

柯熙政 吴加丽 著

无线光相干通信 原理及应用



科学出版社

无线光相干通信 原理及应用

柯熙政 吴加丽 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要围绕无线光相干通信的关键技术,对光束耦合、信号光偏振态控制和波前校正进行论述,内容包括:对相干光通信基本原理和外差探测条件进行阐述;利用阵列耦合接收和大口径耦合技术,实现空间光-光纤耦合;以模拟退火算法、粒子群算法和 SPO 算法等为例,介绍它们对信号光偏振态的控制;分析常规自适应光学技术、无波前探测自适应光学技术以及非线性光学共轭技术对信号光畸变波前的校正;介绍光束模式对相干探测性能的影响。全书理论联系实际,既有理论推演,也有实验结果,可以帮助读者进一步理解书中的理论知识。

本书可作为高等院校通信工程、光学工程等相关专业高年级本科生、研究生的参考书,也可作为相关专业研究人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无线光相干通信原理及应用/柯熙政,吴加丽著. —北京:科学出版社, 2019.11

ISBN 978-7-03-062785-8

I. ①无… II. ①柯… ②吴… III. ①相干光通信 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019) 第 237977 号

责任编辑:李 萍/责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 伟/封面设计:迷底书装

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2019 年 11 月第一次印刷 印张: 24 1/4

字数: 485 000

定价: 145.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

人工智能的快速发展给通信行业提出了更高的要求,更大的信道容量、更远的传输距离以及更高的传输速率和传输质量成为未来光通信行业的发展趋势。传统光通信技术所采用的强度调制/直接检测方式由于单路信道带宽有限而无法应对高速率通信,相干光通信因其调制方式丰富、通信容量大、接收灵敏度高的独特优势而受到科研工作者的青睐,有望从根本上提高接收机的选择性,并增加光信号的无中继传输距离。为了实现更有效、更可靠的相干光通信,需要在相应关键技术上进行突破:载波频率的稳定性、接收端信号光偏振方向和波前畸变的校正及光束的耦合等。

本书共 10 章,涉及空间光-光纤耦合及光束控制、光束偏振和波前控制技术、双平衡探测及光束模式对相干探测系统性能的影响等内容,介绍无线光相干通信原理及关键技术:针对空间光耦合,提出阵列耦合接收和大口径耦合技术;针对相干探测接收端混频效率,提出信号光偏振控制和自适应光学技术。

本书是西安理工大学光电工程技术研究中心的集体研究成果,谭振坤、雷思琛、孔英秀、杨尚君、毛燕子、马兵斌、徐鑫等多位研究生参与了有关课题的研究及本书的整理工作,感谢他们付出的青春与热情。此外,在撰写本书的过程中,作者参阅了大量的文献和资料,谨向这些文献和资料的作者致以崇高的敬意,他们的工作为作者带来了启迪和帮助。

本书的有关工作得到陕西省重点产业创新链项目(2017ZDCXL-GY-06-01)的资助,受到了陕西省智能协同网络军民共建实验室的支持,在此表示感谢。

本书是作者对无线光相干通信相关研究工作的总结,限于作者的学识水平,书中难免存在不足之处,敬请读者不吝批评指正。

目 录

第 1 章 无线光相干通信概述	1
1.1 自由空间光通信基本概念	1
1.2 自由空间光通信发展现状	1
1.3 相干光检测国内外研究现状	3
1.3.1 星间相干光检测研究现状	3
1.3.2 光纤通信相干光检测研究现状	7
1.3.3 自由空间相干探测通信系统的发展现状	9
1.4 影响相干探测性能的因素	17
1.4.1 自由空间相干探测系统性能影响因素的研究现状	17
1.4.2 部分相干光束相干探测系统影响因素的研究现状	20
1.5 波前校正的国内外研究现状	20
1.5.1 大气湍流补偿技术研究现状	21
1.5.2 波前校正技术的国外研究现状	22
1.5.3 波前校正技术的国内研究现状	22
参考文献	24
第 2 章 相干光通信	38
2.1 相干光通信的基本原理	38
2.1.1 基本原理	38
2.1.2 零差探测	40
2.1.3 外差探测	41
2.1.4 调幅信号的外差探测	41
2.2 相干调制与解调	42
2.2.1 相干系统的光调制	42
2.2.2 相干解调	44
2.2.3 系统性能	47
2.3 影响检测灵敏度的因素	48

