


GUANG TONGXIN JISHU
YU XITONG DAOLUN

光通信技术 与系统导论

◆ 主编 王海潼

 郑州大学出版社

GUANG TONGXIN JISHU
YU XITONG DAOLUN

光通信技术 与系统导论

◆ 主编 王海清



郑州大学出版社
郑州

图书在版编目(CIP)数据

光通信息技术与系统导论/王海潼主编. —郑州:郑州大学出版社,2013.7
ISBN 978-7-5645-1497-6

I. ①光… II. ①王… III. ①光导纤维通信系统 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 134408 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

郑州市诚丰印刷有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:18

字数:429 千字

版次:2013 年 7 月第 1 版

邮政编码:450052

发行电话:0371-66966070

印次:2013 年 7 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-1497-6

定价:36.00 元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

前言

光纤通信在社会信息化发展的进程中扮演着重要的角色,是通信技术的一个重要分支。随着新型光电器件的不断出现,光纤通信技术得到了迅速发展,其传输容量得到了极大的提高。目前,光纤已在很多场合取代了传统铜线而成为主要的传输媒介。无论是电信骨干网还是以太网乃至智能建筑内的综合布线系统,无论是陆地还是海洋,都有光纤的存在,都涉及光纤传输技术,光纤通信已成为支撑信息网络的重要柱石之一。对于从事信息技术的人员而言,了解和掌握光纤通信的基础知识是至关重要的。

全书共分 10 章,第 1 章介绍了光纤通信工程的基本概念和特点、光纤通信工程系统的基本组成、基本技术,并对该领域做了回顾和展望。第 2 章介绍了光纤/光缆的结构、所具有的特性、光在光纤中的传输机制以及分布模式,分析了光纤的色散及衰减特性,并介绍了光纤制作工艺、结构及其使用特性等。第 3 章介绍了两种光纤通信主要的光源即半导体发光二极管和半导体激光器的工作原理、应用以及特性,介绍了两种光纤通信主要的光电检测器即半导体光电二极管及雪崩光电二极管的工作原理、应用以及特性,为后面章节的学习打下基础。第 4 章介绍了光发送机和光接收机的组成、工作原理及技术指标,并说明了高速系统中所使用外调制器的工作原理及光纤通信工程系统中无源光器件的种类、作用及指标。第 5 章介绍了光放大器的基本概念,重点讨论了掺铒光纤放大器、基于光纤非线性现象的拉曼光纤放大器的组成、工作原理及所具体的特性和应用,为后面全光(WDM)系统的学习打下基础。第 6 章重点介绍了同步数字体系(SDH)的相关概念、技术及应用。第 7 章讨论了如何将前面介绍的光纤通信工程系统的各组成单元如光纤(光缆)、光发送机、光接收机、光放大器、光无源器件等构建成实际的光波通信系统时与设计 and 性能相关的问题。第 8 章讨论了模拟光纤通信系统的基本概念及组成,介绍了基带直接调制系统、脉冲频率调制(PFM)系统及副载波复用(SCM)模拟电视光纤传输系统,讨论了系统性能指标和光源的非线性对系统失真的影响。第 9 章阐述

了波分复用的基本原理、基本组成。详细介绍了 WDM 系统所用的关键器件的工作原理与技术参数,如合波/分波器、可调谐光源及光放大器。对波分复用系统的设计、系统性能和系统测试也作了较详尽的讨论。第 10 章着重讨论了光网络及其关键器件,同时介绍了目前广泛应用的光接入网技术相关内容。

本书在介绍光纤通信工程所涉及的基本理论时,力求条理清晰、简明扼要,叙述通俗易懂。本书的编写分工为:第 1 章、第 3 章由王海潼编写;第 2 章由周刚编写;第 4 章、第 8 章由金剑编写;第 5 章、第 7 章由黄红梅编写;第 6 章由樊明辉编写;第 9 章由王飞编写;第 10 章由闫立军编写。全书由王海潼统稿。

