

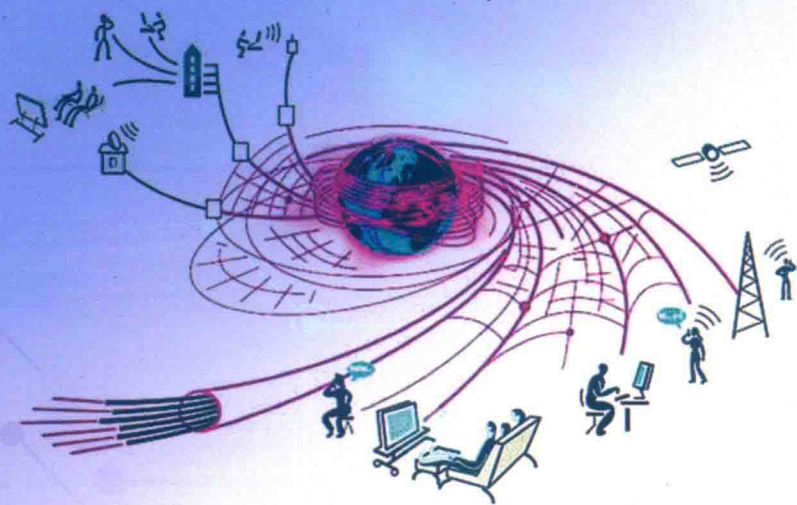
WUTP

普通高等学校教材

Principle of Optical Fiber Communications

光纤通信原理

编 著 胡先志 杨 博



武汉理工大学出版社

普通高等学校教材

光纤通信原理

胡先志 杨 博 编著

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 提 要

本书系统而全面地阐述了光纤通信基本原理、关键光器件、系统组成和光网络应用,主要内容包括光纤传输理论、光纤结构、光纤传输性能,常用光缆结构及其特点,半导体激光二极管结构、原理与性能,光发射模块的组成与工作原理,半导体光检测器结构、原理与性能,光接收模块的组成与工作原理,光纤通信系统的基本组成、工作原理和系统性能,光网络组网关键光器件,波分复用传输系统工作原理、关键技术和应用实例,光网络的演进,光传送网、自动交换光网络、分组传送网、接入光网络的组成、关键技术及其应用和光纤通信技术前沿研究等。

本书的特点是:一、**内容新颖**。书中所阐述的光纤、光缆、关键光器件、传输系统、光网络和光纤通信技术前沿研究等内容都取材于国内外的最新研究成果;二、**图文并茂**。作者试图以清晰简练的文字和直观形象的图表,便于读者轻松地掌握所学内容,享受学习过程的快乐;三、**实用性强**。书中注意清晰地叙述光纤通信的基本概念、基本原理和关键技术,同时也列举了一些光纤传输系统和光网络应用实例,以彰显理论与实际相结合的特色;四、**目的明确**。本书是专门为通信工程、电子信息工程、应用电子技术、光信息科学与技术等专业大学本科撰写的光纤通信原理专业课教材,也可以用作光纤通信领域中的科技工作者参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信原理/胡先志,杨博编著. —武汉:武汉理工大学出版社, 2019.8
ISBN 978-7-5629-6108-6

I. ①光… II. ①胡… ②杨… III. ①光纤通信-高等学校-教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 166905 号

项目负责:黄 春 责任编辑:黄 春 黄 鑫
责任校对:夏冬琴 装帧设计:博壹臻远
出版发行:武汉理工大学出版社
 武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070
 http://www.wutp.com.cn 理工图书网
 E-mail:chenjd@whut.edu.cn

经 销 者:各地新华书店
印 刷 者:武汉市宏达盛印务有限公司
开 本:889×1194 1/16
印 张:20
字 数:492 千字
版 次:2019 年 8 月第 1 版
印 次:2019 年 8 月第 1 次印刷
定 价:78.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87515798 87165708

序 言

自 1966 年华裔科学家高锟博士与 George A. Hockham 共同提出,利用石英玻璃纤维(简称光纤)传送光信号进行光纤通信的设想以来,在过去的 52 年中,光纤传输系统从准同步数字体系、同步数字体系、波分复用系统到数字相干光纤传输系统的演进,促进了光网络从业务固定配置的同步数字体系传送网,波长调度的波分复用传送网,大颗粒业务配置和强大管理的光传送网,具有动态、自动实现传送、交换和建立连接功能的自动交换光网络发展到业务灵活调度、网络集中控制的软件定义的光网络。

