



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光纤通信

(第二版)

刘增基 周洋溢 胡辽林 编著
任光亮 周绮丽



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光 纤 通 信

(第二版)

刘增基 周洋溢 胡辽林 任光亮 周绮丽 编著

西安电子科技大学出版社

2008

内 容 简 介

本书全面地介绍了光纤通信系统的基本组成;光纤和光缆的结构和类型,光纤的传输原理和特性,光纤特性的测量;光源、光检测器和光无源器件的类型、原理和性质;光端机的组成和特性;数字光纤通信系统(PDH和SDH);模拟光纤通信系统,包括副载波复用光纤通信系统;光纤通信的若干新技术,如光纤放大器、光波分复用技术、光交换技术、光孤子通信、相干光通信技术、光时分复用技术等;光纤通信网络,包括单波长的SDH传送网,多波长的WDM全光网和光接入网。本书在内容上力求理论上的系统性以及技术上的新颖性和实用性。

本书系普通高等教育“十一五”国家级规划教材,可作为通信类专业的大学本科生或研究生教材,也可作为相关科技工作者的参考用书。

★本书配有电子教案,使用教材的学校可免费索取。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信/刘增基等编著. —2版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2008.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5606-1029-0

I. 光… II. 刘… III. 光纤通信—高等学校—教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 091006 号

责任编辑 杨宗周 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com>

E-mail: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印 刷 西安文化彩印厂

版 次 2008年12月第2版 2008年12月第16次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 16

字 数 377千字

印 数 108 001~112 000册

定 价 23.00元

ISBN 978-7-5606-1029-0/TN·0178

XDUP 1300022-16

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

第二版前言

本教材第一版系按原电子工业部的《1996~2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由通信与信息工程专业教学指导委员会编审、推荐并出版。本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是2001年版《光纤通信》的修订版。

多年来本教材在全国范围内得到了较广泛的使用，具有系统性、完整性、简明性及一定的先进性等特点，适合于相关专业的本科生使用。但随着时间的流逝，第一版中的部分内容已不适应教学要求，同时在教学实施过程中也暴露了教材中存在的错误和不足之处。为满足当前教学的需要，笔者对第一版进行了修订。修订版在继承原版教材优点的基础上做了不少修改和补充，并改正了原版教材的多处错误和不够贴切的叙述，加强了光接收机中各种噪声的讨论，给出了噪声的完整计算公式，从而为不同条件下光接收机灵敏度的计算打下基础。同时在每章的章末增加了小结，补充和修改了习题和思考题，还在书末给出了习题和思考题的参考答案。

在此，感谢西安电子科技大学通信工程学院师生们的支持和帮助，特别感谢任课老师鲍民权、姚明悟、尚韬等提供的宝贵意见，还要感谢综合业务网理论及关键技术国家重点实验室的支持和帮助。

由于编者水平所限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2008年8月

第一版出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作，根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》，我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社，各专业教学指导委员会，在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上，根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求，编制了《1996~2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报，经各学校、出版社推荐，由各专业教学指导委员会评选，并由我们与各专指委、出版社协商后审核确定的。本轮规划教材的编制，注意了将教学改革力度较大、有创新精神、有特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需、尚无正式教材的选题优先列于规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时，选择了一批对学科发展具有重要意义，反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划，以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足，希望使用教材的学校、教师、学生和其他广大读者积极提出批评和建议，以不断提高教材的编写、出版质量，共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 光纤通信发展的历史和现状	1
1.1.1 探索时期的光通信	1
1.1.2 现代光纤通信	2
1.1.3 国内外光纤通信发展的现状	3
1.2 光纤通信的优点和应用	4
1.2.1 光通信与电通信	4
1.2.2 光纤通信的优点	5
1.2.3 光纤通信的应用	8
1.3 光纤通信系统的基本组成	8
1.3.1 发射和接收	9
1.3.2 基本光纤传输系统	9
1.3.3 数字通信系统和模拟通信系统	11
小结	13
习题与思考题	13
第 2 章 光纤和光缆	14
2.1 光纤结构和类型	14
2.1.1 光纤结构	14
2.1.2 光纤类型	14
2.2 光纤传输原理	16
2.2.1 几何光学方法	16
2.2.2 光纤传输的波动理论	20
2.3 光纤传输特性	26
2.3.1 光纤色散	27
2.3.2 光纤损耗	32
2.3.3 光纤标准和应用	34
2.4 光缆	35
2.4.1 光缆基本要求	36
2.4.2 光缆结构和类型	37
2.4.3 光缆特性	39
2.5 光纤特性测量方法	39
2.5.1 损耗测量	40
2.5.2 带宽测量	42
2.5.3 色散测量	43
2.5.4 截止波长测量	44