2.3.1	相位噪声	48
2.3.2	强度噪声	48
2.3.3	偏振噪声	49
2.3.4	相干光通信系统的关键技术	49
2.4	光外差检测的空间相位条件	49
2.4.1	空间相位条件	49
2.4.2	光外差检测的频率条件	52
2.4.3	光外差检测的偏振条件	53
2.5	零差探测与外差探测	53
2.5.1	零差相干探测	55
2.5.2	相干探测	56
2.6	相干探测系统组成	57
2.6.1	波前校正模块	58
2.6.2	偏振控制模块	61
2.6.3	激光器稳频模块	62
2.6.4	平衡探测模块	64
2.6.5	相干解调模块	66
2.7	相干探测系统性能分析	66
2.7.1	相干探测系统信噪比及检测灵敏度	66
2.7.2	理想情况下相干探测系统性能分析	70
2.7.3	光路对准误差情况下相干探测系统性能分析	73
2.8	信噪比、误码率和探测灵敏度	78
2.8.1	直接探测与外差探测的信噪比	78
2.8.2	直接探测与外差探测的误码率	80
2.8.3	直接探测与外差探测的探测灵敏度分析	83
2.9	波前畸变对空间相干光通信的影响	85
2.9.1	波前畸变原理	85
2.9.2	波前畸变的影响	87
	参考文献	89
第 3 章	空间光-光纤耦合及光束控制	91
3.1	空间光-光纤耦合技术	91

3.1.1	理想条件下透镜-单模光纤耦合	92
3.1.2	高斯光束耦合	97
3.2	弱湍流大气中空间平面波-透镜-单模光纤耦合	99
3.2.1	大气湍流中光场分布及折射率功率谱	99
3.2.2	大气湍流中透镜耦合	104
3.2.3	大气湍流中透镜耦合光功率相对起伏方差	108
3.2.4	大气湍流中透镜阵列的空间光耦合	111
3.3	空间光耦合自动对准算法	115
3.3.1	空间光耦合自动对准概述	115
3.3.2	模拟退火算法	116
3.3.3	粒子群算法	122
3.4	基于马卡天线的阵列光束控制	127
3.4.1	马卡天线及存在的问题	127
3.4.2	基于马卡天线的阵列高斯光束控制	128
3.4.3	大气湍流中马卡天线的耦合效率	137
	参考文献	140
第 4 章	光束偏振控制技术	144
4.1	光束偏振控制进展	144
4.1.1	偏振控制器的研究现状	144
4.1.2	偏振控制算法的研究现状	145
4.2	相干光通信系统与偏振控制	147
4.2.1	光偏振的表示	147
4.2.2	相干光通信系统的偏振控制	150
4.3	相干光通信偏振控制模型和控制算法	156
4.3.1	相干光通信系统的偏振控制模型	156
4.3.2	偏振控制中的模拟退火算法	157
4.3.3	粒子群优化算法在偏振控制中的应用	161
4.3.4	SPO 算法的设计以及在偏振控制中的应用	164
4.3.5	三种算法的比较	170
4.4	偏振控制器的无端复位	171
4.4.1	小步倒退复位法和直接复位法	171