现在,采用无机硅原料制造光纤,既提高了光纤生产效率,又解决了环境污染问题。光纤光缆已经成为使光信号实现高速率、大容量、长距离传输的最佳介质。利用高阶调制编码、空分复用光纤(多芯光纤、少模光纤、多芯-少模光纤)、相干检测和数字信号处理技术,可以构筑传输容量 100Tbit/s 以上的超高速率、超大容量、超长距离、超高频谱效率的光纤传输系统。互联网+、物联网、云计算和大数据中心逐渐成为网络的发展核心。终端用户的带宽和流量高速增长,推动了光纤接入网的快速发展。在光纤到户的宽带接入环境下,用户可以轻松而快捷地享受高清晰数字电视、5G 宽带移动通信、虚拟现实游戏等内容丰富、高质量的宽带服务。今天,在全世界范围内已经构建的拥有巨大传输容量的光网络,为与日俱增的信息流量提供了宽阔、可靠的传送平台,而且光网络资源调度已经从固定配置向着动态智能软件定义光网络发展。

本书作者拥有 30 多年的光纤通信科研与教学工作经历,通过阅读大量的国内外最新研究文献,再凭借他们具有的编写过多本教材和学术著作的经验,撰写了这本适用于通信工程和电子信息工程等专业的本科生教材。这本教材在阐述了光纤传输理论、光纤传输系统和光网络等方面的基本概念、基本原理、关键技术和网络应用实例的基础上,同时也简要介绍了光纤通信技术前沿研究热点,是一本内容丰富、技术新颖、实用性强的本科教材。我相信,这本教材的顺利出版,将会为我国培养光纤通信技术人才做出积极的贡献。

是为序。

中国工程院院士

赵梓森

2018 年 6 月 17 日

前 言

21 世纪,人类社会已经跨入了光子信息时代。信息的产生、传输、交换几乎都是在由光而生、因光而成、为光而造,以光速在全世界传播。光活跃在通信世界中,光穿越了光网络各根光纤纤芯,光照亮了各个用户连接点。光纤通信意味着通信世界已经迈入光子天地。光纤通信技术的演进是建立在微电子、光电子、光子器件、数字信号处理、通信系统、计算机硬件、计算机软件、通信网络等相关技术和产品突破基础上的进步。例如,通信技术由电(信)通信到光纤通信的根本原因是,人们对于信息交换需求的增长,高带宽业务的不断诞生。人们利用无质量、无源传播的光子建立无限带宽光纤通信系统代替现有的电子通信系统。在世界进入光纤通信之后,光网络为开发人类智慧、推动社会文明需要进行的超级信息交流创造了必要的条件。光纤通信技术遵循一条萌发创新科学思想,努力科研研究,推动技术进步的发展道路。

1966 年,华裔科学家高锟博士,针对电信号本身存在的问题,提出了用玻璃纤维作为光波导的光(纤)通信理论。光(纤)通信就是用光纤代替铜导线作为信号传输介质,光纤通信具有巨大的可用带宽,可以实现海量通信,从而推动了通信领域的一场技术革命,即由电(通)信进入光纤通信。鉴于高锟博士将人类带入信息社会所做出的卓越贡献,这位“世界光纤之父”于 2009 年 10 月 6 日荣获世界科学最高奖——诺贝尔物理学奖。

1970 年是光纤通信元年。在这一年,美国康宁公司研制出了衰减系数为 20dB/km 的石英玻璃光纤。美国和日本的研究人员同时开发出了可以在室温下连续工作的半导体激光器。巨大带宽的光纤和容易调制的半导体激光器光源,为光纤通信进入试验和实用化奠定了基础。1976 年,世界第一个传输速率为 44.7Mbit/s 的光纤通信在美国亚特兰大顺利完成现场实验。

1985 年,美国贝尔实验室提出了同步数字传送体系标准。该标准由基本网元、光纤线路和网络管理系统共同组成光传输网络。在这个光传输网络上可以实现信息同步复用、传输、分插和交叉连接功能。

1995 年,针对同步数字传送体系开销复杂、电子器件响应速度受限等问题,人们提出利用波分复用技术构建的光网络。波分复用光网络,以较低的设备成本,简单的光器件形式,使单根光纤中的传输容量提高几十倍到数百倍,使其成为光网络的主流结构。波分复用光网络实现了光网络从光波长传输到光波长交换的革命性转变,同时为建立波长路由、业务透明与灵活配置、高生存性光网络提供了必要条件。

1998 年,国际电信联盟提出了光传送网。光传送网处理的单位是光波长。客户层以光波长形式在光网络上复用、传输、选路和放大。在光域上实现分插复用和交叉连接,为客户信号提供有效和可靠的传输。

2000年,国际电信联盟提出了自动交换光网络。自动交换光网络最核心的技术体现在可以实现网络业务动态配置,通过管理平面自动建立或者拆除光通道,从而推动了光网络组网应用向着动态、灵活、高效、智能,而且更加快捷和安全可靠的方向发展。

2010年以后,光纤到家庭、4G宽带移动通信、虚拟现实和增强、超宽带视频等宽带业务的带宽需求迅速增长,同时为了适应互联网+、物联网、云计算、大数据的海量数据传输网络架构变革,全球长途干线电信网开始采用单信道传输速率为100Gbit/s的相干传输系统。

