



普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

光通信技术

韩太林 主编
韩晓冰 臧景峰 副主编



免费
电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

光 通 信 技 术

主 编 韩太林
副主编 韩晓冰 臧景峰
参 编 张 宁 谭振建 毛昕蓉



机械工业出版社

前 言

当前社会已经进入信息时代，以通信技术和计算机技术为标志的高新科技的发展，给人们的生活带来了日新月异的变化，人与人之间的信息传输日趋密切，同时方式也日趋多样化。自从1966年英籍华人高锟提出光纤通信的概念以来，光纤通信的发展速度之快实为通信史上所罕见。特别是经历近30多年的研究开发，光纤光缆、光器件及光系统的品种更新和性能完善，已使光纤通信成为信息高速公路的传输平台。目前，光纤通信正在向着大容量、高速率、长距离方向迅猛发展，其技术的主要发展趋势充分体现在系统高速化、网络化、光缆纤芯高密度化和光器件高度集成化等方面。

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 $2.5 \times 4\text{Gbit/s}$ 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。空间光通信具有不需要频率许可证、频率宽、成本低廉、保密性好、误码率低、安装快速、抗电磁干扰、组网方便灵活等优点。正因为空间光通信具有抗电磁干扰和防窃听的突出特点，可保障天基综合信息网的信息安全传输，可应用于军事卫星侦察。随着技术的发展，也可应用到商业服务行业等。用光实现星间链路、深空探测、平台测控等将给通信领域带来巨大变化。可见，空间光通信具有广阔的发展和应用前景，是进一步开发太空宇宙空间的最佳方案，必将成为人类信息传输的必要手段。电子对抗和通信技术的发展，使空间光通信进一步崛起，其必将成为民用和军用方面通信的重要方式。

本书内容共分10章，第1章 主要介绍光纤通信和空间光通信的基本概念；第2章 主要介绍通信用光源的发光机理、工作原理及主要特性；第3章 主要介绍光通信信道，包括光纤的结构与分类、光纤的传输原理和光纤的传输特性、光缆的结构与分类、光纤主要参数的测量方法以及大气吸收、散射、湍流以及云层等对光通信的影响；第4章 主要介绍光探测器与光放大器的工作机理和类型；第5章 主要介绍光学网络器件的类型、原理和主要特性；第6章 系统地介绍了模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统的组成、性能参数和设计；第7章 介绍光时分复用、光波分复用、光交换技术、光孤子通信、光接入网等光通信新技术；第8章 介绍了光纤通信系统主要模块数学模型的建立和光纤通信系统的仿真实验；第9章 主要介绍空间光通信的捕获、对准、跟踪技术；第10章 主要介绍空间光通信中光学系统总体方案选择的几大关键问题，包括激光器的选择、探测器的选择、分光方式以及望远系统形式的确定。

本书由长春理工大学韩太林任主编。第1、3章由长春理工大学韩太林、臧景峰编写，第2、4章由南京工程学院谭振建编写，第5章由西安科技大学韩晓冰编写，第6章由西安科技大学毛昕蓉编写，第7章由北京石油化工学院张宁编写，第8章由臧景峰编写，第9、

10 章由韩太林编写。

由于作者水平有限，书中难免有错误或不足之处，敬请读者批评指正。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 xufan666@163.com 索取。