小结	45
习题与思考题	45
第 3 章 通信用光器件	48
3.1 光源	48
3.1.1 半导体激光器工作原理和基本结构	48
3.1.2 半导体激光器的主要特性	53
3.1.3 分布反馈激光器	56
3.1.4 发光二极管	57
3.1.5 半导体光源一般性能和应用	59
3.2 光检测器	60
3.2.1 光电二极管工作原理	60
3.2.2 PIN 光电二极管	61
3.2.3 雪崩光电二极管(APD)	64
3.2.4 光电二极管一般性能和应用	66
3.3 光无源器件	67
3.3.1 连接器和接头	67
3.3.2 光耦合器	68
3.3.3 光隔离器和光环行器	72
3.3.4 光调制器	74
3.3.5 光开关	74
小结	75
习题与思考题	76
第 4 章 光端机	78
4.1 光发射机	78
4.1.1 光发射机基本组成	78
4.1.2 调制特性	79
4.1.3 调制电路和自动功率控制	81
4.1.4 温度特性和自动温度控制	83
4.2 光接收机	85
4.2.1 光接收机基本组成	85
4.2.2 噪声特性	86
4.2.3 误码率	88
4.2.4 灵敏度	89
4.2.5 自动增益控制和动态范围	93
4.3 线路编码	93
4.3.1 扰码	94
4.3.2 $mBnB$ 码	94
4.3.3 插入码	98
小结	100
习题与思考题	101

第 5 章 数字光纤通信系统	102
5.1 两种传输体制	102
5.1.1 准同步数字系列 PDH	102
5.1.2 同步数字系列 SDH	103
5.2 系统的性能指标	109
5.2.1 参考模型	109
5.2.2 系统的主要性能指标	110
5.2.3 可靠性	114
5.3 系统的设计	115
5.3.1 中继距离受损耗的限制	116
5.3.2 中继距离受色散(带宽)的限制	117
5.3.3 中继距离和传输速率	119
小结	121
习题与思考题	121
第 6 章 模拟光纤通信系统	123
6.1 调制方式	123
6.1.1 模拟基带直接光强调制	123
6.1.2 模拟间接光强调制	123
6.1.3 频分复用光强调制	124
6.2 模拟基带直接光强调制光纤传输系统	125
6.2.1 特性参数	125
6.2.2 光端机	129
6.2.3 系统性能	130
6.3 副载波复用光纤传输系统	132
6.3.1 特性参数	132
6.3.2 光端机	138
6.3.3 光链路性能	141
小结	142
习题与思考题	143
第 7 章 光纤通信新技术	145
7.1 光纤放大器	145
7.1.1 掺铒光纤放大器工作原理	145
7.1.2 掺铒光纤放大器的构成和特性	146
7.1.3 掺铒光纤放大器的优点和应用	148
7.2 光波分复用技术	149
7.2.1 光波分复用原理	149
7.2.2 WDM 传输系统的基本结构	152
7.2.3 WDM 技术的主要特点	153
7.2.4 光滤波器与光波分复用器	154
7.3 光交换技术	166