由于作者认识的局限,书中难免存在不当之处,敬请读者批评指正。

编者

2012 年 7 月

目 录

■ 第1章 概述	1
1.1 光通信的基本概念	1
1.2 光纤通信的特点	5
1.3 光纤通信系统的组成、分类与发展	7
■ 第2章 光纤、光缆	14
2.1 光纤与光缆的结构	14
2.2 光纤的折射率分布	24
2.3 光在光纤中的几何传输(以阶跃光纤为例)	25
2.4 光纤的数值孔径	27
2.5 光的波动性(波动理论分析法)	28
2.6 单模光纤特性	34
2.7 光纤的模式色散	35
2.8 单模光纤的波长色散或色度色散或群速度色散	37
2.9 光纤的损耗	39
2.10 典型光纤介绍	40
2.11 光纤的非线性效应	43
■ 第3章 光源、光电检测器及光无源器件	47
3.1 基础知识	47
3.2 半导体激光器	51
3.3 半导体发光二极管	64
3.4 半导体光源的应用	69
3.5 半导体光电检测器	69
3.6 无源光器件	76
■ 第4章 光发送机和光接收机	85
4.1 光发送机	85
4.2 光接收机	98
4.3 相干接收	104
■ 第5章 光放大器	112
5.1 概述	112
5.2 掺铒光纤放大器	114

5.3	拉曼光纤放大器	125
5.4	受激布里渊光纤放大器(SBA)	127
5.5	半导体光放大器(SOA)	128
5.6	主要光放大器的比较	130
■	第6章 同步数字体系(SDH)技术	133
6.1	SDH 技术概述	133
6.2	SDH 的速率与帧结构	138
6.3	SDH 映射、定位与复用技术	143
6.4	SDH 传送网网元设备	152
6.5	SDH 传送网分层结构及自愈	164
6.6	SDH 传送网的保护与恢复	171
■	第7章 数字光纤通信系统	176
7.1	单信道点到点数字光纤通信系统	176
7.2	数字光纤通信系统设计	178
7.3	系统性能	182
7.4	系统性能测试	188
■	第8章 模拟光纤通信系统	192
8.1	模拟光纤通信系统概述	192
8.2	基带直接强度调制	194
8.3	脉冲频率调制(PFM)	195
8.4	微波副载波调制(SCM)	196
8.5	系统的性能与光源的非线性	198
■	第9章 波分复用(WDM)光纤传输系统	208
9.1	WDM 工作原理	208
9.2	WDM 合波分波器	211
9.3	可调谐光源	217
9.4	光放大器	221
9.5	系统设计	222
9.6	系统性能	224
9.7	系统测试	230
■	第10章 全光网络	238
10.1	光网络	238
10.2	光网络中的复用技术	256
10.3	光接入网	262
■	参考文献	278

概 述

通信系统将信息从一个地方传送到另一个地方,不管这两个地方相隔几千米,还是横跨大洋的距离。信息通常被频率为几兆赫(MHz)到几百太赫(THz)的电磁波携带,光通信系统使用电磁波谱中可见光或近红外区域的高频电磁波(约100 THz),有时称其为光波通信系统,以区别于载波频率低5个数量级的微波(约1 GHz)通信系统。光纤通信系统是利用光纤进行信息传输的光波系统,20世纪80年代在全球得到了广泛应用,并使通信领域发生了巨大的变化,是信息时代来临的主要物质基础之一。本章主要介绍光纤通信的基本概念,提供背景和预备知识。

1.1 光通信的基本概念

通信科学的发展历史悠久。近代通信技术分为电通信和光通信两类。电通信又分为有线通信和无线通信,是两种相当成熟的通信技术。通信技术发展过程中,围绕着增加信息传输的速率和距离,在提高通信系统的有效性、可靠性和经济性方面进行了许多工作,取得了卓越的成就。光通信技术则是当代通信技术发展的最新成就,已成为现代通信的基石。

广义上说,凡使用光作为通信手段的都可称为光通信,则光通信的历史可追溯到远古时代,那时大部分文明社会已经用烟火信号传递单个信息,到18世纪末通过信号灯、旗帜和其他信号装置进行通信的类似方法已基本走到了尽头。1792年,根据 Claude Chappe 的建议,采用中继器使机械代码信号传送很长距离(约100 km)。这种光通信系统速度很慢,其有效速率 $B < 1 \text{ bit/s}$ 。

19世纪30年代,电报的出现用电取代了光,开始了电信时代,利用新的代码技术,速率增加到 $3 \sim 10 \text{ bit/s}$,采用中继站后可进行约1 000 km 距离的通信。1876年,电话的发