4.4.2	直接复位方式的实验	175
4.5	偏振控制的实验	177
4.5.1	实验装置	177
4.5.2	偏振控制的外场实验	177
	参考文献	182
第 5 章	双平衡探测	184
5.1	国内外发展历史和现状	184
5.1.1	国外发展历史和现状	184
5.1.2	国内发展历史和现状	186
5.2	双平衡探测系统结构与原理	187
5.2.1	双平衡探测技术中 90° 光混频器的分类	188
5.2.2	平衡探测器的分类	194
5.2.3	双平衡检测原理	197
5.3	双平衡探测技术的平衡失配分析	202
5.3.1	光混频器的影响	202
5.3.2	平衡探测器的影响	207
5.4	双平衡探测系统中共模抑制比	210
5.4.1	共模抑制比	210
5.4.2	信噪比	212
5.4.3	数值仿真	214
5.5	双平衡探测系统 Optisystem 仿真	217
5.5.1	双平衡探测系统仿真	217
5.5.2	功率失配对双平衡探测信噪比的影响	219
5.5.3	时间失配对双平衡探测信噪比的影响	221
	参考文献	222
第 6 章	波前校正系统	225
6.1	自适应光学系统研究现状	225
6.2	相干光通信中的自适应光学系统	227
6.2.1	自适应光学原理	227
6.2.2	波前传感器	228
6.2.3	波前校正器的工作原理	230

6.3 系统误差分析	231
6.3.1 自适应光学系统误差分析	231
6.3.2 抑制系统误差方法	232
6.4 波前控制器的实现	234
6.4.1 波前重构理论	234
6.4.2 变形镜影响矩阵的测量	240
6.4.3 波前控制算法实现	242
6.5 波前畸变的校正	245
6.5.1 闭环控制参数调节过程分析	245
6.5.2 波前相位畸变对混频效率的影响	246
6.5.3 对相干混频效率的影响	248
6.6 实验验证	250
6.6.1 波前控制器的动态特性分析	250
6.6.2 波前畸变校正效果分析	252
参考文献	260
第 7 章 无波前探测自适应光学校正	263
7.1 自适应光学基本原理	263
7.1.1 波前校正器	264
7.1.2 波前控制器	266
7.1.3 SPGD 算法	267
7.2 SPGD 算法对畸变高斯光束的波前校正	268
7.2.1 光传输方程与多相位屏法	268
7.2.2 高斯光束大气湍流传输模拟	269
7.2.3 不同湍流强度下信号光波前校正	271
7.2.4 自适应光学技术对相干光通信系统性能的改善	272
7.3 实验研究	274
7.3.1 SPGD 算法对静态波前畸变的校正	274
7.3.2 SPGD 算法对外差探测相干光通信系统的波前校正	277
参考文献	281
第 8 章 LC-SLM-R 的空间相干光通信波前校正技术	282
8.1 液晶空间光调制器相位标定	282

8.1.1	LC-SLM 相位标定	282
8.1.2	LC-SLM 的结构	283
8.1.3	琼斯矩阵分析 LC-SLM 的相位调制原理	284
8.2	LC-SLM 的相位标定原理	290
8.2.1	干涉条纹移动法	290
8.2.2	干涉条纹移动法实验原理	291
8.3	相位标定实验	292
8.3.1	反射式空间光调制器相位标定实验	292
8.3.2	最小二乘拟合	293
8.4	LC-SLM-R 的空间相干光通信波前校正系统	295
8.4.1	LC-SLM-R 波前畸变校正原理	295
8.4.2	波前校正系统基本组成	295
8.5	波前测量原理	297
8.5.1	横向剪切干涉仪静态波前测量	297
8.5.2	夏克-哈特曼波前传感器实时波前测量原理	303
8.6	波前重构	304
8.6.1	Zernike 多项式	304
8.6.2	基于 Zernike 多项式的波前重构	305
8.7	LC-SLM-R 波前校正实验	306
8.7.1	静态波前校正实验	306
8.7.2	外场实验	313
	参考文献	316
第 9 章	受激布里渊散射波前畸变校正技术	319
9.1	非线性光学共轭技术	319
9.2	光学相位共轭技术补偿激光波前畸变	320
9.3	受激布里渊散射理论	322
9.4	SBS 相位共轭技术补偿激光传输畸变数值分析	324
9.4.1	湍流强度的影响	325
9.4.2	取样孔径的影响	326
9.4.3	传输距离的影响	328
9.5	受激布里渊散射实验研究	330