7.3.1 空分光交换	166
7.3.2 时分光交换	167
7.3.3 波分光交换	168
7.4 光孤子通信	168
7.4.1 光孤子的形成	169
7.4.2 光孤子通信系统的构成和性能	171
7.5 相干光通信技术	172
7.5.1 相干检测原理	172
7.5.2 调制与解调	174
7.5.3 误码率和接收灵敏度	176
7.5.4 相干光系统的优点和关键技术	179
7.6 光时分复用技术	179
7.7 波长变换技术	180
小结	181
习题与思考题	182
第 8 章 光纤通信网络	183
8.1 通信网的发展趋势	183
8.2 SDH 传送网	184
8.2.1 SDH 传送网的功能结构	184
8.2.2 SDH 网的物理拓扑	187
8.2.3 自愈网	188
8.3 WDM 光网络	191
8.3.1 光传送网的分层结构	192
8.3.2 光分插复用器	192
8.3.3 光交叉连接器	195
8.3.4 WDM 光网络示例	198
8.4 光接入网	199
8.4.1 光接入网概述	199
8.4.2 无源光网络	201
8.4.3 有源光网络	204
8.4.4 光纤同轴电缆混合网	206
小结	208
附录 A SDH 系统光接口标准	209
附录 B PDH 系统光线路设备的实例	214
附录 C VSB-AM/SCM 系统光链路性能实例	215
习题与思考题答案(参考)	218
参考文献	248

第 1 章 概 论

本章回顾了光纤通信发展的历史,并介绍了光纤通信的优点、应用领域和发展现状;给出了光纤通信系统的基本组成,并且简单介绍了其主要部件的功能和所用的关键器件。

1.1 光纤通信发展的历史和现状

1.1.1 探索时期的光通信

中国古代用“烽火台”报警,欧洲人用旗语传送信息,这些都可以看做是原始形式的光通信。望远镜的出现,又极大地延长了这种目视光通信的距离。

1880 年,美国人贝尔(Bell)发明了用光波作载波传送话音的“光电话”。这种光电话利用太阳光或弧光灯作光源,通过透镜把光束聚焦在送话器前的振动镜片上,使光强度随话音的变化而变化,实现话音对光强度的调制。在接收端,用抛物面反射镜把从大气传来的光束反射到硅光电池上,使光信号变换为电流,传送到受话器。由于当时没有理想的光源和传输介质,这种光电话的传输距离很短,并没有实际应用价值,因而进展很慢。然而,光电话仍是一项伟大的发明,它证明了用光波作为载波传送信息的可行性。因此,可以说贝尔光电话是现代光通信的雏形。

1960 年,美国人梅曼(Maiman)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。激光是一种高度相干光,它的特性和无线电波相似,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 年的光通信进入一个崭新的阶段。

在这个时期,美国麻省理工学院利用 He-Ne 激光器和 CO₂ 激光器进行了大气激光通信试验。实验证明:用承载信息的光波,通过大气的传播,实现点对点的通信是可行的,但是通信能力和质量受气候影响十分严重。由于雨、雾、雪和大气灰尘的吸收和散射,光波能量衰减很大。例如,暴雨能造成 3~12 dB/km 的衰减,浓雾衰减高达 60~200 dB/km。另一方面,大气的密度和温度不均匀,造成折射率的变化,使光束位置发生偏移。因而通信的距离和稳定性都受到极大的限制,不能实现“全天候”通信。虽然,固体激光器(例如掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器)的发明大大提高了发射光功率,延长了传输距离,使大气激光通信可以在江河两岸、海岛之间和某些特定场合使用,但是大气激光通信的稳定性和可靠性仍然没有解决。

为了克服气候对激光通信的影响,人们自然想到把激光束限制在特定的空间内传输,因而提出了透镜波导和反射镜波导的光波传输系统。透镜波导是在金属管内每隔一定距离安装一个透镜,每个透镜把经传输的光束会聚到下一个透镜而实现的。反射镜波导和透镜波导相似,是用与光束传输方向成 45° 角的两个平行反射镜代替透镜而构成的。这两种波导,从理论上讲是可行的,但在实际应用中遇到了不可克服的困难。首先,现场施工中校准和安装十分复杂;其次,为了防止地面活动对波导的影响,必须把波导深埋或选择在人车稀少的地区使用。