2012年,中国电信、中国移动和中国联通三大网络运营商陆续试点采用单根光纤传输容量为8Tbit/s($80 \times 100\text{Gbit/s}$)的波分复用传输系统。

2013年,国务院颁布《“宽带中国”战略及实施方案》。该实施方案中明确提出2020年发达城市宽带用户入户速率为1G。为了适应宽带业务发展和网络架构变革的需要,光纤传输系统研究人员主要采用高阶调制编码、波分复用、偏振复用、空分复用等多维复用组合、相干检测和数字信号处理技术使光纤传输系统实现超高速率、超长距离、超大容量、超高频谱效率传输。

2015年,罗鸣等人在G.652单模光纤上成功地完成了离散傅里叶变换、正交频分复用、128正交幅度调制和偏振复用100Tbit/s、80km的传输实验。

2016年,K. A. Turukhin等人在单模-12芯光纤上成功地完成了八维幅移键控、偏振复用的光信号105.1Tbit/s、14350km的传输实验。

2017年,罗鸣等人在单模-7芯光纤上成功地完成了离散傅里叶变换、正交频分复用、32正交幅度调制和偏振复用的光信号560Tbit/s、10km的传输实验。

2019年2月13日,贺志学等人利用数字信号处理的相干光纤传输技术,在单模19芯光纤上完成了频谱效率为113bit/(s·Hz),单通道速率为178Gbit/s,传输容量为1.06Pbit/s的传输实验。这个传输实验成果标志着我国光纤传输系统研究水平已进入世界先进行列。

为了适应分组数据业务发展的需要,光网络正在由传送网向着承载业务的分组交换光网络演进。光网络的四通八达,呼唤智能化自动交换光网络的诞生,从而提高了光网络资源分配、服务质量和可靠性。软件定义光网络在提高了网络的运行维护管理水平的同时,推动了光网络向着开放性和智能化方向的发展。

作为从事光纤通信技术科研与教学工作30多年的同志,我们的工作体会是光纤通信技术进步遵循了一个“点、线、面”的发展规律。“点”是指光电器件——基本组件,如半导体激光器、光纤、光放大器等。“线”则为同步数字传输系统、波分复用传输系统——简单应用。“面”就是光网络——更加实用,如光传送网、自动交换光网络、无源光网络。因此,本教材的内容阐述顺序采用了由“点”、“线”到“面”,从简到繁的叙述原则。首先介绍光纤传输理论、光纤结构及其传输性能,其次描述光器件基本结构、工作原理和工作特性,再次介绍传输系统的原理和特点,最后阐述光网络的分类方法、工作特点和应用实例。作者力求读者通过本书的学习,能够获得真实的感悟。光纤的品种更新、光器件功能增多、系统设备的多样化、光

网络结构细化和控制的智能化,彼此依靠,取长补短,共同推动光纤通信技术的发展。

在本书的编著过程中作者先后引用了赵梓森院士、余少华院士、韦乐平教授、顾畹仪教授等国内外众多著名专家的研究成果,也参考了一些国内外最新出版的有关光纤通信方面的图书、期刊和最新标准,在此向众多专家和标准部门表示真诚的感谢。对于有关专家和标准部门的研究成果,我们已在书末的参考文献中做了一一列举,但难免有遗漏之处,还请他们多加谅解。

作者在此感谢光纤通信技术和网络国家重点实验室开放课题合作基金资助(项目编号:2014OCTN-03)对本书的大力支持。感谢余少华院士多年来给予作者在学术上的指导和支持。最后,作者衷心地感谢中国光纤之父赵梓森院士在百忙之中为本书作序举荐。

由于本书涉及光纤通信技术的基本理论、关键技术、系统设备及光网络工程应用等诸多方面的理论和技术问题,书中内容广泛且技术新颖,加之作者专业水平有限,书中难免出现一些谬误和不足,恳请读者不吝赐教。

作 者

2019年6月3日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 通信技术演进	1
1.2 电磁波频谱	2
1.3 光纤通信系统	4
1.4 光纤通信特点	5
1.5 光纤传输系统演进	6
1.6 光纤通信应用	7
1.7 小结	7
第 2 章 光纤波导理论	10
2.1 光纤基本结构	10
2.2 光纤分类	11
2.3 光纤的光传输理论	14
2.4 小结	25
第 3 章 光纤	28
3.1 光纤设计原则	28
3.2 光纤结构设计	29
3.3 光纤结构参数设计	30
3.4 光纤材料	31
3.5 光纤制造	31
3.6 光纤类型	38
3.7 光纤传输性能	45
3.8 小结	61
第 4 章 光缆	64
4.1 光缆设计	64
4.2 光缆分类	66
4.3 光缆结构	67
4.4 光缆结构特点	72
4.5 小结	77
第 5 章 光发射模块和光接收模块	80