9.5.1 实验装置	330
9.5.2 SBS 相位共轭镜补偿畸变系统	331
9.5.3 普通全反射镜系统	332
参考文献	334
第 10 章 光束模式对相干探测系统性能的影响	335
10.1 模式分解基本理论	335
10.1.1 非相干模分解数学模型	335
10.1.2 相干模分解	337
10.2 光束模式对相干探测系统性能的影响	339
10.2.1 大气湍流条件下光束模式对相干探测系统影响的数学模型	339
10.2.2 光束模式对相干探测系统性能的影响	346
10.3 1.3km 相干探测系统实验结果分析	354
10.4 部分相干 GSM 光束通过湍流的光强分布	357
10.5 部分相干 GSM 光束通过湍流的模系数分布	358
10.6 湍流对光束模式的影响	359
10.6.1 光源参数对权重因子的影响	359
10.6.2 湍流参数对权重因子的影响	361
10.6.3 传输距离对权重因子的影响	362
10.7 湍流对归一化 M^2 因子的影响	362
10.7.1 光源参数和传输距离对归一化 M^2 因子的影响	363
10.7.2 大气湍流对归一化 M^2 因子的影响	364
10.8 数值仿真	365
10.8.1 数值仿真光束模式的计算方法	365
10.8.2 传输距离对模式系数的影响	365
10.9 实验研究	370
10.9.1 实验原理	370
10.9.2 实验结果	370
参考文献	372

第 1 章 无线光相干通信概述

1.1 自由空间光通信基本概念

自由空间光通信 (free space optical communication, FSO) 是指以激光束为信息载体, 在空间中直接进行数据、语音和视频等信号传输的通信技术^[1], 也称为无线光通信 (wireless optical communication, WOC)。随着通信技术向大容量和长距离方向发展, 无线光通信在卫星间通信等领域有着广阔的应用前景, 已成为光通信技术的研究热点^[2]。

无线光通信通常采用强度调制/直接检测 (intensity modulation/direct detection, IM/DD) 和副载波调制/直接检测。强度调制是指利用光的强度携带信息, 包括开关键控 (on-off keying, OOK) 方式和脉冲位置调制 (pulse position modulation, PPM) 方式。直接检测是指由光电检测器直接检测会聚于光敏面上的激光强度。IM/DD 方式原理简单、成本低, 但存在频带利用率低和接收灵敏度差^[3] 等缺点。副载波调制是指先将二进制比特信息调制到载频上, 再利用已调副载波对光载波进行调制^[4]。这种调制技术可以通过波分复用技术有效利用频谱资源^[5], 进一步提高传输容量。

与直接检测相比, 相干光检测具有改善接收机灵敏度和信噪比、实现多种调制方式^[6]、选择性好^[7]、通信容量大^[8] 等优点, 可以提高无线光通信系统性能。相干光检测对光源、调制、传输、接收的要求都要比直接检测严格得多^[9]。实现相干光检测首先要求解决光源的稳定性问题^[10], 在相干光通信系统中, 发射机光源和接收机本振光源的频率稳定性要求非常高。其次, 要求接收的信号光和本振光要进行波前匹配和偏振匹配^[11], 以保证接收机具有较高的检测灵敏度, 但大气环境对相干光检测灵敏度的影响很大, 限制了相干光检测技术的推广和应用。为了抑制大气湍流的影响, 美国、日本等发达国家在无线光通信系统设计时已经考虑了一些大气扰动补偿技术^[12,13], 我国也取得了一些研究进展^[14]。但是, 抑制大气湍流的影响、提高接收信噪比和光检测灵敏度仍是无线激光通信领域研究的热点问题, 对其进行深入的研究具有非常重要的理论和应用价值。