由于没有找到稳定可靠和低损耗的传输介质,对光通信的研究曾一度走入了低谷。

1.1.2 现代光纤通信

1966年,英籍华裔学者高锟(C. K. Kao)和霍克哈姆(C. A. Hockham)发表了关于传输介质新概念的论文,指出了利用光纤(Optical Fiber)进行信息传输的可能性和技术途径,奠定了现代光通信——光纤通信的基础。当时石英纤维的损耗高达 1000 dB/km 以上,高锟等人指出:这样大的损耗不是石英纤维本身固有的特性,而是由于材料中的杂质,例如过渡金属(Fe、Cu等)离子的吸收产生的。材料本身固有的损耗基本上由瑞利(Rayleigh)散射决定,它随波长的四次方而下降,其损耗很小。因此有可能通过原材料的提纯制造出适合于长距离通信使用的低损耗光纤。如果把材料中金属离子含量的比重降低到 10^{-6} 以下,就可以使光纤损耗减小到 10 dB/km 。再通过改进制造工艺的热处理提高材料的均匀性,可以进一步把损耗减小到几 dB/km 。这个思想和预测受到世界各国极大的重视。

1970年,光纤研制取得了重大突破。在当年,美国康宁(Corning)公司就研制成功损耗 20 dB/km 的石英光纤。它的意义在于:使光纤通信可以和同轴电缆通信竞争,从而展现了光纤通信美好的前景,促进了世界各国相继投入大量人力物力,把光纤通信的研究开发推向一个新阶段。1972年,康宁公司高纯石英多模光纤损耗降低到 4 dB/km 。1973年,美国贝尔(Bell)实验室取得了更大成绩,光纤损耗降低到 2.5 dB/km 。1974年降低到 1.1 dB/km 。1976年,日本电报电话(NTT)公司等单位将光纤损耗降低到 0.47 dB/km (波长 $1.2\text{ }\mu\text{m}$)。在以后的10年中,波长为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤损耗:1979年是 0.20 dB/km ,1984年是 0.157 dB/km ,1986年是 0.154 dB/km ,接近了光纤最低损耗的理论极限。

1970年,作为光纤通信用的光源也取得了实质性的进展。当年,美国贝尔实验室、日本电气公司(NEC)和当时的苏联先后突破了半导体激光器在低温(-200°C)或脉冲激励条件下工作的限制,研制成功室温下连续振荡的镓铝砷(GaAlAs)双异质结半导体激光器(短波长)。虽然寿命只有几个小时,但其意义是重大的,它为半导体激光器的发展奠定了基础。1973年,半导体激光器寿命达到7000小时。1977年,贝尔实验室研制的半导体激光器寿命达到10万小时(约11.4年),外推寿命达到100万小时,完全满足实用化的要求。在这个期间,1976年日本电报电话公司研制成功发射波长为 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 的铟镓砷磷(InGaAsP)激光器,1979年美国电报电话(AT&T)公司和日本电报电话公司研制成功发射波长为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 的连续振荡半导体激光器。

由于光纤和半导体激光器的技术进步,使1970年成为光纤通信发展的一个重要年份。

1976年,美国在亚特兰大(Atlanta)进行了世界上第一个实用光纤通信系统的现场试验,系统采用GaAlAs激光器作光源,多模光纤作传输介质,速率为 44.7 Mb/s ,传输距离

约 10 km。1980 年,美国标准化 FT-3 光纤通信系统投入商业应用,系统采用渐变型多模光纤,速率为 44.7 Mb/s。随后美国很快敷设了东西干线和南北干线,穿越 22 个州,光缆总长达 5×10^4 km。1976 年和 1978 年,日本先后进行了速率为 34 Mb/s,传输距离为 64 km 的突变型多模光纤通信系统,以及速率为 100 Mb/s 的渐变型多模光纤通信系统的试验。1983 年敷设了纵贯日本南北的光缆长途干线,全长 3400 km,初期传输速率为 400 Mb/s,后来扩容到 1.6 Gb/s。随后,由美、日、英、法发起的第一条横跨大西洋 TAT-8 海底光缆通信系统于 1988 年建成,全长 6400 km;第一条横跨太平洋 TPC-3/HAW-4 海底光缆通信系统于 1989 年建成,全长 13 200 km。从此,海底光缆通信系统的建设得到了全面展开,促进了全球通信网的发展。