编 者

目 录

前言

第 1 章 概论 1

1.1 光通信的发展 1

1.1.1 电通信与光通信的探索 1

1.1.2 国内外光通信的发展现状 2

1.2 光纤通信系统 4

1.2.1 光纤通信系统的基本组成 4

1.2.2 光纤通信的优点 5

1.2.3 基本光纤传输系统 6

1.3 空间光通信系统 8

1.3.1 空间光通信概述 8

1.3.2 空间光通信的定义 9

1.3.3 空间光通信的应用领域 9

1.3.4 空间光通信系统的组成 11

1.4 空间光通信关键技术 12

1.4.1 激光器技术 12

1.4.2 捕获、瞄准、跟踪技术 13

1.4.3 调制、接收技术 13

1.4.4 空间环境（尤其是空间辐射环境） 适应性技术 15

1.4.5 小型、轻量、低功耗一体化设计和 制造技术 15

1.5 通信链路分析 15

本章小结 16

习题与思考题 16

第 2 章 通信用光源 18

2.1 光源性能的基本要求与类型 18

2.1.1 光纤通信对光源性能的基本 要求 18

2.1.2 一般光源的类型与应用特点 19

2.2 半导体光源 20

2.2.1 半导体光源的发光机理 20

2.2.2 粒子数反转分布 22

2.2.3 激光振荡和光学谐振腔 22

2.3 半导体激光器的工作原理 24

2.3.1 P-N 结半导体激光器的结构和 原理 24

2.3.2 异质结半导体激光器 25

2.3.3 半导体激光器的发光波长 26

2.4 半导体激光器工作特性 26

2.5 其他激光器 28

2.5.1 分布反馈式激光器 28

2.5.2 量子阱激光器 29

2.5.3 光纤锁模激光器 30

2.5.4 垂直腔面发射激光器 30

2.6 发光二极管 31

2.7 光源与光纤的耦合 32

2.8 半导体光源在系统中的应用 34

本章小结 34

习题与思考题 35

第 3 章 光通信信道 36

3.1 光纤的结构与类型 36

3.1.1 光纤的结构 37

3.1.2 光纤的分类 37

3.2 光在光纤中的传输 40

3.2.1 几何光学的光纤传输 40

3.2.2 光波动理论的传输方程 42

3.3 光纤传输的基本特性 43

3.3.1 光纤损耗 43

3.3.2 光纤色散 45

3.3.3 光纤的非线性 48

3.3.4 非线性折射率波动效应与非线性 受激散射 48

3.3.5 光纤标准与在系统中的应用 50

3.4 光缆 53

3.4.1 常用光缆的典型结构 54

3.4.2 光缆的制造与分类 55

3.5 光纤特性的测量 55

3.5.1 单模光纤模场直径的测量	56	4.3.3 掺铒光纤放大器的泵浦方式	97
3.5.2 光纤损耗的测量	56	4.3.4 掺铒光纤放大器的优点	99
3.5.3 光纤色散与宽带的测量	57	4.3.5 掺铒光纤放大器的应用	99
3.6 大气吸收和散射对空间光通信的影响	59	4.4 宽带掺铒光纤放大器的最新进展	100
3.6.1 大气吸收	59	4.4.1 增益移位掺铒光纤放大器	101
3.6.2 散射	59	4.4.2 铈镱共掺光纤放大器	102
3.6.3 能见度、透明度和大气透过率的关系	62	4.4.3 多段级联掺铒光纤放大器	103
3.6.4 空间光通信激光光谱透过率计算	63	4.5 掺镨光纤放大器	104
3.7 大气湍流对光通信的影响	66	4.5.1 掺镨光纤放大器的放大原理	104
3.7.1 大气湍流基础理论	67	4.5.2 掺镨光纤放大器的结构	105
3.7.2 激光在湍流中的传输	69	4.6 半导体光放大器	106
3.7.3 飞机与地面间激光通信激光湍流数值仿真	70	4.7 拉曼光纤放大器	107
3.8 云层影响	73	4.7.1 光纤的受激拉曼散射及其应用	108
3.9 气动光学效应	74	4.7.2 拉曼光纤放大器的放大机理	108
3.9.1 气动光学基础	74	4.7.3 拉曼光纤放大器的结构及特点	109
3.9.2 机载光通信附面层影响的分析	80	4.7.4 拉曼光纤放大器的优点与缺点	109
3.10 海水光学信道	83	4.7.5 拉曼光纤放大器的应用	110
3.10.1 海水的光学性质	83	本章小结	111
3.10.2 散射和吸收	83	习题与思考题	111
3.10.3 海水信道的能量传输模型	84	第5章 光学网络器件	112
3.10.4 海水中脉冲信号的时间扩展	85	5.1 光纤连接器和接头	112
本章小结	85	5.1.1 光纤连接器	112
习题与思考题	86	5.1.2 接头	114
第4章 光检测器与光放大器	88	5.2 光耦合器	114
4.1 光检测器的工作机理与类型	88	5.2.1 耦合器类型	115
4.1.1 光敏二极管	88	5.2.2 基本结构	115
4.1.2 PIN 光敏二极管	89	5.2.3 主要特性	116
4.1.3 雪崩光敏二极管	89	5.3 光隔离器和光环行器	117
4.1.4 光电检测器的特性	89	5.3.1 光隔离器	117
4.2 光放大器的分类与指标	92	5.3.2 光环形器	119
4.2.1 光放大器的分类	92	5.4 光调制器	119
4.2.2 光放大器的重要指标	93	5.5 光开关	120
4.3 掺铒光纤放大器	94	5.6 光滤波器	122
4.3.1 工作原理	94	5.6.1 法布里—珀罗滤波器	122
4.3.2 掺铒光纤放大器的构成和特性	95	5.6.2 马赫—曾德干涉滤波器	123
		5.6.3 阵列波导光栅	123

5.6.4 光纤光栅滤波器	124	7.3.4 波长交换	179
5.7 波长变换器	125	7.4 光孤子通信	180
5.7.1 全光波长变换简介	125	7.4.1 孤子的形成	180
5.7.2 SOA 型全光波长变换	126	7.4.2 光孤子通信系统	180
5.7.3 半导体激光器型全光波长 变换	131	7.5 光接入网	181
5.7.4 光纤光栅外腔波长变换器	132	7.5.1 光接入网概述	181
本章小结	134	7.5.2 无源光网络	182
习题与思考题	135	7.5.3 光纤混合网	185
第 6 章 光纤通信系统	136	本章小结	187
6.1 光纤通信常用线路编码	136	习题与思考题	188
6.1.1 扰码	136	第 8 章 光通信仿真	189
6.1.2 分组码—— $mBnB$ 码	137	8.1 仿真与建模	189
6.1.3 插入码	139	8.2 光纤通信系统的仿真	190
6.2 模拟光纤通信系统	140	8.2.1 光纤通信系统仿真软件的 现状	190
6.2.1 调制方式	140	8.2.2 系统主要模块的数学模型	191
6.2.2 模拟基带直接光强调制光纤传输 系统	142	8.2.3 发射系统模型	191
6.2.3 副载波复用光纤传输系统	144	8.2.4 光纤传输模型	192
6.3 数字光纤通信系统	150	8.2.5 光接收机模型	192
6.3.1 准同步数字分级结构	150	8.2.6 掺铒光纤放大器的模型	194
6.3.2 同步数字分级结构	152	8.3 光纤通信系统仿真实验	194
6.3.3 系统的性能指标和可靠性	158	8.3.1 系统级仿真	194
6.3.4 系统的总体考虑与设计	164	8.3.2 10Gbit/s 普通单模光纤传输 80km 的仿真	195
6.3.5 系统的色散补偿技术	168	本章小结	195
6.3.6 中继距离和传输速率	169	第 9 章 空间光通信的捕获、对准、 跟踪	196
本章小结	170	9.1 ATP 系统中的捕获技术	197
习题与思考题	171	9.1.1 捕获过程	198
第 7 章 光通信新技术	172	9.1.2 捕获方式	199
7.1 光时分复用技术	172	9.1.3 扫描方式	200
7.2 光波分复用技术	173	9.1.4 捕获概率分析	201
7.2.1 WDM 工作原理	173	9.2 ATP 系统中的跟踪技术	202
7.2.2 WDM 系统的基本结构	174	9.2.1 跟踪探测器的等效噪 声角 (NEA)	202
7.2.3 WDM 系统的主要特点	175	9.2.2 瞄准误差与系统突发概率的 关系	203
7.2.4 WDM 光网络	175	本章小结	203
7.3 光交换技术	177	习题与思考题	204
7.3.1 空分光交换	178		
7.3.2 时分光交换	178		
7.3.3 波分光交换	178		

