-4(Systeme Probatoire d'Observation de la Terre, 地球观测系统)和地面站间的激光通信。SPOT-4 卫星获取的图像数据通过光通信链路传送给 ARTEMIS 卫星,然后通过 ARTEMIS 卫星上 Ka 波段的异频雷达收发机将数据传送到位于图卢兹的地面站。整个系统仅需一个地面站即可以实现从

SPOT-4 卫星向远程地面站实时传送图像数据信息,跨域面积较大。

SILEX 项目包括两个光通信终端:法国地面观测卫星 SPOT-4 上的 PASTEL (PASager TELecom)和装载于欧洲通信卫星阿蒂米斯(ARTEMIS)上的 OPALE (Optical Payload for Inter Satellite Link Experiment)。1998 年 3 月 22 日,SPOT-4 地面观测卫星的发射成功,实现了 SILEX 项目从实验室内光学平台实验测试到卫星轨道终端研制成功的巨大进步。

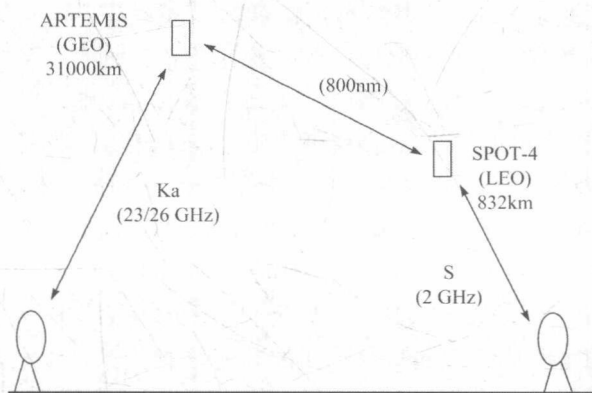


图 1.3 SILEX 系统示意图

2001 年 11 月 20 日,ARTEMIS 卫星上的激光通信终端 OPALE 与法国地面观测卫星 SPOT-4 上的激光通信终端 PASTEL 进行人类历史上的首次卫星间激光通信单工链路通信试验,如图 1.4 所示。系统发射端采用基于 CaAKAs 的激光器,波长 800nm,接收端采用 APD 进行探测,通信速率 50Mbps,通信距离 45000km,通信误码率为 10^{-9} 。

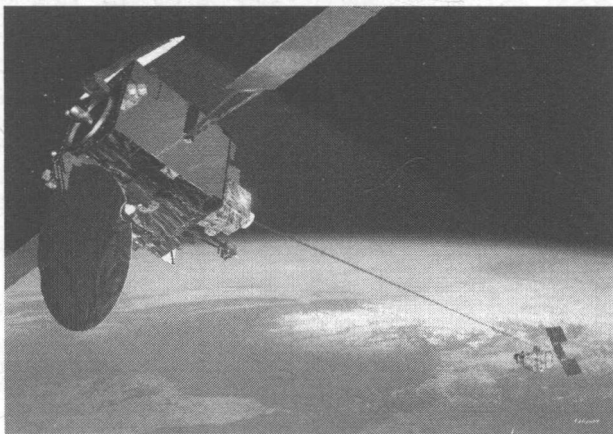


图 1.4 ARTEMIS 卫星和 SPOT-4 卫星间激光通信示意图

(2) 欧洲航天局的 EDRS 项目(European Data Relay System, 欧洲中继卫星系统)

2016 年 1 月 30 日,作为 SILEX 系统研究成果的具体应用,欧洲航天局构建的欧洲数据中继卫星系统(European Data Relay System, EDRS)的第一颗卫星(Eutelsat-9B 通信卫星)在哈萨克斯坦的拜科努尔航天发射场发射成功。

EDRS 由若干个 GEO 组成的卫星群构成,为 LEO 卫星、无人机和地面站之间提供用户数据中继服务,LEO 卫星将数据通过激光通信链路传输给 GEO 卫星,GEO 卫星再采用微波链路把数据传回到地面站。该计划是世界上首个实际应用并投入运营的卫星间激光通信系统项目,其初衷是通过使用 LEO 和中继 GEO 卫星间的高速激光通信链路,克服了传统低轨卫星在对地传送数据方面能力的不足:有限的传输容量和较大的数据时延。该计划的目标是创造一种新的卫星服务,促使空间激光通信系统的研发和实施达到成熟阶段,并以商业模式运营。