明引起了本质的变化,电信号通过连续变化电流的模拟形式传送,这种模拟电通信技术支配了通信系统达 100 年左右。

20 世纪,全球电话网的发展导致了电通信系统许多改进,使用 MHz 同轴电缆代替双绞线大大提高了系统容量。第一代同轴电缆系统是一个 3 MHz 的系统,能够传输 300 路音频信号或 1 路视频信号,这种系统的带宽受到与频率相关的电缆损耗的影响,这种限制导致了微波通信系统的发展,在微波系统中,利用频率为 1~10 GHz 的电磁载波及合适的调制技术传递信号。当时最先进的同轴系统于 1975 年投入运营,其速率达 274 Mbit/s,但中继距离短仅约 1 km,系统成本高。微波通信系统速率亦受到载波频率的限制。

通信系统的容量通常用比特-距离积 BL 表示, B 为比特率, L 为中继距离。图 1.1 给出了最近一个半世纪来 BL 积随技术进步发生的变化。可见,至 20 世纪 70 年代电通信获得的最大 BL 积不超过 100 Mbit/(s·km)。

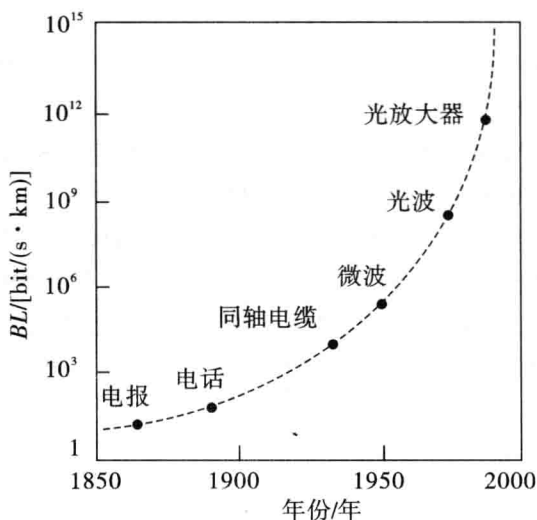


图 1.1 近一个半世纪来 BL 积随技术进步发生的变化

20 世纪中后期,人们开始意识到,如果用光波作为载波, BL 积还可能增加几个数量级。所谓光波通信,就是利用光波携带信息进行传输的通信方式。根据传输媒质的不同可分为无线光通信和有线光通信。无线光通信即利用光波在大气中直线传播的特点来传输信息的通信形式(如激光通信);有线光通信指利用光导纤维(光纤)等将光波汇聚其中并进行信息传播的通信方式(如光纤通信)。其共同点都是光波通信(将光波作为信息的载体),不同点主要是传输介质的不同。

无线光通信虽然具有安装便捷、使用方便、不占用无线电频率资源等优点,但这种通信方式由于受到大气气温不均匀等因素的影响,光线易发生偏移,大雾时甚至全部被吸收,因而通信质量不稳定,受当时技术条件的限制不能长距离地传输信息。

对于有线光通信,主要存在的问题是 20 世纪 50 年代还没有找到理想的相干光源和传输媒质。我们知道,通常的自然光源及电光源光谱很宽,是非相干的,很难按无线电波方式进行调制以实现通信;另外光在大气中传播时受天气影响极为严重,且聚束也十分困

难,而在一般的介质材料中传播损耗极大。20世纪60年代以前,光在即便最好的光学玻璃中传播时其损耗也在1 000 dB/km以上,在这样的介质中实现光信号的长距离传输显然是不现实的。

20世纪50年代末、60年代初,激光的出现为实现现代意义上的光通信提供了合适的光源。激光器是根据原子、分子内能量变化制造的光波振荡器,是谱线极窄、方向性极好的相干光源,可以对其进行类似于无线电波的调制。半导体激光器由于其体积小、寿命长、价格低廉而成为实用化、商品化的通信光源。

20世纪70年代初,低损耗光导纤维的问世为光通信提供了合适的传输媒质。1966年英籍华裔科学家高锟博士指出,只要将石英玻璃中的金属离子含量大幅度降低,即可通过适当的拉丝工艺制造出损耗低于20 dB/km的玻璃纤维,可以用于长距离的信号传输。1970年美国康宁玻璃公司率先根据这种思路制造了世界上第一根低损耗光导纤维,其损耗低于20 dB/km。以后低损耗光导纤维(简称光纤)的研究及制造技术取得了飞速的发展,到了20世纪70年代末,在1.3 μm波长上,石英光纤的损耗已降至0.4 dB/km;在1.5 μm波长上,已降至0.2 dB/km以下,这已接近石英系光纤损耗的理论极限。