第 10 章 空间光通信的光学系统	205	10.5 分光方式	209
10.1 激光器	205	10.6 望远镜结构形式	212
10.2 探测器	206	10.7 材料选择	214
10.3 激光通信的波长选择	207	10.7.1 反射镜材料	214
10.4 回转结构及方式	208	10.7.2 透镜材料	215
10.4.1 回转反射镜方式	208	本章小结	215
10.4.2 回转望远镜	209	习题与思考题	216
10.4.3 回转组件方式	209	参考文献	217

第 1 章 概 论

【知识要点】

近年来，通信信息产业在世界范围内迅速发展，取得了举世瞩目的进步。自 1970 年世界上第一根低损耗光纤问世以来，光纤通信得到了飞速发展。作为光电信息技术中最具有代表性的技术，光通信不仅从深度和广度两方面促进了通信学科与许多相关学科的互相影响和渗透，而且形成了许多前沿研究领域。正在运行的光通信系统比比皆是，新的设备、新的应用还在不断涌现。本章通过概要介绍光通信的发展历史、光通信系统及关键技术和通信链路，使读者了解光纤传输理论、光端机及路由交换等光通信系统基本原理，以及光通信产业，为后续章节的学习奠定基础。

1.1 光通信的发展

1.1.1 电通信与光通信的探索

任何通信系统追求的最终技术目标都是要可靠地实现最大可能的信息传输容量和传输距离。通信系统的传输容量取决于对载波调制的频带宽度，载波频率越高，频带宽度越宽。实际上，通信技术发展的历史是一个不断提高载波频率和增加传输容量的历史。20 世纪 60 年代，微波通信技术已经成熟，因此开拓频率更高的光波应用，就成为通信技术发展的必然。电缆通信和微波通信的载波是电波，光通信的载波是光波。虽然光波和电波都是电磁波，但是频率差别很大。为便于比较，图 1.1 给出相关部分的电磁波频谱。

光通信用的近红外光（波长为 $0.7 \sim 1.7 \mu\text{m}$ ）频带宽度约为 200THz ，在常用的 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 两个波长窗口频带宽度也在 30THz 以上。目前，由于受光源和光纤特性的限制，光强度调制的带宽一般只有 20GHz ，因此还有 3 个数量级以上的带宽潜力可以挖掘。

微波波段有线传输线路是由金属导体制成的同轴电缆和波导管。同轴电缆的损耗随信号频率的平方根而增大，要减小损耗，必须增大结构尺寸，但要保持单一模式的传输，又不允许增大结构尺寸。波导管具有比同轴电缆更低的损耗，但随着工作频率的提高，要减小波导结构的尺寸以保持单一模式的传输，损耗仍然要增大。光纤是由绝缘的石英（ SiO_2 ）材料制

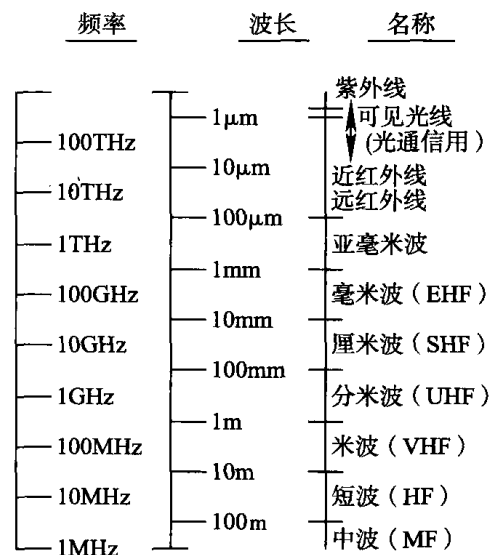


图 1.1 部分电磁波频谱

成的，通过提高材料纯度和改进制造工艺，可以在宽波长范围内获得很小的损耗。

1.1.2 国内外光通信的发展现状

光波也是一种电磁波，其波长在微米量级，频率为 10^{14} 量级，其频率比常用的微波高 $10^4 \sim 10^5$ 量级，因此理论上的通信容量也是微波通信的 $10^4 \sim 10^5$ 倍。具有实际应用意义的光通信技术出现在 1880 年 6 月，著名的 Alexander Graham Bell 通过他的新发明——光电话 (Photophone)，首次实现了无线光通信，通信距离为 600 英尺 (182m)。试验使用两面镜子分别作为发送器和接收器。声音被转换成镜面的振动，通过反射太阳光耦合到另一面镜子，然后将接收镜的振动还原成声音。这项技术最终没有投入商用运营的原因在于易受外界噪声干扰，可靠性不如电缆传输。