自从 1966 年高锟提出光纤作为传输介质的概念以来,光纤通信从研究到应用,发展非常迅速:技术上不断更新换代,通信能力(传输速率和中继距离)不断提高,应用范围不断扩大。光纤通信的发展可以粗略地分为四个阶段:

第一阶段(1966~1976 年),这是从基础研究到商业应用的开发时期。在这个时期,实现了短波长($0.85 \mu\text{m}$)低速率(45 或 34 Mb/s)多模光纤通信系统,无中继传输距离(即中继器之间的间距,简称中继距离)约 10 km。

第二阶段(1976~1986 年),这是以提高传输速率和增加传输距离为研究目标和大力推广应用的大发展时期。在这个时期,光纤从多模发展到单模,工作波长从短波长($0.85 \mu\text{m}$)发展到长波长($1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$),实现了工作波长为 $1.31 \mu\text{m}$ 、传输速率为 140~565 Mb/s 的单模光纤通信系统,无中继传输距离为 50~100 km。

第三阶段(1986~1996 年),这是进一步提高传输速率、增加传输距离并全面深入开展新技术研究的时期。在这个时期,实现了 $1.55 \mu\text{m}$ 色散移位单模光纤通信系统。采用外调制技术,传输速率可达 2.5~10 Gb/s,中继传输距离可达 100~150 km。实验室可以达到更高水平。

第四阶段(1996 年至今)实现了超大容量的波分复用(WDM, Wavelength Division Multiplexing,)光纤通信系统及基于 WDM 和波长选路的光网络;正在研究超长距离的光孤子(Soliton)通信系统(将在第 7 章作介绍)。

1.1.3 国内外光纤通信发展的现状

1976 年,美国在亚特兰大进行的现场试验,标志着光纤通信从基础研究发展到了商业应用的新阶段。此后,光纤通信技术不断创新:光纤从多模发展到单模,工作波长从 $0.85 \mu\text{m}$ 发展到 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$,传输速率从几十 Mb/s 发展到几十 Gb/s。另一方面,随着技术的进步和大规模产业的形成,光纤价格不断下降,应用范围不断扩大:从初期的本地电话网的局间中继线到长途干线进一步延伸到用户接入网,从数字电话到有线电视(CATV),从单一类型信息的传输到多种业务的传输。目前光纤已成为信息宽带传输的主要媒质,光纤通信系统将成为未来国家信息基础设施的支柱。

在许多发达国家,生产光纤通信产品的行业已在国民经济中占重要地位。根据资料,仅光缆产品一项(约占整个光纤通信产品的一半),1995 年在世界市场销售额达 80 亿美元,2000 年达 180 亿美元,5 年中复合年增长率(CAGR)为 17.6%。世界成缆光纤市场销售量,1994 年为 1810×10^4 km,2001 年为 6570×10^4 km,7 年中 CAGR 为 20%,每年数据

见表 1.1。市场销售额和市场销售量的年增长率不同，主要是由于光纤价格呈下降趋势，见表 1.2。在 1995 年光缆市场销售额的 80 亿美元中，单模占 59 亿美元，为 74%。同年成缆光纤销售量的 2300×10^4 km 中，单模为 2130×10^4 km，占 93%。两者的比例不同，是由于单模光纤比多模光纤便宜的结果。

表 1.1 世界成缆光纤市场销售量

年 份	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
光纤销售总长度/ 10^4 km	1810	2300	2900	3470	4070	4730	5580	6570

表 1.2 世界市场单模光纤平均价格

年 份	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
价格/(\$/km)	68	67	72	69	60	52	46	44