由于半导体激光器和低损耗光纤的制造成功,20世纪70年代初,一种新的通信方式——光纤通信问世,并得到了迅速发展。光纤通信的问世是通信史上的一场具有划时代意义的变革。

1.1.1 光纤通信的概念

光纤通信是一种利用光导纤维(光纤)传输光波信号的通信方式。

1.1.1.1 光波

光波实际上是一高频电磁波,属于电磁波的范畴。在讨论高频电磁波时,我们习惯用“波长”代替“频率”来描述。

波长 λ 与频率 f 的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

式中, c 为光速 3×10^8 m/s; λ 的物理含义是电磁波在时间上变化一周,其波前在空间变化一周所前进的长度。

对于光波来说,波长常用的单位有:

微米 μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m)、纳米 nm ($1 \text{nm} = 10^{-9}$ m)、埃 Å ($1 \text{Å} = 10^{-10}$ m)。

电磁波按波长不同(或频率不同)可分为如图1.2所示的种类。

其中,光波波长的范围 $300 \sim 6 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 包括

红外线($\lambda > 0.76 \mu\text{m}$)

{	近红外 λ : 0.76 ~ 15 μm
	中红外 λ : 15 ~ 25 μm
	远红外 λ : 25 ~ 300 μm

主要用于光波通信、红外制导、电子摄像及天文学。

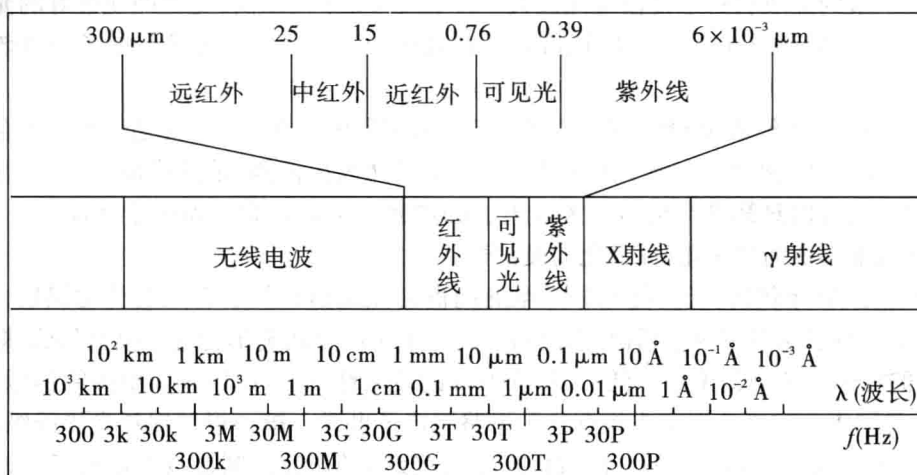


图 1.2 电磁波波谱

可见光($\lambda = 0.39 \sim 0.76 \mu\text{m}$):人眼实际可见的波长的光,由红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种颜色的连续光波组成,其中,红光的波长最长,紫光最短。

自然光源(日光等)、白炽灯、日光灯以及许多激光源(HE-NE 激光器)等用于装饰性的人造光源,都是人眼可见的可见光(如 $0.67 \mu\text{m}$)。

紫外线($\lambda < 0.39 \mu\text{m}$):这一波段的波长比人眼实际可见的光波波长要短得多,这一波段的信号很少应用于通信。

波长再短就是 X 射线、 γ 射线。目前,光波通信所采用的光波波长为 $1 \mu\text{m}$ 左右,主要位于近红外区,即波长是 $0.8 \sim 1.8 \mu\text{m}$ (对应频率为 $167 \sim 375 \text{ THz}$)。

通常将 $\lambda < 1 \mu\text{m}$ 的红外波长称为“短波长”; $\lambda > 1 \mu\text{m}$ 的红外波长称为“长波长”; $\lambda > 2.0 \mu\text{m}$ 的红外波长称为“超长波长”。

目前光波通常由半导体发光二极管(LED)和半导体激光器(LD)产生。激光器发出的光与普通光源发出的光相比有光束强度高、方向性极好,光谱极窄,相位和频率一致性好等优点,很适宜做光通信中的载波。