1881 年，贝尔发表了一篇题为《关于利用光线进行声音的复制与产生》的论文，对采用弧光灯为光源，话筒薄膜为调制器完成光发射和接收的光通信装置进行了讨论，引起了很多人的重视。第一次世界大战期间，军事部门也对这种技术进行了研究，并在 5km 的距离上实现了通信。西门子—哈萨克公司也曾为德军研制了军用红外线通信机，采用乙炔光源和 30cm 口径的抛物面反射镜实现了 5km 距离的红外光通信。美国、日本和前苏联也在第二次世界大战期间进行了红外光通信机的研究。这个阶段的光通信光源均采用热光源，接收机都采用硅光电池，噪声特性较差，因此限制了光通信技术的进一步发展。

1960 年激光出现之后，为光通信系统提供了具有高度指向性、高相干性、高亮度的光源，促进了光通信技术的发展。由于可以将光束以非常小的发散角对准目标发射，自由空间光通信比现有的射频通信更加不容易探测。因此，自由空间光通信对于在两个移动平台之间实现通信非常具有吸引力，如卫星之间、卫星与地面之间、飞机之间、飞机和地面之间、飞机与卫星之间等。第一次光通信技术的开发浪潮是在 20 世纪 60 年代的冷战时期，美国、西欧国家和以色列政府使用它来保护军事通信。

20 世纪 70 年代低损耗光纤和室温连续工作半导体激光器的研制成功，使空间通信的研究重点转到光纤通信上。实际上，在 19 世纪末就有人尝试用光信号传送话音，但由于当时的光源相干性很差，光波在大气中的传播受气候影响严重，很难获得长距离的稳定通信，这成为光通信领域的两大难题。

能够真正实现光通信，得益于 20 世纪爱因斯坦、肖洛和唐斯的“光受激辐射理论”。1960 年梅曼发明了第一台红宝石激光器，给光通信带来了新的希望。和普通光源相比，激光具有波谱宽度窄、方向性极好、亮度极高，以及频率和相位较一致的良好特性，是一种理想的光载波。继红宝石激光器之后，氦-氖 (He-Ne) 激光器、二氧化碳 (CO₂) 激光器先后出现，并投入实际应用。激光器的发明和应用，使沉睡了 80 年的光通信进入了一个崭新的阶段。1966 年，英籍华裔学者高锟博士 (K. C. Kao) 在 PIEEE 杂志上发表了一篇十分著名的文章《用于光频的光纤表面波导》。该文从理论上分析证明了光导纤维长距离传输光波的可能性。1970 年，美国康宁玻璃公司根据高锟文章的设想，用改进型化学相沉积法 (MCVD 法) 制造出了当时世界上第一根超低耗光纤，成为使光纤通信爆炸性竞相发展的导火索。从此，光通信所面临的两大难题都解决了，也就迎来了光通信发展的高峰期。20 世纪 90 年代，光通信开始大规模应用，在通信历史上引起了划时代的变化。光纤具有低损耗 (0.2 ~ 0.3dB/km)、通信容量大 (50THz/每芯光纤)、抗干扰能力强、保密性好及原材料丰富的特

点。这些特点使大容量、长距离跨洋通信成为现实。目前超长距离系统的最好水平是 Corvis 公司在芝加哥到西雅图 3200km (2.5Gbit/s) 的实验系统、Alcate 公司 4000km (10Gbit/s) 的实验系统等。单芯光纤的最高通信容量的实验室水平已达 7.04Tbit/s (176 × 40Gbit/s、50km)。上述这些系统都是采用密集波分复用 (DWDM) 和光纤放大器 (EDFA) 技术的成果。没有 1990 年发明的掺铒光纤放大器, 就没有今天的 DWDM 系统, 也就不可能充分利用光纤巨大的通信带宽。仅靠时分复用技术 (TDM) 提高通信容量来克服受限于电子器件的瓶颈效应, 还很难使单芯光纤的通信容量提高到 10Gbit/s 以上。

到如今, 光通信已经发展到以采用光放大器 (Optical Amplifier, OA) 增加中继距离和采用波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 增加传输容量为特征的第四代系统。第五代光波通信系统的研究与发展经历 20 多年的历程, 已取得了突破性进展。它基于光纤非线性压缩抵消光纤色散展宽的新概念产生的光孤子, 实现光脉冲信号保形传输。

改革开放以来, 我国的通信事业得到了突飞猛进的发展。我国的通信网规模已跃居世界第二, 按照目前的发展速度, 在未来几年内我国的通信网络规模有可能超过美国, 成为世界第一大网。随着以 IP 技术为代表的业务数据的爆炸性增长, 未来几年我国仍然是通信建设和发展的高峰期, 预计未来 5 年 IP 用户的年增长率将达 54%, 接近摩尔定律, 省际干线光缆网络建设增长幅度达 200%, 远高于摩尔定律。光纤到家庭 (FTTH) 是 20 年来人们不断追求的梦想和探索的技术方向, 但由于成本、技术和需求等方面的障碍, 至今还没有得到大规模推广与发展。然而, 这种局面最近有了很大的改观, 由于政策上的扶持和技术本身的发展, 在沉寂多年后, FTTH 网再次成为热点, 步入快速发展期。新技术、新设备、新的网络建设计划不断推出, 引起了业界的关注。很多有识之士把 FTTH 网 (特别是光纤到家、光纤到驻地) 视为光通信市场复苏的重要转折点。预计今后几年, FTTH 网还会有更大的发展。

由于空间光通信具有频带宽、发射天线小、保密性好和抗电磁干扰等优点, 各军事大国对空间光通信持有浓厚的兴趣, 投入大量的人力、财力、物力进行研究。随着电子对抗和通信技术的发展, 空间光通信备受青睐, 从而进一步推动了空间光通信的崛起。