到 1998 年底，仅单模光纤的销售量就达到 4110×10^4 km，见表 1.3。随着光纤产量的增加，价格逐年下降，促进了光纤在各个领域的应用和新技术的研究，推动着光纤产业不断向前发展。

表 1.3 世界成缆单模光纤市场实际销售量

年 份	1998	1999	2000	2001	2002	2003
光纤销售总长度/ 10^4 km	4110	4600	5350	6230	7200	8110

1998 年我国国内公共电信网形成了连接全国各省市区的“八横八纵”光缆骨干传输网，标志着传输网的技术和规模进入世界先进行列。在光纤光缆方面，从 1995 年起，我国在全球光纤光缆市场中一直居第三位，年增长率在 20% 左右。截止 2002 年 3 月底，我国敷设光缆的总长度超过 1.8×10^6 km，平均光缆的纤芯数为 36，其中长途线路为 35.4×10^4 km，接入光缆线路为 39.2×10^4 km，本地光缆线路为 104.7×10^4 km。2006 年我国研制成功每波长 40 Gb/s，80 个波长的 WDM 长途光纤传输系统。

1.2 光纤通信的优点和应用

1.2.1 光通信与电通信

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。通信技术发展的历史，实际上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，光纤通信的载波是光波。虽然光波和电波都是电

磁波,但是频率差别很大。光纤通信用的近红外光(波长约 $1\text{ }\mu\text{m}$)的频率(约 300 THz)比微波(波长为 $0.1\text{ m}\sim 1\text{ mm}$)的频率($3\sim 300\text{ GHz}$)高 3 个数量级以上。为便于比较,图 1.1 给出了相关部分的电磁波频谱。光纤通信用的近红外光(波长为 $0.7\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$)频带宽度约为 200 THz ,在常用的 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 两个波长窗口频带宽度也在 20 THz 以上。由于光源和光纤特性的限制,目前,采用光强度调制的单载波信号的带宽一般只有 20 GHz ,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。图 1.2 给出各种传输线路的损耗特性。

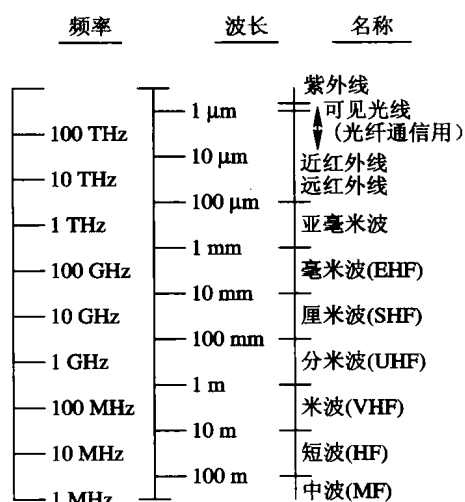


图 1.1 部分电磁波频谱

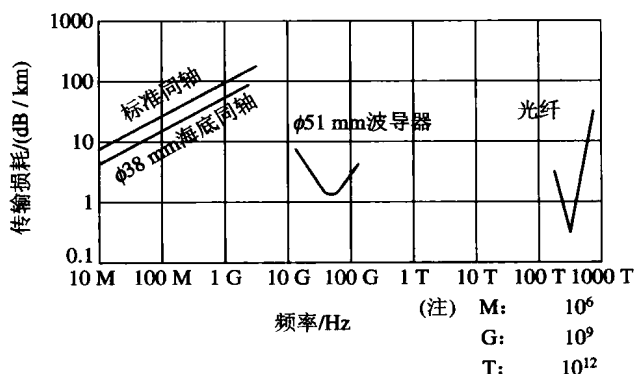


图 1.2 各种传输线路的损耗特性

1.2.2 光纤通信的优点

在光纤通信系统中,作为载波的光波频率比电波频率高得多,而作为传输介质的光纤又比同轴电缆或波导管的损耗低得多,因此相对于电缆通信或微波通信,光纤通信具有许多独特的优点。

1. 容许频带很宽,传输容量很大

光纤通信系统的容许频带(带宽)取决于光源的调制特性、调制方式和光纤的色散特性。石英单模光纤在 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 波长具有零色散特性,通过光纤的设计,还可以把零色散波