1.2 自由空间光通信发展现状

20 世纪 80 年代, 各国竞相开始对不同调制方法的自由空间光通信技术进行理

论与工程化研究。美国、日本及欧洲的一些国家在光通信技术方面的研究一直处于领先地位。

20 世纪 80 年代初,麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 林肯实验室和美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 联合研制了 NASA-ACCS 通信卫星演示系统^[15],发射机采用了差分相移键控 (differential phase shift keying, DPSK) 调制方式,通过光外差检测进行接收,并于 1989 年成功发射了装载该系统的卫星。1995 年, NASA 支持的加州理工学院喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 研制了激光通信演示系统 (laser communication demonstration systems, LCDS)^[16],对信号光采用 OOK 调制方式,对信标光采用连续波 (continuous wave, CW) 调制方式,该系统的数据传输速率为 750Mbit/s。1995 年,美国战略导弹防御组织实施了 STRV-2(space technology research vehicle 2) 实验计划,STRV-2 的通信单元采用 IM/DD 方式半导体激光发射和雪崩光电二极管接收^[17],数据传输速率设计为 1Gbit/s。2000 年,朗讯公司和 Astro Terra 公司成功研制了 4 路波长为 1550nm、波分复用为 10Gbit/s、传输距离为 5km 的无线光通信实验商用系统^[18]。2013 年 10 月,美国 NASA 成功实现了月球激光通信终端与地面的激光通信链路,数据传输速率为 622Mbit/s,该项目中采用十六进制脉冲位置调制和超导纳米线单光子探测及地面终端阵列收发技术,有效克服了大气湍流信道的光强闪烁问题和接收功率密度低的问题,实现了灵敏度极高的光子接收^[19]。20 世纪 80 年代,欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 提出半导体激光星间链路实验 (semiconductor laser intersatellite link experiment)SILEX^[20] 计划,该计划是在卫星之间建立激光通信链路,研制所有关于卫星之间激光通信的子系统 and 通信单元。1994 年,由英国、加拿大和比利时的公司联合研制了小型光学用户终端 (small optical user terminal, SOUT) 和甚小光学用户终端 (very small optical user terminal, VSOUT),其采用 IM/DD 方式实现星间链路通信^[21,22]。2001 年,SILEX 计划中研制的通信终端成功实现了世界上的首次星间激光链路实验,采用二进制相移键控 (binary phase shift keying, BPSK) 调制/相干检测方式,通信速率为 50Mbit/s^[23]。2005 年,德国航空太空中心研制了 BPSK 调制/零差检测光通信通信终端 (laser communication terminal, LCT)^[24],通信实验数据传输速率达到了 5.625Gbit/s。2006 年,Trisno 等^[25] 研究指出偏振调制比 OOK 调制的灵敏度高 3dB 左右。2009 年,英国诺森比亚大学 Popoola 等^[26] 指出大气湍流会大大降低直接检测系统性能,副载波调制优于 OOK,是一种有效抑制大气湍流影响的调制方法。2014 年 11 月,Alphasat 卫星与“哨兵”1A 之间进行了第二代 LCT 激光通信验证^[27],采用 BPSK 调制/零差检测,测试速率达 600Mbit/s。

1995 年,日本通信综合研究室研制的强度调制/雪崩光电二极管 (avalanche photo diode, APD) 直接探测通信终端 (laser communication equipment, LCE),与

美国大气观测卫星成功地进行了 8min 的双向激光通信 [28]。2006 年 5 月, 日本的光学轨道间通信工程试验卫星 (optical inter-orbit communication engineering test satellite, OICETS) 与情报通信研究机构地面站成功地实现了激光通信实验, 卫星 OICETS 搭载的 LUCE(laser utilizing communication equipment)^[29,30] 激光通信终端, 采用光功率为 100mW、偏振态为左旋圆偏振的 847nm 激光, 调制方式为非归零码直接强度调制, 数据速率为 49.3Mbit/s, 误码率为 10^{-6} 。