1970 年,美国贝尔实验室研制出世界上第一只在室温下连续波工作的砷化镓铝半导体激光器,为光纤通信找到了合适的光源器件。后来逐渐发展到性能更好、寿命达几万小时的异质结条形激光器和现在的分布反馈式单纵模激光器(DFB)以及多量子阱激光器(MQW)。光接收器件也从简单的硅光二极管(PIN)发展到量子效率达 90% 的 III V 族雪崩光二极管(APD)。

1.1.1.2 光纤(光导纤维)——光纤通信发展的里程碑

1966 年 7 月,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用光纤作为传输媒体以实现光通信的可能性,并设计了通信用光纤的波导结构(即阶跃光纤)。更重要的是科学地预言了制造通信用的超低耗光纤的可能性,即加强原材料提纯,加入适当的掺杂剂,

可以把光纤的衰耗系数降低到 20 dB/km 以下。而当时世界上只能制造用于工业、医学方面的光纤,其衰耗在 1 000 dB/km 以上。对于制造衰耗在 20 dB/km 以下的光纤,被认为是可望而不可即的。以后的事实发展雄辩地证明了高锟博士文章的理论性和科学大胆预言的正确性,所以该文被誉为光纤通信的里程碑。

1.1.2 光纤通信发展的实质性突破

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。虽然当时康宁玻璃公司制造出的光纤只有几米长,衰耗约 20 dB/km,而且几个小时之后便损坏了。但它毕竟证明了用当时的科学技术与工艺方法制造通信用的超低耗光纤是完全有可能的,也就是说找到了实现低衰耗传输光波的理想传输媒体,是光通信研究的重大实质性突破。自 1970 年以后,世界各发达国家对低损耗光纤的研究倾注了大量的人力与物力,其来势之汹,规模之大,速度之快,远远超出了人们的意料,1970 年 20 dB/km;1972 年 4 dB/km;1974 年 1.1 dB/km;1976 年 0.5 dB/km;1979 年 0.2 dB/km;1990 年 0.14 dB/km(它已经接近石英光纤的理论衰耗极限值 0.1 dB/km)。从而使光纤通信技术取得了极其惊人的进展。光纤中传输的光波如图 1.3 所示。

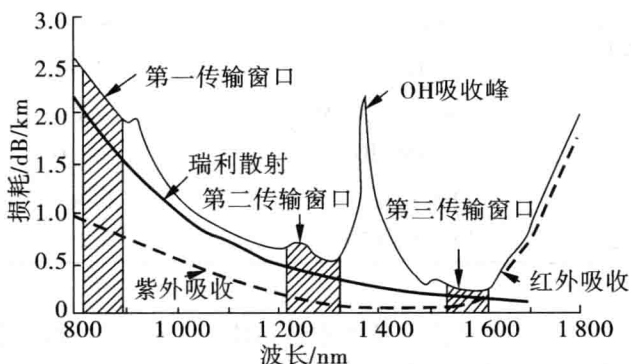


图 1.3 光纤中传输的光波

1.2 光纤通信的特点

光纤通信与其他通信方式相比有以下特点:

(1) 传输频带宽,通信容量大 随着科学技术的迅速发展,人们对通信的要求越来越多。为了扩大通信容量,有线通信从明线发展到电缆,无线通信从短波发展到微波和毫米波,都是通过提高载波频率来扩容的。而光纤中传输的光波是迄今为止使用频率最高的载波,其传输容量无疑也是最高的。

限于器件等技术因素的制约,目前光纤通信应有的通信能力并没有完全发挥出来,理论上,一根光纤可以同时传输近 100 亿路电话,而实用水平为每对光纤传输 48 万多路的

电话信号(针对 40 Gbit/s 单波道系统)。

另外,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,一根光缆可以容纳几百根光纤,12×12=144 根光纤的带状光缆早已实现;就单根光纤而言,采用波分复用或光频分复用是增加光纤通信系统传输容量最有效的方法。随着技术的发展,采用“空分复用+波分复用+光时分复用+光码分复用”可基本实现光纤容量的极限,该方式也是目前光纤通信扩容方式研究的方向。