长移到 1.55 μm 。在零色散波长窗口，单模光纤都具有几十 $\text{GHz} \cdot \text{km}$ 的带宽距离积。另一方面，可以采用多种复用技术来增加传输容量。最简单的是空分复用，因为光纤很细，外径只有 125 μm ，一根光缆可以容纳几百根光纤， $12 \times 12 = 144$ 根光纤的带状光缆早已实现。这种方法使线路传输容量成百倍地增加。就单根光纤而言，采用波分复用(WDM)或光频分复用(OFDM)是增加光纤通信系统传输容量最有效的方法。另一方面，减小光源谱线宽度和采用外调制方式，也是增加传输容量的有效方法。

为了与同轴电缆通信和微波无线电通信比较，表 1.4 列出早已实现的单一波长光纤通信系统的传输容量和中继距离。

表 1.4 光纤通信与电缆或微波通信传输能力的比较

通信手段	传输容量(话路)/条	中继距离/km	1000 km 内中继器个数
微波无线电	960	50	20
小同轴	960	4	250
中同轴	1800	6	166
光缆	1920	30	33
光缆	14 000(1 Gb/s)	84	11
光缆	6000(445 Mb/s)	134	7

目前，单波长光纤通信系统的传输速率一般为 2.5 Gb/s 和 10 Gb/s。采用外调制技术，传输速率可以达到 40 Gb/s。波分复用(WDM)和光时分复用(TDM)更是极大地增加了传输容量，见表 1.5。例如 NEC 公司的 WDM 系统为 132 个波长信道，传输容量为 $20 \text{ Gb/s} \times 132 = 2640 \text{ Gb/s}$ ，相当于 120 km 的距离传输了 3.3×10^8 条话路。

表 1.5 WDM 和 TDM 光纤通信试验系统的传输能力

复用技术	传输容量/(Gb/s)	中继距离/km	跨距/km	研制单位	备注
WDM	20×17	150	50	AT&T	
	20×132	120		NEC	
TDM	160	200	50 140	NTT	单通道 环测
	20	10^3		NTT	
	20	10^6		法 Telcom	

2. 损耗很小，中继距离很长且误码率很小

石英光纤在 1.31 μm 和 1.55 μm 波长，传输损耗分别为 0.50 dB/km 和 0.20 dB/km，甚至更低。因此，用光纤比用同轴电缆或波导管的中继距离长得多，见表 1.4。目前，采用外调制技术，波长为 1.55 μm 的色散移位单模光纤通信系统，若其传输速率为 2.5 Gb/s，则中继距离可达 150 km；若其传输速率为 10 Gb/s，则中继距离可达 100 km。采用光纤放大器、色散补偿光纤，中继距离还可增加，见表 1.5。而且，在表 1.5 中所列的中继距离下，传输的误码率极低(10^{-9} 甚至更小)。

传输容量大、传输误码率低、中继距离长的优点，使光纤通信系统不仅适合于长途干线网，而且适合于接入网的使用，这也是降低每公里话路的系统造价的主要原因。

3. 重量轻、体积小

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。表 1.6 给出了铝/聚乙烯粘结护套(LAP)单元结构光缆和标准同轴电缆的重量和截面积的比较。

表 1.6 光缆和电缆的重量和截面积比较

项 目	8 芯		18 芯	
	光 缆	电 缆	光 缆	电 缆
重量/(kg/m)	0.42	6.3	0.42	11
重量比	1	15	1	26
直径/mm	21	47	21	65
截面积比	1	5	1	9.6

通信设备的重量和体积对许多领域特别是军事、航空和宇宙飞船等方面的应用，具有特别重要的意义。在飞机上用光纤代替电缆，不仅降低了通信设备的成本，而且降低了飞机的制造成本。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 12.247 kg)，相当于飞机制造成本减少 27 万美元。