5.1	半导体物理基础知识	80
5.2	光源	85
5.3	光发射模块	109
5.4	光电二极管	112
5.5	光接收模块	120
5.6	小结	122
第6章	光纤通信系统	124
6.1	传送网	124
6.2	PDH 系统	125
6.3	SDH 系统	127
6.4	光纤传输系统的总体设计	139
6.5	组网设计基础	148
6.6	多业务传送平台	151
6.7	小结	153
第7章	光网络组网关键光器件	156
7.1	光放大器	156
7.2	波分复用器	172
7.3	色散补偿器	179
7.4	光开关	184
7.5	光分插复用器	192
7.6	光交叉连接器	195
7.7	小结	198
第8章	波分复用传输系统	200
8.1	技术现状	200
8.2	基本原理	202
8.3	系统构成	203
8.4	关键技术	206
8.5	技术标准	208
8.6	波分复用设备	212
8.7	系统管理	214
8.8	设计实例分析	217
8.9	发展趋势	219
8.10	小结	220

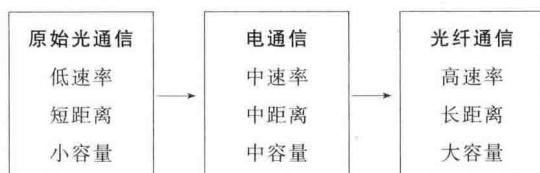
第 9 章 光网络	222
9.1 光网络发展	222
9.2 光传送网	224
9.3 自动交换光网络	235
9.4 分组传送网	242
9.5 接入光网络	248
9.6 小结	266
第 10 章 光纤通信技术前沿研究	269
10.1 光纤通信发展趋势.....	269
10.2 高速光电子器件.....	283
10.3 多芯-单模光纤传输实验	285
10.4 少模光纤传输实验.....	290
10.5 多芯-少模光纤传输实验	295
10.6 软件定义光网络.....	296
10.7 小结.....	303
参考文献	305

第 1 章 绪 论

【学习目标】

1. 了解通信技术演进的原因。
2. 掌握光纤通信使用的电磁频谱本质。
3. 掌握信息载波、传输介质和传输系统的依存关系。
4. 掌握光纤通信的特点。
5. 掌握判断多模光纤和单模光纤的方法。

【知识框图】



1.1 通信技术演进

通信是互通信息。通信(传输)系统的功能是传输信息。实现信息的高速率、长距离、大容量传输是光通信技术研究的终极目标。通信技术演进历程如下所述。

原始光通信,如中国古代的长城烽火通信。烽火是原始光通信,是简单的二进制数字通信。烽火利用有或无狼烟光信号表示有或无敌情信息。1792年,法国 Claude Chappe 提出“光电报”概念。利用机械编码中继站进行 200km 的信息传输。光的作用是可以看到简单的编码信号。“光电报”的缺点是传输速率小于 1bit/s、中继站容易窃听。

1838年, Samuel F. B. Mores 发明了电报。电报的出现使电通信代替原始光通信,人类开始进入电通信时代。电报本质上是数字通信,即通过宽度不同的电脉冲(点、线)编码传输电信号,传输速率提高到 10bit/s,使用中继站,可以实现传输距离为 1000km 的通信。

1876年, A. G. Bell 发明电话。电话标志着模拟通信的开始。电话通信是一种实时、方便、快捷的交互式通信。因此,电话的电通信持续了大约一个世纪。

进入 20 世纪以来,人们在电话网络中的传输介质研究上取得了一些技术进步。1940年,利用同轴电缆代替铜线作为系统传输介质,同轴电缆传输系统实现了 3MHz(300 个话路或 1 路电视信号)的传输。

1948年,利用微波作为传输介质的传输系统,可以实现的信息载波频率为 4GHz。同轴电缆和微波传输系统存在中继距离短、系统运营成本高等问题。

1966年,高锟提出光纤通信原始创新思想。他英明地预言,巨大的光载波频率、低衰减光纤、半导体激光二极管可以实现高速率、长距离、大容量的信息传输。1970年,低衰减光纤

和室温连续工作的 GaAs 小型半导体激光二极管的同时问世,为全世界开始光纤传输系统的研究奠定了基础。图 1-1 所示的是过去 150 年不同传输介质的传输速率 B 与传输距离 L 的乘积($B \times L$) 演进。