EDRS 系统的结构如图 1.5 所示,工作原理如图 1.6 所示,卫星外观如图 1.7 所示。系统目前包括 3 颗 GEO 卫星(EDRS-A,EDRS-C,EDRS-D),每个卫星都搭载激光通信终端载荷,以实现同步卫星间的高速信息传输。该系统还具有低轨卫星或飞机平台与同步轨道卫星间 1.8Gbit/s 的数据传输速率,可将低轨道卫星获取的海量数据实时不间断地通过其与该系统同步轨道卫星实时向地面站传送能力,大大提高了卫星数据传输的时效性,也使得同步轨道卫星、低轨道卫星、各类机载平台间高速实时激光通信的应用成为现实。

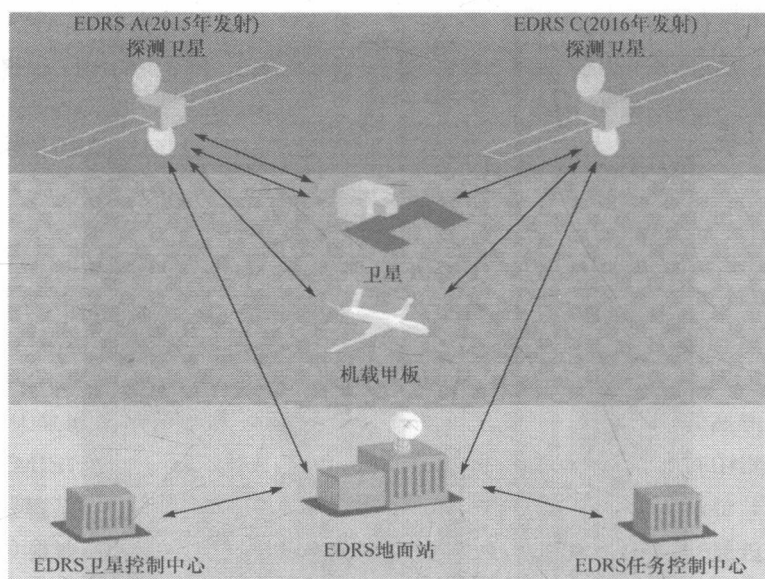
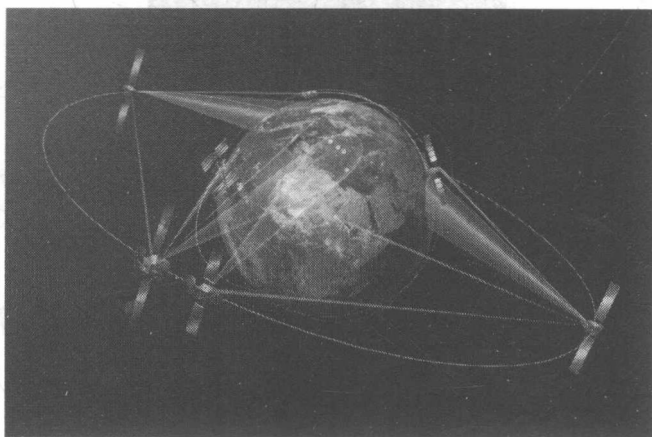


图 1.5 EDRS 系统结构示意图^[96]

图 1.6 EDRS 系统工作原理示意图^[98]图 1.7 EDRS-A 卫星外观图^[98]

2016 年 6 月 2 日,该卫星首次成功传输了由 Sentinel 1A 雷达卫星获取的高分辨率彩色图像数据,如图 1.8 所示,从而验证了 ERDS 系统的出色性能,也开创了卫星间激光通信技术商用化的新时代。

(3) 欧洲航天局和日本宇宙航空研究开发机构联合项目 OCIETS(The Optical Inter-orbit Communication Engineering Test Satellite,光学轨道通信工程试验卫星)

光学轨道通信工程试验卫星 OCIETS(又称 Kirari,“闪光”),是由日本宇宙航空研究开发机构(JAXA,Japan Aerospace Exploration Agency)在 2005 年 8 月发射的低轨道通信卫星,搭载了 LUCE 终端(Laser Utilizing Communications Equipment),采用近地太阳同步轨道,轨道高度为 610km,倾斜度为 97.8° 。该卫星的主要目的是测试 LEO 轨道卫星到地面站间的激光信号传输特性,计划与欧洲航天局的 ARTEMIS 地球同步轨道卫星进行高带宽光通信试验验证,如图 1.9 所示。