此外，利用光缆体积小特点，在市话中继线中成功地解决了地下管道拥挤问题。

4. 抗电磁干扰性能好

光纤由电绝缘的石英材料制成，光纤通信线路不受普通高、低频电磁场的干扰和闪电雷击的损坏。无金属光缆非常适合于存在强电磁场干扰的高压电力线路周围和油田、煤矿等易燃易爆环境中使用。光纤(复合)架空地线(OPGW, Optical Fiber Overhead Ground Wire)是光纤与电力输送系统的地线组合而成的通信光缆，已在电力系统的通信中发挥重要作用。

5. 泄漏小，保密性能好

在光纤中传输的光泄漏非常微弱，即使在弯曲地段也无法窃听。没有专用的特殊工具，光纤不能分接，因此信息在光纤中传输非常安全。保密性能好的这一特点，对军事、政治和经济都有重要的意义。

6. 节约金属材料，有利于资源合理使用

制造同轴电缆和波导管的铜、铝、铅等金属材料，在地球上的储存量是有限的；而制造光纤的石英(SiO₂)在地球上取之不尽的材料。制造 8 km 管中同轴电缆，1 km 需要 120 kg 铜和 500 kg 铝；而制造 8 km 光纤只需 320 g 石英。所以，推广光纤通信，有利于地球资源的合理使用。

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能

力, 因此其在信息社会中将发挥越来越重要的作用。图 1.3 给出了各种通信系统相对造价与传输容量(话路数)的关系。由图 1.3 可见, 随着传输容量的增加, 由于采用了新的传输媒质, 使得相对造价直线下降。

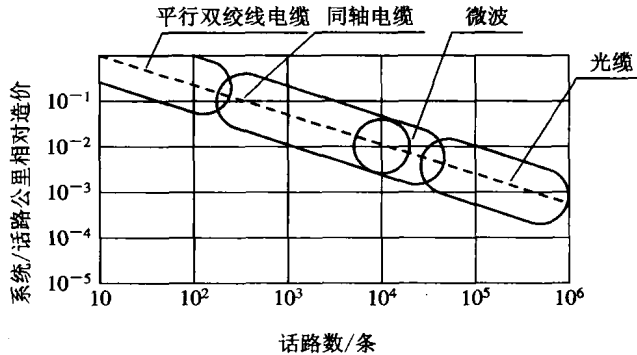


图 1.3 各种通信系统相对造价与传输容量的比较

1.2.3 光纤通信的应用

光纤可以传输数字信号, 也可以传输模拟信号。光纤在通信网、广播电视网与计算机网, 以及在其它数据传输系统中, 都得到了广泛应用。光纤宽带干线传送网和接入网发展迅速, 是当前研究开发应用的主要目标。光纤通信的各种应用可概括如下:

(1) 通信网, 包括全球通信网(如横跨大西洋和太平洋的海底光缆和跨越欧亚大陆的洲际光缆干线)、各国的公共电信网(如我国的国家一级干线、各省二级干线和县以下的支线)、各种专用通信网(如电力、铁道、国防等部门通信、指挥、调度、监控的光缆系统)、特殊通信手段(如石油、化工、煤矿等部门易燃易爆环境下使用光缆, 以及飞机、军舰、潜艇、导弹和宇宙飞船内部的光缆系统)。

(2) 计算机局域网和广域网, 如光纤以太网、互联网路由器之间的光纤高速传输链路。

(3) 有线电视网的干线和分配网; 工业电视系统, 如工厂、银行、商场、交通和公安部门的监控; 自动控制系统的数据传输。

(4) 综合业务光纤接入网, 分为有源接入网和无源接入网, 可实现电话、数据、视频(会议电视、可视电话等)及多媒体业务综合接入核心网, 提供各种各样的社区服务。

1.3 光纤通信系统的基本组成

光纤通信系统可以传输数字信号, 也可以传输模拟信号。用户要传输的信息多种多样, 一般有话音、图像、数据或多媒体信息。为叙述方便, 这里仅以数字电话和模拟电视为例。图 1.4 示出单向传输的光纤通信系统, 包括发射、接收和作为广义信道的基本光纤传输系统。