2002 年, 中国科学院光电技术研究所开发了无线光通信终端, 传输速率为 10Mbit/s, 工作波长为 850nm, 通信距离为 1~4km, 发射功率为 3~30mW^[31]。电子科技大学于 2002 年研制了地面演示系统进行卫星光通信验证^[32]。武汉大学主要进行大气激光通信及信标光的捕获和跟踪方面的研究, 于 2002 年进行了大气激光通信实验^[33], 采用 IM/DD 方式, 于 2008 年完成空间光通信自动跟踪伺服系统的地面模拟试验^[34], 2011 年实现 4.6km FSO 链路, 并使用密集波分复用完成了 5Gbit/s 数据传输^[35]。2009 年, 中国电子科技集团公司第三十四研究所研制了激光大气通信机, 该通信机通信距离可以达到 5km, 通信速率为 155Mbit/s, 误码率小于 10^{-7} ^[36]。2011 年 10 月, 哈尔滨工业大学研制的星地通信终端搭载在海洋二号卫星上, 单路数据传输率可以达到 504Mbit/s^[37]。2013 年 9 月, 长春理工大学成功完成飞机和飞机间的远距离激光通信试验^[38]。

西安理工大学自 2000 年起开始对大气激光通信系统进行研究, 在光学设计、编码调制^[39]等方面取得了令人欣喜的进展。已经成功研制出一种无线激光通信系统终端, 具有常用数字接口, 包括串口、并口和以太网, 能在计算机或终端设备间之实现全双工通信, 完成数据、语音和图像的可靠传输, 传输速率为 20Mbit/s, 传输距离为 1km, 目前已应用于高速公路视频监控系统。

可以看出, 自由空间光通信技术发射端已由最初的 OOK 调制方式向其他多种调制方式发展, 如 SCM 调制^[40]、PPM 调制^[41]、多脉冲位置调制 (multi-pulse position modulation, MPPM)^[42]、差分脉冲位置调制 (differential pulse position modulation, DPIM)^[43] 和 BPSK 调制等, 可靠、高效和抗干扰能力强的调制方式是进行高传输速率和低误码率通信的保证, 在提高系统性能方面起着重要作用。自由空间光通信的接收端也由于直接检测灵敏度低而向相干检测发展。

1.3 相干光检测国内外研究现状

1.3.1 星间相干光检测研究现状

1. 国外研究现状

美国、德国和日本等发达国家已经在星间光通信领域对相干光检测技术进行

了深入的研究，现在已经进入到星间相干光通信系统的实验阶段。

1) 美国发展现状

20 世纪 80 年代中期，美国 MIT 林肯实验室进行了一项星间激光传输实验 (laser intersatellite transmission experiment, LITE)，研制出光外差检测通信端机，实验装置外观如图 1-1 所示，发射机采用了 DPSK 的调制方式，实验采用 30MW 半导体激光器和 200mm 口径的望远系统，数据传输速率为 220Mbit/s，通信距离为 40000km，调制速率可达 1Gbit/s^[44]。

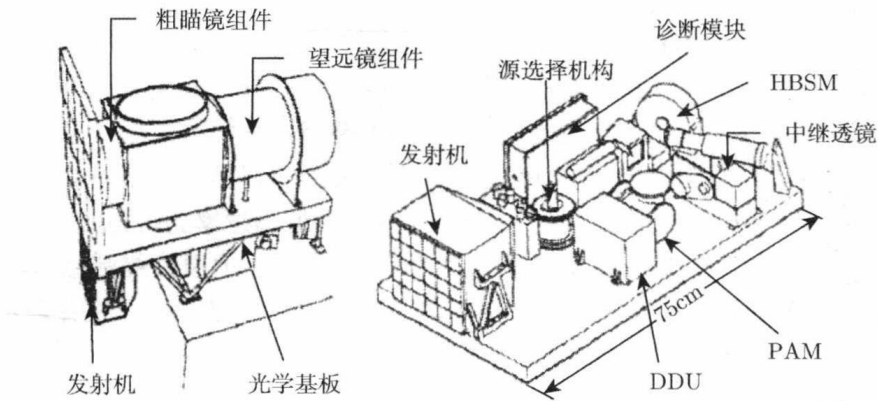


图 1-1 MIT 林肯实验室 LITE 外观 ^[44]

美国 JPL 于 2004 年成功进行了六十四进制 PPM 相干光通信实验，实验装置如图 1-2 所示，实验中采用了两个波长为 1064nm 的掺钕钇铝石榴石激光器作为信