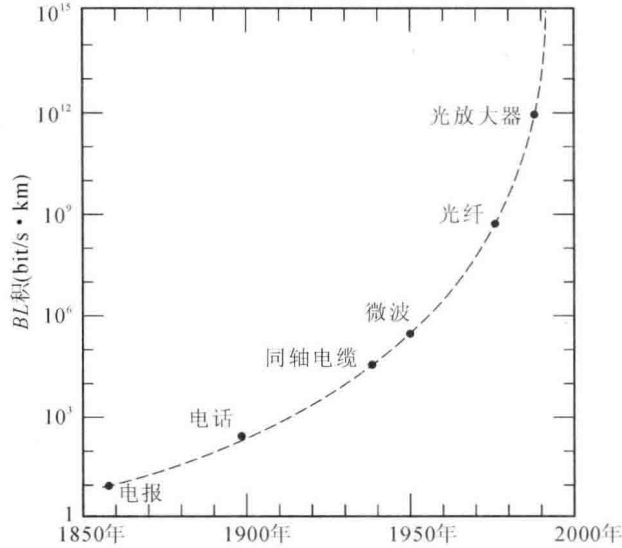


图 1-1 过去 150 年不同传输介质的传输速率与传输距离演进

通信业界人士清楚,电磁波载波频率越高,其承载的信息量越多;传输信道衰减越小,系统传输距离就越长。光纤通信使用的电磁波的载波频率为 100THz,通信使用的传输介质石英玻璃光纤在 1550nm 波长的衰减系数为 0.20dB/km,确保光纤通信系统可以实现高速率、长距离、大容量、低成本、高可靠性的信息传输,带来了通信领域的革命,为人类进入信息化时代奠定了良好的基础。

1.2 电磁波频谱

信息传输是以电磁波为载体。通信使用的波段的波长范围从千米到微米数量级。图 1-2 所示的是通信使用的电磁波频谱。由于通信容量与电磁波频率成正比,所以通信技术研究的终极目标是,不断地探索使用更高频率的电磁波的通信技术,以便达到提高通信系统的传输容量的目的。铜线通信系统、同轴电缆通信系统、微波通信系统和光纤通信系统使用的载波频率分别在 1MHz、1GHz、100GHz 和 $10^{14} \sim 10^{15}$ Hz。

表 1-1 所示的是各种电磁波的波段划分、频率范围、波长范围、传输介质和通信应用。光纤通信是以激光为载体,以光纤为传输介质的通信方式。光纤通信使用的电磁波载波频率比电通信的电磁波载波频率高 4 个数量级,同时光纤的衰减非常小。因此,光纤通信是实现大容量、长距离、低成本信息传输的必然选择。

表 1-1 各种电磁波的波段划分、频率范围、波长范围、传输介质和通信应用

波段划分	频率范围	波长范围	传输介质	通信应用
长波	30 ~ 300kHz	10 ~ 1km	铜线	中距离通信、无线电导航
中波	0.3 ~ 3MHz	1000 ~ 100m	同轴电缆	调频广播、导航

续表 1-1

波段划分	频率范围	波长范围	传输介质	通信应用
短波	3 ~ 30MHz	100 ~ 10m	同轴电缆	调频广播、移动通信
超短波	30 ~ 300MHz	10 ~ 1m	同轴电缆	调频广播、电视、移动通信
微波	分米波	0.3 ~ 3GHz	波导	微波接力、电视、移动通信
	厘米波	3 ~ 30GHz	波导	雷达、微波接力、卫星通信
	毫米波	30 ~ 300GHz	波导	雷达、微波接力、射电天文
紫外、可见光、红外	10 ⁵ ~ 10 ⁷ GHz	(0.3 ~ 3) × 10 ⁻⁶ cm	光纤	电话、数据、图像

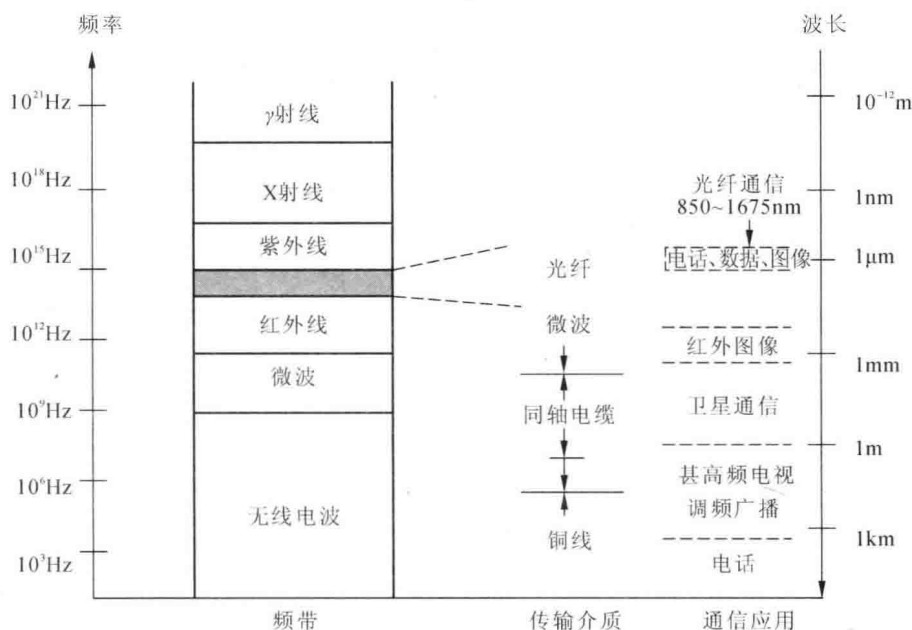


图 1-2 通信使用的电磁波频谱

光具有波动性和粒子性两重性。在研究光纤传输理论时，光被看作电磁波，利用光的波动性可以解释光的传输、折射、反射、干涉、衍射、偏振和损耗等。麦克斯韦平面波动方程可以描述真空中的光的波动性。光的波动特性可以用频率(波长)、相位和传输速度描述。