从 20 世纪 70 年代到现在, 美国、西欧各国、日本和俄罗斯等国进行了长达 20 多年的空间光通信研究工作, 直到最近的几年才逐步走向成熟。分析国外近 30 年来的空间光通信技术研究的历史和现状, 可以得出结论: 由于各种相关技术 (如光学系统设计、精密机械加工、电子技术、计算机技术、卫星技术、大气特性研究、空间组网技术等) 的发展和不断进步, 国外对激光通信链路的研究过程也逐步走向深入, 大致遵循着从易到难、从简到繁、从低指标到高指标的顺序进行。形成这种现象的一个非常重要的原因就是在研究初期相关理论和技术基础较薄弱, 主要的元器件技术还很不成熟, 因此国外早期的一些研究工作除了得到了一些理论分析结果外, 真正在空间光通信设备所需的元器件上取得的进展较小。在近 10 年内, 空间光通信所需的元器件的研究取得了很大进展, 有很大一部分已经实现了商品化, 这些大大促进了空间光通信的发展。

经过各国研究人员几十年的努力, 空间光通信已经成为国际通信领域的热点, 除美国、日本、西欧各国、俄罗斯和中国外, 加拿大、巴西、印度等国家也积极开展空间光通信的各项研究。在已经实现的指标基础上, 下一代空间光通信系统将向小型化、高性能、高速率、高码率发展, 最显著的趋势为速率, 其速率将与地面光纤通信相同。10Gbit/s 的系统将于近几年内出现, 高功率、高速率的激光器和高速度的电学元件将促进空间光通信的发展。

空间光通信的发展趋势主要表现在：通信终端应用同一探测器和电学系统实现多种功能，轻型材料的发展将使未来的终端更加轻量化，相控阵天线、液晶及原子滤光器的发展也将使空间光通信 APT 技术突破现有的形式，EDFA (Er - Doped Fiber Amplifiers) 和 MOPA (Master - Oscillator Power - Amplifier) 的使用使激光发射的功率更高、调制速率更快，卫星对地面大气效应的解决方法也是主要研究内容之一。新一代的空间光通信系统不仅向着较高的速率和性能发展，在成本和批量生产环节也得到加强。激光逐渐取代微波在卫星之间及卫星和地面之间通信的地位，混沌保密通信及量子光通信技术将应用到空间光通信中，卫星光通信体制和通信协议的建立已经被列入议程。随着卫星光通信技术与系统的实用化和产品化，证明可以实现卫星干线激光通信网络，并将其连接至下层卫星和地面站。同时，下层卫星和小型固定目标之间的激光通信也被证明是可行的，接下来的工作便是建立激光通信系统的体制和协议。早期的空间光通信的主要研究目标是 LEO 和 GEO 间的通信。随着卫星激光通信关键实验的发展及信息传输要求的提高，目前的光通信应用范围已经扩大到所有空间通信领域，如 LEO 与地面、高空飞机之间、高空飞机与地面、卫星与地面站之间、高空飞机与 LEO 间、高空飞机与 GEO 间等。大气对空间光通信的影响成为主要关键技术之一，卫星通信技术中的 APT 技术经过改造还可以用于运动目标之间的通信，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，也将逐步采用具有 APT 技术的激光通信。空间光通信也已开始向民用方向发展，其在楼宇之间的通信领域中已经得到了广泛应用。

1.2 光纤通信系统

1.2.1 光纤通信系统的基本组成

光纤通信系统是以光纤为传输媒介、光波为载波的通信系统，主要由光发送机、光纤光缆、中继器和光接收机组成。光纤通信系统可以传输数字信号，也可以传输模拟信号。不管是数字系统，还是模拟系统，输入到光发射机的带有信息的电信号，都通过调制转换为光信号。光载波经过光纤线路传输到接收端，再由光接收机把光信号转换为电信号。

系统中光发送机的作用是将电信号转换为光信号，并将生成的光信号注入光纤。光发送机一般由驱动电路、光源和调制器构成，如果是直接强度调制，可以省去调制器。

光接收机的作用是将光纤送来的光信号还原成原始的电信号。它一般由光电检测器和解调器组成，对于直接强度调制的方式，在接收机里解调器可以省略。光纤的作用是为光信号的传送提供传送媒介（信道），将光信号由一处送到另一处。中继器分为电中继器和光中继器（光放大器）两种，其主要作用就是延长光信号的传输距离。为提高传输质量，通常把模拟基带信号转换为频率调制（FM）、脉冲频率调制（PFM）或脉冲宽度调制（PWM）信号，最后把这种已调信号输入光发射机。还可以采用频分复用（FDM）技术，用来自不同信息源的视频模拟基带信号（或数字基带信号）分别调制指定的不同频率的射频（RF）电波，然后把多个这种带有信息的 RF 信号组合成多路宽带信号，最后输入光发射机，由光载波进行传输。在这个过程中，受调制的 RF 电波称为副载波，这种采用频分复用的多路电视传输技术，称为副载波复用（SCM）技术。然而，由于目前技术水平所限，对光波进行频率调制与相位调制等仍局限在实验室内，尚未达到实用化水平，因此目前大都采用强度调制

与直接检波方式 (IM-DD)。又因为目前的光源器件与光接收器件的非线性比较严重,所以对光器件的线性度要求比较低的数字光纤通信在光纤通信中占据主要位置。典型的数字光纤通信系统方框图如图 1.2 所示。

从图 1.2 中可以看出,数字光纤通信系统基本上由光发送机、光纤与光接收机组成。发送端的电端机把信息(如话音)进行模数转换,用转换后的数字信号去调制发送机中的光源器件 LD,则 LD 就会发出携带信息的光波,即当数字信号为“1”时,光源器件发送一个“传号”光脉冲;当数字信号为“0”时,光源器件发送一个“空号”(不发光)。光波经低损耗光纤传输后到达接收端。在接收端,光接收机把数字信号从光波中检测出来送给电端机,而电端机再进行数模转换,恢复成原来的信息。这样就完成了一次通信的全过程。