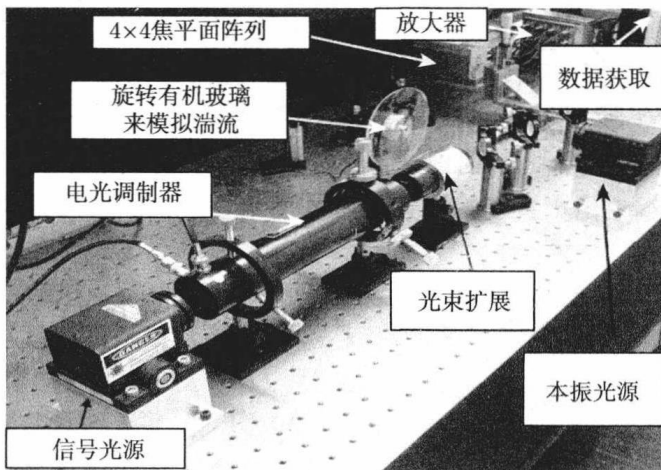


图 1-2 JPL 的相干光通信实验装置 ^[45]

号光源和本振光源，接收端采用了光外差检测方式，中频为 6MHz^[45]。

2) 德国发展现状

德国 Lange 等^[46]于 2006 年成功实现了 5.625Gbit/s、BPSK 调制零差检测光通信，两台激光通信终端 LCT 在西班牙加那利群岛和相距 142km 的 La Palma 岛和 Tenerife 岛之间进行地对地的相干光通信实验，LCT 终端零差 BPSK 接收器如图 1-3 所示。在没有光学滤波的条件下，实际通信码率达到 5.625Gbit/s，误码率在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 。

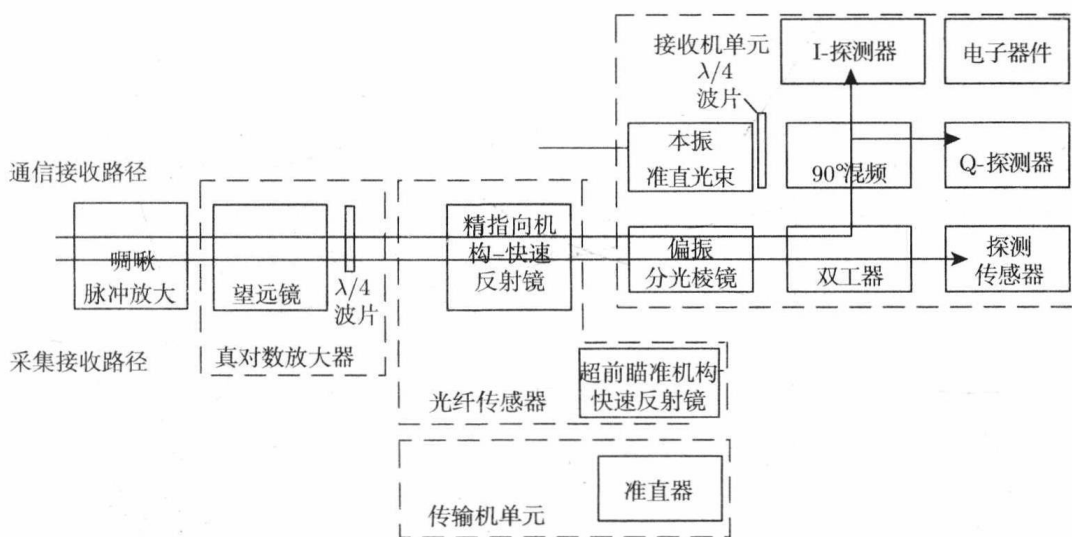


图 1-3 LCT 终端零差 BPSK 接收器^[46]