所有通信系统都使用一定形式的电磁能量传递信息。图 1-3 所示的是无线电、微波和光纤通信系统使用的频率、波长和光子能量之间的关系。光纤通信使用波长表示频谱工作范围。式(1-1)所示的是光载波频率 ν 与真空中光速和光波长的关系。

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad [\text{Hz}] \quad (1-1)$$

式中， λ 是光的波长，单位可以用 nm 或 μm 表示。式(1-1)中的光速 c 是一个固定常数。通信系统所用的光波长越短，光载波频率越高，实现的传输容量就越大。利用光在不同的介质中的传播速度不同(光在光密介质玻璃中传输比在光疏介质真空中传输速度更慢)，通过选择不同折射率的材料，设计不同的纤芯 / 包层折射率分布，可以获得不同传输性能的光纤。

在研究光器件工作原理时，光被看作光粒子，光可以用光粒子数描述。光器件使用光子能量或光功率表示光信号强度或光器件性能。光子能量与其频率之间的关系可由式(1-2)的普朗克定律确定。

$$E = h\nu = hc/\lambda \tag{1-2}$$

式中,普朗克常数 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} = 4.14 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}$ 。波长单位是微米。从图 1-3 电磁波频谱可以看出,光纤通信可以使用的波长范围在 770 ~ 1675nm 之间。常用的波长范围在 1530 ~ 1625nm 之间,载波频率为 176 ~ 375THz,载波频率资源巨大。

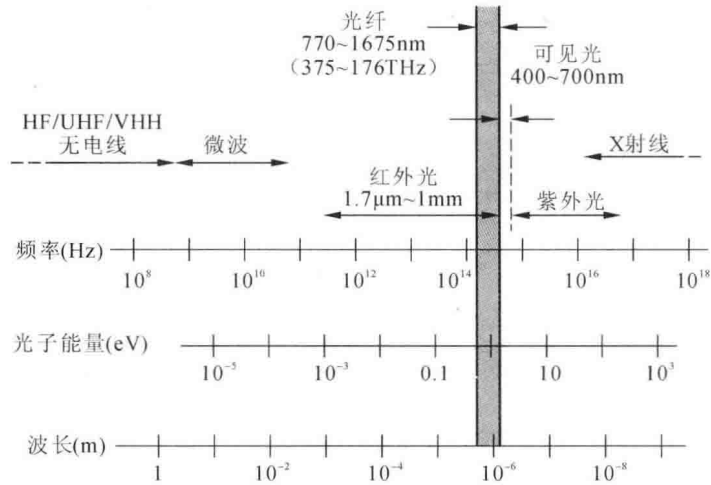


图 1-3 无线电、微波和光纤通信系统使用的频率、波长和光子能量之间的关系

表 1-2 给出国际电信联盟标准化部门 (International Telecommunication Union-Standardization Sector, ITU-T) 规范的单模光纤可以使用的波带名称分别为 O、E、S、C、L、U 六个工作波带范围。其中最常用的是 C 波带和 L 波带。6 个工作波带的波长范围为 1260 ~ 1675nm,可用工作波长为 415nm,可用频谱为 58THz。由此可见,光纤的潜在的带宽资源巨大。

表 1-2 光纤通信使用的 6 个工作波带范围及其作用

波带名称	代号	波长范围(nm)	作用
原始波带	O	1260 ~ 1360	原始工作波带
扩展波带	E	1360 ~ 1460	低水峰光纤使用的扩展波带
短波长波带	S	1460 ~ 1530	短波长工作波带
常用波带	C	1530 ~ 1565	常用的工作波带
长波长波带	L	1565 ~ 1625	长波长工作波带
超长波长波带	U	1625 ~ 1675	传输维护信号的波带

1.3 光纤通信系统

图 1-4 所示的是高锟博士最早提出的一个由光发射机、光纤和光接收机组成的最简单的点到点的光纤通信系统模型。在光发射机端,采用半导体激光二极管(Laser Diode, LD)或半导体发光二极管(Light Emitting Diode, LED)作为光源,输入信号对 LD 或 LED 的光进行调制,被调制后的光信号经过光纤传输,在光接收机端,经过光纤传输的光信号被光电二极管检测,转换为电信号,最后经过信号恢复,输出原始电信号。高锟博士预测这个光纤通信系统的传输速率可以达到 1Gbit/s,比 20 世纪 70 年代通信系统的最大传输速率