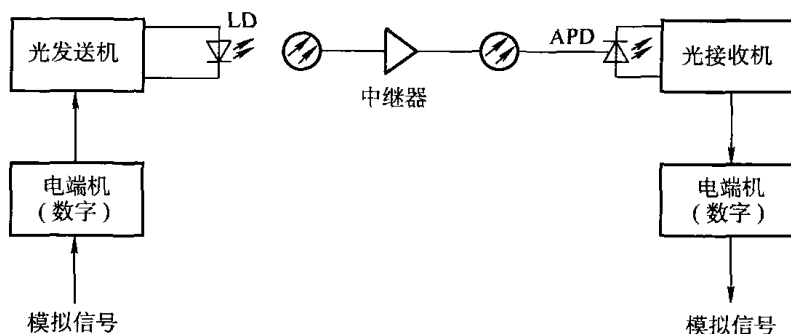


图 1.2 数字光纤通信系统

1.2.2 光纤通信的优点

光纤通信之所以受到人们的极大重视,是因为和其他通信手段相比,光纤通信具有无与伦比的优越性。

1. 通信容量大

从理论上讲,一根仅有头发丝粗细的光纤可以同时传输 1000 亿个话路。虽然目前远远未达到如此高的传输容量,但用一根光纤同时传输 24 万个话路的实验已经取得成功,它比传统的明线、同轴电缆、微波等要高出几十乃至上千倍以上。一根光纤的传输容量如此巨大,而一根光缆中可以包括几十根甚至上千根光纤,如果再加上波分复用技术把一根光纤当做几根、几十根光纤使用,其通信容量之大就更加惊人了。

2. 中继距离长

由于光纤具有极低的损耗系数(目前商用石英光纤已达 0.19dB/km 以下),若配以适当的光发送与光接收设备,可使其中继距离达数百千米以上。这是传统的电缆 (1.5km)、微波 (50km) 等无法与之相比拟的,因此光纤通信特别适用于长途一、二级干线通信。据报导,用一根光纤同时传输 24 万个话路、 100km 无中继的试验已经取得成功。此外,已在进行的光子通信试验,已达到传输 120 万个话路、 6000km 无中继的水平。因此,在不久的将来实现全球无中继的光纤通信是完全可能的。

3. 保密性能好

对通信系统的重要要求之一是保密性好。然而,随着科学技术的发展,电通信方式很容易被人窃听,只要在明线或电缆附近(甚至几千米以外)设置一个特别的接收装置,就可以获取明线或电缆中传送的信息。而光波在光纤中传输时只在其纤芯区进行,基本上没有光

“泄露”出去，因此其保密性能极好。

4. 适应能力强

适应能力强是指不怕外界强电磁场的干扰、耐腐蚀、抗弯性强（弯曲半径大于 25cm 时其性能不受影响）等。

5. 体积小、重量轻、便于施工维护

光纤重量很轻，直径很小，即使做成光缆，在芯数相同的条件下，其重量还是比电缆轻得多，体积也小得多。例如，在美国 A-7 飞机上，用光纤通信代替电缆通信，使飞机重量减轻 27 磅（约 12.247kg），相当于飞机制造成本减少 27 万美元。

光缆的敷设方式方便灵活，既可以直埋、管道敷设，又可采用水底和架空方式敷设。

6. 原材料资源丰富，节约有色金属和能源，潜在价格低廉

制造石英光纤的最基本原材料是二氧化硅（即砂子），而砂子在自然界中几乎是取之不尽、用之不竭的，因此其潜在价格十分低廉。

总之，光纤通信不仅在技术上具有很大的优越性，而且在经济上具有巨大的竞争力，因此其在信息社会中将发挥越来越重要的作用。

1.2.3 基本光纤传输系统

基本光纤传输系统作为独立的“光信道”单元，若配置适当的接口设备，则可以插入现有的数字通信系统或模拟通信系统，有线通信系统或无线通信系统的发射与接收之间。光发射机、光纤线路和光接收机，若配置适当的光器件，可以组成传输能力更强、功能更完善的光纤通信系统。例如，在光纤线路中插入光纤放大器组成光中继长途系统，配置波分复用器和解复用器，组成大容量波分复用系统，使用耦合器或光开关组成无源光网络等。下面简要介绍基本光纤传输系统的 3 个组成部分。

1. 光发射机

光发射机的功能是把输入的电信号转换为光信号，并用耦合技术把光信号最大限度地注入光纤线路。光发射机由光源、驱动器和调制器组成。其中，光源是光发射机的核心。光发射机的性能基本上取决于光源的特性，对光源的要求是输出光功率足够大，调制频率足够高，谱线宽度和光束发散角尽可能小，输出功率和波长稳定，器件寿命长。目前广泛使用的光源有半导体发光二极管（LED）和半导体激光二极管（LD）或称激光器，以及谱线宽度很小的动态单纵模分布反馈（DFB）激光器。有些场合也使用固体激光器，如大功率的掺钕钇铝石榴石（Nd:YAG）激光器。