(2) 传输损耗小 表 1.1 给出了局域网用电缆和光纤的每千米传输损耗。由表 1.1 可见,电缆的损耗明显大于光纤,有的甚至大几个数量级。因此,电缆只能用于网径不大的区域网(LAN),网径较大的 LAN 以及城域网(MAN)只能使用光纤,损耗小,中继距离长,若采用光纤放大器、色散补偿光纤,中继距离还可增加。

表 1.1 电缆和光纤的损耗和频带比较

类型	频带(或频率)	损耗/(dB·km ⁻¹)
对称电缆	4 kHz 时	2.06
细同轴电缆(φ1.2/4.4)	1 MHz 时	5.24
	30 MHz 时	28.70
粗同轴电缆(φ2.4/9.4)	1 MHz 时	2.42
	60 MHz 时	18.77
0.85 μm 多模光纤	(200 ~ 1 000) MHz·km	≤3
1.3 μm 多模光纤	≥1 000 MHz·km	≤1.0
1.3 μm 单模光纤	>100 GHz	0.36
1.55 μm 单模光纤	10 ~ 100 GHz	0.2

(3) 线径细、重量轻 工程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,不仅降低通信设备的成本,而且降低了录音机制造的成本。例如美国 A-7 飞机上,用光纤通信代替电缆通信,使飞机重量减轻 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的问题。

(4) 保密性能好 现代通信技术对信息的窃取通常有三个途径:一是直接接入式窃听(可采取保密口令、信息加密等技术应对);二是窃取计算机和终端设备辐射的电磁场(可采取加强电磁屏蔽措施应对);三是窃取电缆源辐射的电磁场,电缆系统的完全屏蔽通常是较困难的(现代侦听技术已能做到在离同轴电缆几千米外窃取电缆中的传输信号)。

由于光波在光纤中传输时有不辐射射频信号的优势,加之光纤中光泄露非常微弱,即使在弯曲地段也无法窃听;又由于光纤的特殊性质和结构,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。保密性能好这一特点,对军事、政治和经济都有重要的意义。

(5)资源丰富 金属材料在地球上的储量是有限的,而制造光纤的 SiO_2 在地球上基本上是取之不尽的材料。所以,推广光纤通信,有利用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。

1.3 光纤通信系统的组成、分类与发展

1.3.1 系统组成及分类

目前采用比较多的一种基本方式为强度调制/直接检波(IM/DD)的光纤数字通信系统,原理如图1.4所示。由图1.4可见,该光纤数字通信系统主要由光发射机、光纤、光接收机组成。

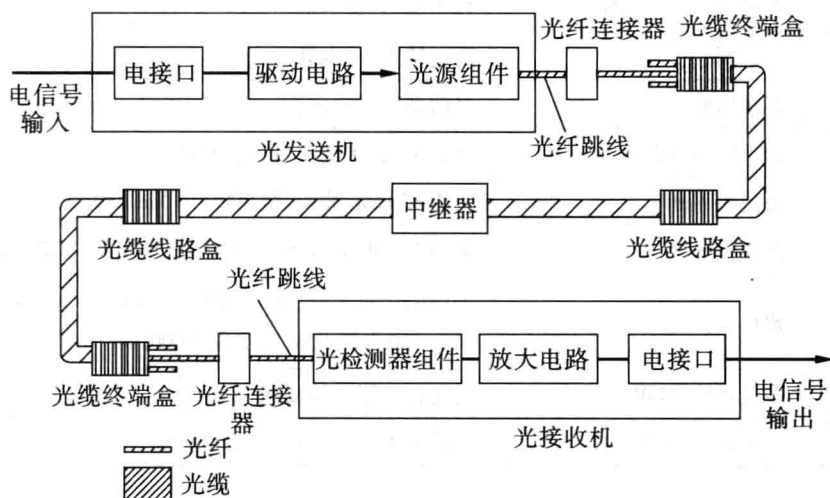


图 1.4 IM/DD 光纤数字通信系统原理

光发射机:由光源、驱动电路和调制器组成,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。主要作用是把电信号转换为光信号,是通过电信号对光的调制而实现。

光纤线路: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端机。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许多根光纤的光缆。光纤线路的性能主要由光缆内光纤的传输特性决定。

目前使用的石英光纤有多模和单模光纤,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,适合于大容量长距离光纤通信系统,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。