100Mbit/s 大得多。因此,英国、美国、日本等国纷纷开展光纤通信技术研究。

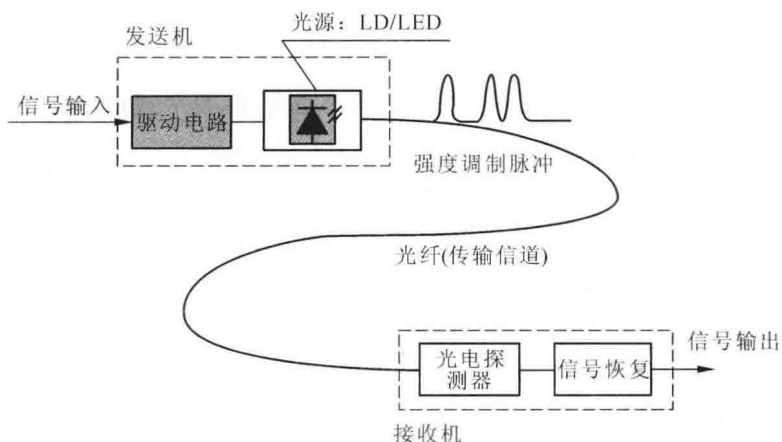


图 1-4 最简单的光纤通信系统

20 世纪 80 年代以后,随着用户对语音、数据、视频和多媒体业务需求与日俱增,单模光纤、光纤放大器、光波分复用器、色散补偿器、编号码调制、相干检测和数字信号处理技术的重大突破,促进光纤通信系统的传输容量不断地持续增长,从而满足互联网+、物联网、4G 宽带移动通信发展需要巨大的传输容量的需求。今天,光纤通信系统在长途干线网、城域网和接入网络中得到大量的应用。

1.4 光纤通信特点

光纤通信之所以得到如此广泛的应用,究其原因是光纤作为传输介质产生了相较其他传输介质无与伦比的优点:

1. 巨大传输容量

由通信理论获悉,通信载波的频率越高,通信系统可以承载的传输容量越大。目前,无线电通信使用的频率在 $10^3 \sim 10^6$ Hz 之间,光纤通信所用的光波频率在 $10^{14} \sim 10^{15}$ Hz 之间。因此,光纤通信具有巨大的通信容量。

2. 极小传输衰减

在光纤通信用波长 1550nm 处,石英玻璃光纤的衰减系数大约是 0.2dB/km,即传输 100km 光信号后衰减 20dB,所需要中继放大距离为 100km,大大地降低了系统的建设成本。因此,光纤非常适合作为中、长距离传输介质。

3. 体积小、质量轻

玻璃裸光纤外径大约为 $125\mu\text{m}$,而玻璃的密度比铜的低。光纤的体积小、质量轻,使得光纤非常适合以架空、管道、直埋方式铺设,从而大大地减小了所需空间与铺设难度。

4. 不受电磁波干扰

石英玻璃光纤所用的基础材料 SiO_2 是绝缘体,不会受到电磁波干扰。它非常适合用于有电磁波干扰的电气化铁路或多雷电地区取代电缆通信系统。因为光纤是介质光波导,它只传输光信号,不会产生电火花,故它也可以用于炼油厂或煤矿矿井等易爆易燃恶劣环境的通信。

1.5 光纤传输系统演进

电话机、电视机、计算机和手机等通信终端的日益普及,每个通信终端用户对宽带需求的不断增加,推动了光纤通信系统的传输容量($B \times L$)持续的增长。在1976年到2018年的42年间,光纤传输系统的传输容量研究成果巨大。图1-5所示的是光纤通信系统传输容量持续增长的演进过程。从图1-5可以清晰地看出,半导体激光器、多模光纤、单模光纤、同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy,SDH)、相干接收、掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier,EDFA)、密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing,DWDM)、分组化、数字相干系统、软件定义光网络、多维复用和光子集成等技术突破,使得光纤传输系统的传输容量每十年翻1000倍。