光发射机把电信号转换为光信号的过程（常简称为电/光或 E/O 转换），是通过电信号对光的调制而实现的。目前有直接调制和间接调制（或称外调制）两种调制方案，如图 1.3 所示。直接调制是用电信号直接调制半导体激光器或发光二极管的驱动电流，使输出光随电信号变化而实现的。这种方案技术简单，成本较低，容易实现，但调制速率受激光器的频率特性所限制。外调制是把激光的产生和调制分开，用独立的调制器调制激光器的输出光而实现的。目前有多种调制器可供选择，最常用的是电光调制器。这种调制器是利用电信号改变电光晶体的折射率，使通过调制器的光参数随电信号变化而实现调制的。外调制的优点是调制速率高，缺点是技术复杂，成本较高，因此只有在大容量的波分复用和相干光通信系统中使用。

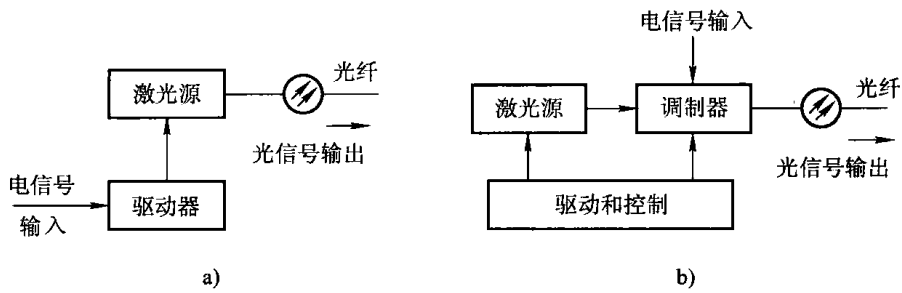


图 1.3 两种调制方案

a) 直接调制 b) 间接调制 (外调制)

对光参数的调制，原理上可以是光强（功率）、幅度、频率或相位调制，但实际上目前大多数光纤通信系统都采用直接光强调制（也称为内调制）。因为幅度、频率或相位调制需要幅度和频率非常稳定。而对于相位和偏振方向可以控制，谱线宽度很窄的单模激光源，可采用外调制方案。

2. 光纤线路

光纤线路的功能是把来自光发射机的光信号，以尽可能小的畸变（失真）和衰减传输到光接收机。光纤线路由光纤、光纤接头和光纤连接器组成。光纤是光纤线路的主体，接头和连接器是不可缺少的器件。实际工程中使用的是容纳多根光纤的光缆。

光纤线路的性能主要由缆内光纤的传输特性决定。对光纤的基本要求是损耗和色散这两个传输特性参数都尽可能地小，而且有足够好的机械特性和环境特性。例如，在不可避免的外力作用下和环境温度改变时，保持传输特性稳定。

目前使用的石英光纤有多模光纤和单模光纤，单模光纤的传输特性比多模光纤好，价格比多模光纤便宜，因而得到更广泛的应用。单模光纤配合半导体激光器，适合大容量长距离光纤传输系统，而小容量短距离系统用多模光纤配合半导体发光二极管更加合适。为适应不同通信系统的需要，已经设计了多种结构不同、特性优良的单模光纤，并成功地投入实际应用。

石英光纤在近红外波段，除杂质吸收峰外，其损耗随波长的增大而减小，在 $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 有 3 个损耗很小的波长窗口。在这 3 个波长的窗口损耗分别小于 2dB/km 、 0.4dB/km 和 0.2dB/km 。石英光纤在波长 $1.31\mu\text{m}$ 色散为零，带宽极大值高达几十 $\text{GHz}\cdot\text{km}$ 。通过光纤设计，可以使零色散波长移到 $1.55\mu\text{m}$ ，实现损耗和色散都最小的色散移位单模光纤；或者设计在 $1.31\sim 1.55\mu\text{m}$ 之间色散变化不大的色散平坦单模光纤等。根据光纤传输特性的特点，光纤通信系统的工作波长都选择在 $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ 或 $1.55\mu\text{m}$ ，特别是 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 应用更加广泛。

因此，作为光源的激光器的发射波长和作为光检测器的光敏二极管的波长响应，都要和光纤这 3 个波长窗口相一致。目前在实验室条件下， $1.55\mu\text{m}$ 的损耗已达到 0.154dB/km ，接近石英光纤损耗的理论极限，因此人们开始研究新的光纤材料。光纤是光纤通信的基础，光纤技术的进步，有力地推动着光纤通信向前发展。

3. 光接收机

光接收机的功能是把从光纤线路输出、产生畸变和衰减的微弱光信号转换为电信号，并经放大和处理后恢复成发射前的电信号。光接收机由光检测器、放大器和相关电路组成，光

检测器是光接收机的核心,对光检测器的要求是响应度高、噪声低和响应速度快。目前广泛使用的光检测器有两种类型:在半导体PN结中加入本征层的PIN光敏二极管(PIN-PD)和雪崩光敏二极管(APD)。

光接收机把光信号转换为电信号的过程(常简称为光/电或O/E转换),是通过光检测器的检测实现的。检测方式有直接检测和外差检测两种。直接检测是用检测器直接把光信号转换为电信号。这种检测方式设备简单、经济实用,是当前光纤通信系统普遍采用的方式。

外差检测要设置一个本地振荡器和一个光混频器,使本地振荡光和光纤输出的信号光在混频器中产生差拍而输出中频光信号,再由光检测器把中频光信号转换为电信号。外差检测方式的难点是需要频率非常稳定、相位和偏振方向可控制,以及谱线宽度很窄的单模激光源,优点是有很高的接收灵敏度。

目前,实用光纤通信系统普遍采用直接调制—直接检测方式。外调制—外差检测方式虽然技术复杂,但是传输速率和接收灵敏度很高,是很有发展前景的通信方式。

光接收机最重要的特性参数是灵敏度。灵敏度是衡量光接收机质量的综合指标,它反映接收机调整到最佳状态时,接收微弱光信号的能力。灵敏度主要取决于组成光接收机的光敏二极管和放大器的噪声,并受传输速率、光发射机的参数和光纤线路的色散的影响,还与系统要求的误码率或信噪比有密切关系。所以灵敏度也是反映光纤通信系统质量的重要指标。