光纤是光纤通信的基础,光纤的技术进步,有力地推动着光纤通信向前发展。

光接收机: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。

光纤通信系统的分类如表 1.2 所示。

表 1.2 光纤通信的分类

	类别	特点
按光波长 光通道个数	单波长(通道)	技术难度小,相对成熟的技术
	多波长(DWDM)	一根光纤传输多个波长,容量大
按信号形式	数字光纤通信	传数字信号,抗干扰能力强
	模拟光纤通信	传模拟信号,适合图像传输
按调制方式	直接强度调制(IM)	技术成熟,成本低
	外调制	高速传送,成本高
按接收方式	直接检测	目前多使用的方法
	相干检测(CD)	灵敏度高,传输容量大,距离远
按工作波长	短波长 MMF	采用 850 nm 波长,距离短,10 km 以内
	长波长 SMF	采用 1 310 nm/1 550 nm 波长,距离短,>100 km
	超长波长	采用卤化物光纤,工作波长>2 000 nm 时,衰减值可达 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ dB/km,可实现 1 000 km 无中继传输
按光纤特性	多模光纤(MMF)	现主要应用于局域网
	单模光纤(SMF)	广泛使用于大容量,长距离传输

1.3.2 光纤通信的应用

正是光纤制造技术和光电器件制造技术的飞速发展,以及大规模、超大规模集成电路技术和微处理机技术的发展,带动了光纤通信系统从小容量到大容量、从短距离到长距离、从低水平到高水平、从旧体制(PDH)到新体制(SDH)的迅猛发展。

1976年,美国在亚特兰大开通了世界上第一个实用化光纤通信系统。码率为 45 Mbit/s,中继距离为 10 km。1980年,多模光纤通信系统商用化(140 Mbit/s),并着手单模光纤通信系统的现场试验工作。

1990年,单模光纤通信系统进入商用化阶段(565 Mbit/s),并着手进行零色散移位光纤和波分复用及相干通信的现场试验,而且陆续制定数字同步体系(SDH)的技术标准。

1993年,SDH产品开始商用化(622 Mbit/s 以下)。

1995年,2.5 Gbit/s 的 SDH 产品进入商用化阶段。

1996年,10 Gbit/s 的 SDH 产品进入商用化阶段。

1997年,采用波分复用技术(WDM)的20 Gbit/s和40 Gbit/s的SDH产品试验取得重大突破。

此外,在光孤子通信、超长波长通信和相干光通信方面也正在取得巨大进展。

总之,从1970年到现在虽然只有短短不到50年的时间,但光纤通信技术却取得了极其惊人的进展。用带宽极宽的光波作为传送信息的载体以实现通信,几百年来人们梦寐以求的幻想在今天已成为活生生的现实。光纤不仅可以传输数字信号,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,以及其他数据传输系统中,都得到了广泛应用。光纤不仅在通信和专用通信中被广泛采用,而且还在其他领域如测量、传感、自动控制和医疗卫生等具有重要意义。然而就目前的光纤通信而言,其实际应用仅是其潜在能力的2%左右,尚有巨大的潜力等待人们去开发利用。因此,光纤通信技术并未停滞不前,而是向更高水平、更高阶段方向发展。

1.3.3 光纤通信的发展

1.3.3.1 向超高速、超大容量系统发展

随着社会的发展,信息的传输量需求大幅度提高,提高通信容量的主要途径是减小信道间距,扩展带宽以及采用混合复用技术,信道间距是在带宽不变的条件下,增加光信道数目从而提高波分复用(WDM)系统的通信容量的一种方法。扩展带宽是针对传统光纤传输系统主要工作在低损耗C波段(1 565~1 625 nm)而言的。在此基础上,已经开辟了长波段L(1 530~1 565 nm)与短波段S(1 460~1 530 nm)两个波段,并且实现了三个波段信号的同时传输。而混合复用技术是由单一复用技术向多种复用技术混合使用的方向发展,如双向传输的波分复用、偏振复用(PDM)与波分复用混合方式,波分复用与码分复用(CDM)的混合方式等。当单信道码率达到40 Gbit/s以上时,信号必须采用光时分复用。光时分复用利用了高速光开关将多路光信号在时域里复用到一路上的技术,其基本原理是在发送端的同一载波波长上,把时间分割成周期性的帧,每一帧再分割成若干个时隙,然后根据一定的时隙分配原则,使不同的信源在每帧内按照指定的时隙向信道发送信号,接收端在同步的条件下,分别在各个时隙中取回各自的信号。