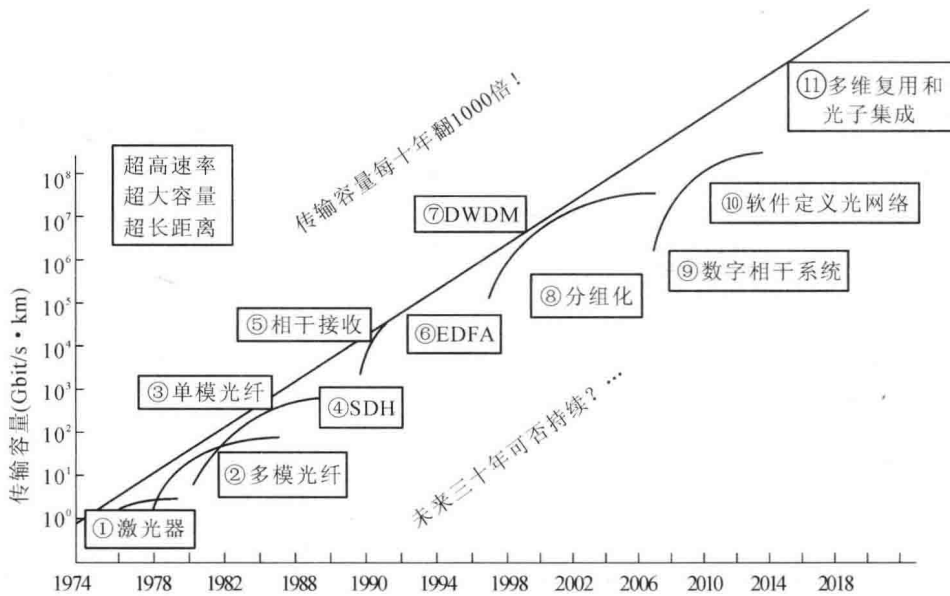


图 1-5 光纤通信系统传输容量持续增长的演进过程

光纤通信技术动态发展与光纤、光器件和传输系统技术进步息息相关。新的光纤技术为传输系统打开新的传输窗口,驱动新的器件和新的系统发展。换言之,新的器件和新的系统需要新的光纤。从1976年光纤传输系统的传输速率为44.7Mbit/s到2017年光纤传输系统的传输速率为3200Tbit/s,41年内系统传输速率骤增 71.6×10^6 倍。这就是光纤通信技术非常令人瞩目的成就。表1-3所示的是光纤、光器件、传输系统和传输容量之间的紧密依存关系。

表 1-3 光纤、光器件、传输系统和传输容量之间的紧密依存关系

年代	光纤	光器件	传输系统	传输容量
1976	多模光纤	GaAs 发光管	准同步数字体系	44.7Mbit/s,10km
1981	标准单模光纤	InGaAsP 激光器	同步数字体系	2Gbit/s,44km
1985	色散位移光纤	单纵模激光器	同步数字体系	2Gbit/s,100km
1991	截止波长位移光纤	光纤放大器	同步数字体系	5Gbit/s, 14300km

续表 1-3

年代	光纤	光器件	传输系统	传输容量
2000	非零色散光纤	光放大器、波分复用器	波分复用系统	3.2Tbit/s, 3000km
2010	空分复用光纤	高阶调制、相干检测	数字相干系统	64Tbit/s, 320km
2015	多芯-少模光纤	高阶调制、相干检测	数字相干系统	2050Tbit/s, 9.8km
2016	7芯光纤	高阶调制、相干检测	数字相干系统	601.36Tbit/s, 10km
2017	少模光纤	高阶调制、相干检测	数字相干系统	3200Tbit/s, 80km

1.6 光纤通信应用

光纤通信系统经历了简单的 PDH、强大管理的 SDH、灵活配置的波分复用、大颗粒业务的光传送网,逐渐演进到智能光网络、软件定义光网络过程。如图 1-6 所示,光纤通信系统主要应用的三大领域是电话网络、计算机网络和广播电视网络。由于光纤具有巨大的传输容量,使得三大网络都可以提供语音、数据、视频三重业务,为降低用户资费和实现宽带业务奠定了基础。

在今天的信息化社会中,光网络承载着互联网、物联网、云计算、大数据中心等产生的海量数据流量,是整个信息世界的高速铁路和高速公路。由于超高清数字电视、虚拟现实游戏、5G 宽带移动通信、光纤到户(Fiber to the Home, FTTH)的宽带业务的快速发展,光网络带宽需求持续高速增长。与此同时,随着物联网、云计算的兴起,大数据中心逐渐成为网络核心。通信终端用户带宽和流量的高速增长,使得光网络的带宽瓶颈从网络核心向网络边缘延伸,光网络应用也在从核心向边缘扩展。目前,光网络三个重要研究方向为:① 传输,超高速率、超长距离、超大容量;② 组网,从电层组网到光层组网;③ 控制,智能化控制管理。

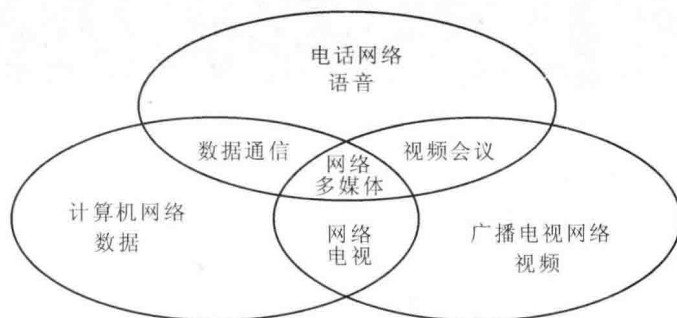


图 1-6 光纤通信系统应用领域

1.7 小结

通信技术从原始光通信、电(子)通信到光纤通信的演进的实质是,通过技术创新寻找高的载波频率、低衰减传输介质,实现大容量、长距离、低成本的信息传输,以满足用户对业务带宽需求的不断增长。

光纤通信使用的电磁波频谱范围在 $10^{14} \sim 10^{15}$ Hz 之间,同时光纤在工作波长 1550nm