1.3 空间光通信系统

1.3.1 空间光通信概述

当今社会已经进入“信息时代”,以通信技术和计算机技术为标志的高新科技的发展,给人们的生活带来了日新月异的变化,人与人之间的信息传输日趋密切,方式也日趋多样化。然而,随着通信业务量的大量增加,“电波窗口”日益拥挤,卫星通信采用传统的微波通信技术已经不能满足未来军事及商业的需要,如果采用较高的光频段作为信息载体实现卫星通信将使这一问题得到很好的解决。空间光通信与传统的微波通信相比,其显著的优点为:

- 1) 通信容量大。载波频率的增加增大了传输带宽,因此也增加了整个系统的通信容量。
- 2) 体积小。短波长的光通信天线尺寸成倍地减少,设备体积明显减小。
- 3) 功耗低。因为激光的发散角很小,能量高度集中,落在接收机望远镜天线上的功率密度高,发射机的发射功率可大大降低,功耗相对较低。
- 4) 建造经费和维护经费低。空间光通信系统不需要敷设光纤,整个空间光通信系统的造价和建设经费较低。

除以上优点外,空间光通信还具有抗干扰性强和保密性好的优点,因为光通信的传输光束非常窄,接收区域很小,所以很难被探测到。正因为空间光通信具有抗电磁干扰和防窃听的突出特点,可保障天基综合信息网的信息安全传输,所以可应用于军事卫星侦察。星间激光通信具有与其他光学系统兼容性好的特点,应用于星载激光武器系统,可有效提高对激光武器系统的维护和控制能力,同时减轻载荷的重量和体积。随着技术的发展,也可应用到商

业服务行业等。用光实现星间链路、深空探测、平台测控等将给通信领域带来巨大变化。可见，空间光通信具有广阔的发展和前景，是进一步开发宇宙空间的最佳方案，必将成为人类信息传输的必要手段。电子对抗和通信技术的发展，使空间光通信进一步崛起，将成为民用和军用方面通信的重要方式。

1.3.2 空间光通信的定义

空间光通信是指在两个或多个终端之间，利用在空间传输的激光束作为信息载体，实现通信，又称为自由空间光通信（Free Space Optical Communication, FSO）、无线激光通信（Wireless Optical Communication）。环绕地球可以建立的光学空间通信链路有：轨道高度小于1000 km的低轨道卫星（LEO）与36 000 km高的同步轨道上的卫星（GEO）间的轨道间链路（IOL），GEO与GEO间的星间链路，LEO与LEO间的链路，GEO与地面之间的链路，飞机与GEO或LEO之间的链路，飞机与飞机之间的链路，地面间的链路等，如图1.4所示。

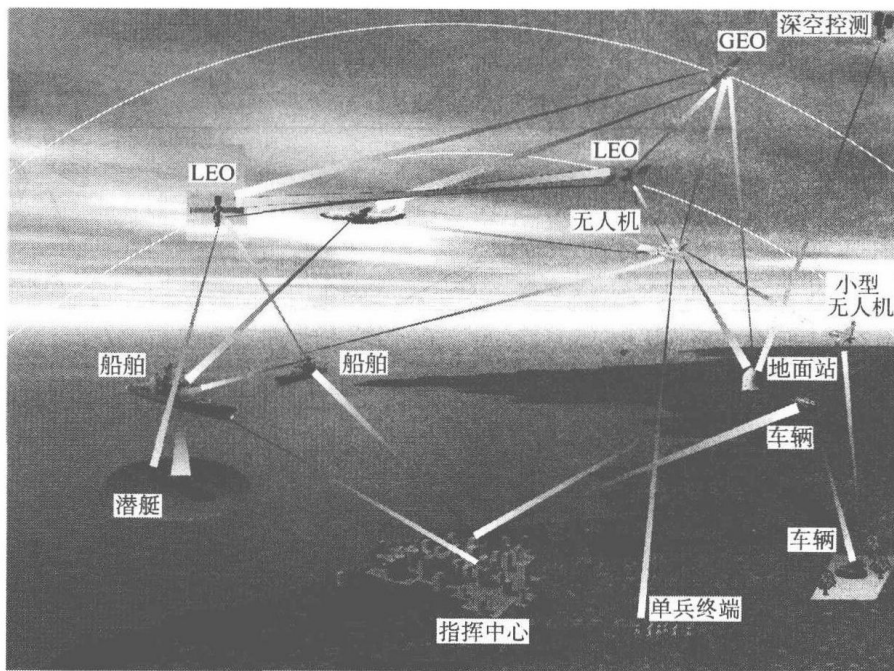


图 1.4 空间光通信网

1.3.3 空间光通信的应用领域

空间光通信系统是构建星际通信链路的先进方案，并可进一步构成宇宙空间宽带网，具有广阔的发展和前景。卫星激光通信的信息传播过程一般是由低轨道卫星将信息传输给数据中转卫星，或将数据传给地面站，或根据低轨道卫星的位置，经第二套激光通信线路传输给另一个数据中转卫星，最后再将数据传输给地面站。这种中转卫星如果是地球同步轨道卫星，则可利用两颗同步轨道卫星实现东、西半球之间的通信。

随着科学技术的发展，探索、开发和利用宇宙的科学任务正在阔步前进。现在宇宙空间已布满了各类星球和飞行器件，包括各类人造地球卫星、航天飞机、空间站及各类其他星