2008 年，德国低地球轨道遥感成像卫星 TerraSAR-X 和国防部红外侦察卫星之间成功实现了传输速率高达 5.6Gbit/s 的双向宽带数据传输，采用 BPSK 调制/零差相干光检测，误码率优于 10^{-9} ，这是人们第一次实现长距离的空间相干光通信实验^[47]。TerraSAR-X 卫星还和德国的光学地面站 (optical ground station, OGS) 成功建立了激光链路，实现了星地双向激光通信，链路保持时间为 8min，数据传输速率为 5.6Gbit/s，实验表明上行链路的误码率优于 10^{-5} ，发送端和接收端均采用 LCT 零差相干光检测终端^[48]，LCT 终端结构图如图 1-4 所示。

同年，美国国防部红外侦察卫星 NFIRE 与德国光学地面站进行了双向激光通信，数据传输速率为 5.625 Gbit/s，链路保持时间为 177s，采用 BPSK 调制/零差相干光检测^[49]。

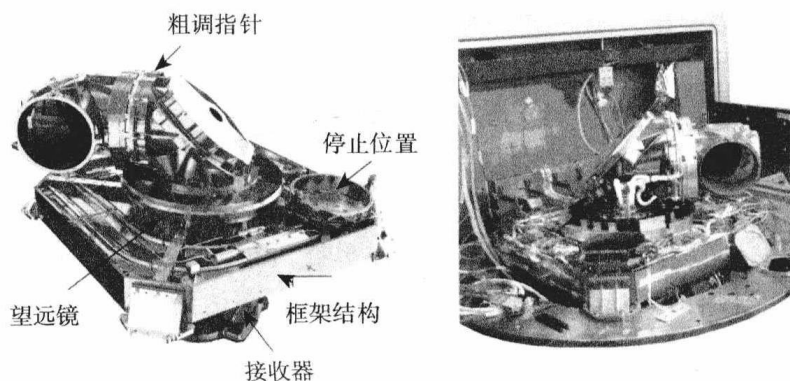


图 1-4 LCT 终端结构图 [48]

3) 日本及其他国家发展现状

1997 年, 日本国家信息通信技术研究院开始实施下一代 LEO 系统 (next-generation LEO system, NeLS) 发展计划, 用于实现星地和星间激光链路, 采用 DPSK 调制/相干探测, 通信数据传输速率为 2.4Gbit/s, 激光波长为 1550nm。该终端利用平面光波干涉计对信号进行解调, 从而恢复出数据流, 检测极限为 56 光子/bit^[50,51]。NeLS 计划原本预计于 2010 年正式投入商业运营, 目前该计划已经中止, 但仍对后续项目具有一定借鉴作用。2011 年, 日本东京大学报道了适用于星间通信的数字光外差接收机, 采用 BPSK 调制, 数据传输速率为 12Gbit/s, 指出数字相干光检测是下一代星间光通信的核心技术^[52]。

瑞士的 Contraves 空间中心在 ESA 卫星星座链路、星间链路前沿技术和通用技术等多个合作计划的先期研究基础上, 以工业化应用为目标, 设计开发了 OPTEL 系列激光通信终端^[53], 以满足各种空间应用需求, 其关键技术为高码率零差相干光通信技术。OPTEL 系列已经达到小型化、高码率和低能耗等要求。OPTEL 系列终端采用 1064nm 激光 BPSK 调制/零差探测。其中, OPTEL-25 通信激光器采用二极管抽运单频单模的可调谐掺钕钇铝石榴石激光器及光纤激光放大器的主振-放大结构, 发射波长为 1064nm; 采用 808nm 激光二极管作为抽运源; 掺镱光纤放大器采用 977nm 激光二极管作为抽运源, 输出光功率为 1.25W; 信标光由波长为 808nm 激光二极管产生最大输出功率可达 7W, 发射口径为 135mm; 接收采用变窗口 CCD 探测器, 用于捕获和粗跟踪; 采用微机械光纤扫描位置探测器, 用于通信和精跟踪。

2. 国内研究现状

20 世纪 80 年代, 电子科技大学研究了以 CO₂ 激光器为光源的外差大气激光通信系统, 为相干光通信系统的研究打下基础^[54]。2007 年, 汪巍^[55]对大气激光副载波复用的光外差检测系统进行了设计和仿真。同年, 赵长政^[56]提出了一种外