1.3.3.2 向光传送网、全光网络方向发展

通信网是为了信息交换的目的而相互连接在一起的节点的集合,节点既可以是终端节点,如电话机、电传机、电视机、计算机,也可以是其他网络的节点,如交换机、路由器、中继器和传送设备等,是信息传送和交换的基础设施。早期通信网都是由电线、电缆等纯电子器件组成的电子设备构成的,技术性能和水平均受到限制,属早期传统的低水平的网络。

光通信系统技术的发展,为近代光波通信网络的发展创造了条件,首先采用光波通信技术对传统电缆电信网完成了升级改造,构成了第一代光波通信网络,其典型的代表如光纤分布式数字接口(FDDI)、分布式排队双总线(DQDB)和光同步数字体系(SDH/SONET)等,相对于光波通信初期的点到点的光纤链路传输方案,技术复杂,科学内涵丰富,有力地推动了网络时代和信息社会发展的进程。

自 20 世纪 80 年代末,光同步数字体系(SDH/SONET)问世后,SDH 在历史上第一次实现了全球统一的传送网标准,规范了光接口,而且定义了对光信号质量的监控、故障定位和远程配置等网络管理功能,是当代通信网实用的主流技术,在国内外得到了广泛的应用,成为信息高速公路的重要支柱。但是,在光域 SDH 主要起传输媒质的作用,信息的处理都是经过光/电转换后在电域完成的,这不仅需要庞大的光/电和电/光转换设备,而且处理速率受到电子迁移率的限制。而另一方面,随着社会信息化的发展,数据业务爆炸式的增长,基于电路交换的 SDH/SONET 已不能完全适应社会的发展要求,光波通信网的运行受到强大的压力,光波通信网有待进一步发展。

20 世纪 90 年代初,宽带光纤放大器(EDFA)的商用化,为进一步挖掘光纤带宽潜力,实现光波分复用(WDM)提供了条件,极大地增加了光纤的传输容量,也为在光层实现联网提供了可能。与此同时,交叉连接设备(OXC)和光分插复用设备(OADM)相继研制成功,有力地推动了以波长为交换粒度的全光传送网(OTN)的问世,OTN 是一类具有高度灵活性、透明性和生存性的光网络,成为 20 世纪 90 年代初近 10 年内最热门的研究课题。我国的长途骨干网也将逐步引入 OADM 和 OXC,逐渐形成长途 DWDM 环,组成光传送网。光传送网具有超大容量,可消除电节点设备的瓶颈,网络很容易扩展,允许节点数和业务量不断增长,并具有可重构性。光传送网的透明性好,允许混合不同体制、格式和速率的信号,能够互联现有系统及任何未来的新系统。光网络还能够实现快速恢复,比电网络恢复快 2~4 个数量级。光传送网络已经成为继 SDH 网络以后的又一次新的光通信发展高潮。

进入 21 世纪后,WDM 提供的带宽资源已能满足当前通信业务流量的需求,而传输容量的飞速增长对现存的交换系统的发展产生了压力。由于电子器件本身的物理极限,传统的电子设备在交换容量上难以再有质的提高,交换过程的“电子瓶颈”问题成为限制通信网络吞吐能力的主要因素。

全光网络中各节点信号的连接和交换在光域内进行,波长路由就是指这种连接和交换依据波长来确定,亦即当光信号从输入端传送到输出端时,是根据它们的波长进行路由选择的。波长路由有两个特点:一是波长路由决定了光信号选取的路径,如果多波长复合信号从同一节点发出,则各个波长信号将达到不同的目的点,而目的点数目等于各个节点产生的波长数;二是每个波长的信号被限制在某一特定路径,因而在整个网络的不同路径上同一个波长可以多次使用,只要这些路径不共存于相同的光纤链路。这就是所谓的波长空间复用。

全光网络具有如下主要优点:

(1) 可以极大地提高光纤的传输容量和节点的吞吐量,以适应未来高速宽带通信网的要求。

(2) 光交叉连接器(OXC)和光分插复用器(OADM)对信号的速率和格式透明,可以建立一个支持多种电信格式的、透明的光传送平台。

(3) 以波长路由为基础,可实现网络的动态重构和故障的自动恢复,构成具有高度灵活性、生存性光传送网。

光波通信由点到点的 WDM 链路发展到基于波长交换的全光传送网(OTN),是通信