

董孝义 王廷尧 编著

天津科学技术出版社

新一代 光纤通信 与同步网 原理与发展



新一代
光纤通信
与同步网
——原理与发展

董孝义 王廷尧 编著

天津科学技术出版社

津新登字(90)003号

责任编辑:宋淑萍

新一代光纤通信与同步网

——原理与发展

董孝义 王廷亮 编著

*

天津科学技术出版社出版

天津市张自忠路189号 邮编 300020

天津新华印刷一厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本 787×1092毫米 1/16 印张 21.75 插页 1 字数 528 000

1994年9月第1版

1994年9月第1次印刷

印数:1—1 500

ISBN 7-5308-1582-2
TN·20 定价:43.00元

内 容 简 介

光纤通信是现代社会的—种最优秀的信息传输手段,其通信容量之大、通信模式之多,令世人刮目相看。

本书是在作者多年研究成果、论文及工程设计实践的基础上,并吸收国外最新资料编著而成的。全书共九章分为两篇。第一篇为新一代光纤通信部分,共六章,分别阐述了现行光纤通信系统的简要原理、光纤的非线性和非线性,以及相干光通信、复用光通信、光孤子通信、量子光通信等新一代光通信的原理和发展;第二篇为光纤同步网部分,共三章,分别叙述了现行异步复接体制、同步复接体制和自动纠误光缆通信系统的原理、应用和发展等。

本书适合光纤通信科研院所的工程设计人员及有关专业的大专院校师生参考,也可用作光纤通信技术培训教材。

前 言

光纤通信是本世纪最伟大的成就之一,它为现代化社会提供了一种最优秀的信息传输手段,其通信容量之大,其通信模式之多,实令世人刮目相看。但令人遗憾的是,这巨大之容量,这众多之模式,大多数尚未被挖掘。当今已开发的光纤通信仅仅处于最初级的阶段而已。现实与理想间的矛盾驱动人们做出不懈的努力,在光纤通信领域展开了一个又一个的科技攻关。作者有幸参加了这一有意义的工作,并取得了一些不大的成果,这些又促使作者引发出一个个“体会”、“心得”和“构想”,并由此撰写出一篇篇“评述”、“论文”等,把这些有机地组合起来,再略作加工,就成了这本拙作。可见,这本书有很多不成熟之处,使用的文献资料也是最新的,加之作者的水平有限,书中不妥乃至错误之处定会很多,恳请读者批评指正。

全书共九章,分两篇写成。第一篇为新一代光纤通信部分,共六章,分别阐述了现行光纤通信系统的简要原理、光纤的非线性和主动性、以及复用光通信、相干光通信、光孤子通信、量子光通信等新一代光通信的原理和发展;第二篇为光纤通信同步网部分,共三章,分别阐述了现行异步复接体制、同步复接体制和自动纠误光缆通信系统的原理、应用和发展等。第一篇由董孝义撰写,第二篇由王廷尧撰写,董孝义统校了全书。

在此书撰写过程中得到了叶培大学部委员的热情鼓励。他多次讲,近年来他一直想为研究生撰写一部阐述新一代光纤通信系统的教材,但一直因为忙没有起笔。现在已有这样的书面世,确实是值得庆幸的。另外在撰写中还得到杨恩泽教授、肖春华高级工程师、淳于琪高级工程师等诸多同仁的关怀和支持,王玉兰副教授、于昉、文雅贤、王万年、王桑、李煜美、宋瑶英等同志为此书的出版做了大量工作,在此一并致谢。最后还要特别感谢天津科学技术出版社编辑的热情支持及悉心指导,为本书的顺利出版提供了条件。

编 者

1994年3月

目 录

绪 论	(1)
-----------	-----

第一篇 新一代光纤通信

第一章 现代光纤通信及其局限性	(7)
§ 1.1 现行光纤通信系统构成	(8)
§ 1.2 现行光纤通信系统的光源	(9)
§ 1.3 现行光纤通信系统中的光探测器	(10)
§ 1.4 光纤	(11)
1.4.1 光纤的基本结构与制作	(11)
1.4.2 光纤的基本特性	(11)
1.4.3 光纤的传输	(14)
§ 1.5 现行光纤通信的局限性	(17)
1.5.1 光纤非线性对光通信的限制作用	(17)
1.5.2 电子器部件响应速度对光通信的限制	(23)
1.5.3 通信模式的限制	(24)
第二章 光纤的非线性、主动性及其应用	(26)
§ 2.1 光纤中的非线性光学效应	(27)
§ 2.2 光纤中的群速度色散与非线性	(29)
2.2.1 群速度色散对光脉冲的展宽作用	(29)
2.2.2 光频啁啾	(30)
2.2.3 四类传输过程	(31)
§ 2.3 光纤中的非线性耦合波方程及其解	(32)
2.3.1 光纤中的受激喇曼和受激布里渊散射	(34)
2.3.2 光克尔效应	(38)
2.3.3 自相位调制与交叉相位调制	(39)
2.3.4 光四波混频及其相位匹配技术	(42)
§ 2.4 掺杂光纤及其激光特性	(45)
2.4.1 掺杂光纤	(45)
2.4.2 石英光纤中掺杂稀土离子的光谱特性	(47)
2.4.3 掺杂光纤的激光特性	(49)
2.4.4 掺杂光纤激光过程的噪声特性	(51)
§ 2.5 光纤放大器	(54)
2.5.1 掺杂光纤放大器的结构和工作模式	(56)
2.5.2 光纤放大器的应用	(58)

2.5.3 串联光纤放大与分布式光纤放大	(60)
§ 2.6 光纤激光器	(64)
2.6.1 光纤谐振腔	(64)
2.6.2 全光纤(All-Fiber)通信的实现	(68)
§ 2.7 晶体光纤	(69)
第三章 复用光纤通信	(72)
§ 3.1 光波复用通信	(72)
3.1.1 波分复用(WDM)通信	(72)
3.1.2 空分复用(SDM)通信	(77)
§ 3.2 光波信号复用通信	(82)
3.2.1 时分复用(TDM)通信	(83)
3.2.2 频分复用(FDM)通信	(84)
第四章 相干光通信	(86)
§ 4.1 相干光通信的基本构成	(86)
§ 4.2 相干调制	(88)
4.2.1 直接调制	(89)
4.2.2 外调制	(89)
4.2.3 相干光通信中的调制方式	(95)
§ 4.3 相干探测	(96)
4.3.1 光频外差探测与解调原理	(96)
4.3.2 光外差的混频效率与有效量子产额	(97)
4.3.3 光外差的信噪比分析	(98)
4.3.4 几种数字相干光通信方式的误码率	(100)
4.3.5 相干光通信的优异特性	(101)
§ 4.4 相干光通信的关键技术	(102)
4.4.1 具有高频谱纯度的相干光源	(102)
4.4.2 相干光探测的匹配技术	(104)
4.4.3 新接收技术的开发	(108)
§ 4.5 相干光通信实验系统	(110)
第五章 光孤子通信	(113)
§ 5.1 相干光脉冲的传输特性	(113)
5.1.1 光脉冲在色散介质中的传输特性	(114)
5.1.2 线性吸收/增益介质中的光脉冲	(116)
5.1.3 非线性介质中的光脉冲	(117)
5.1.4 调制器对光脉冲的作用	(118)
5.1.5 具有线性啁啾的光脉冲通过色散介质的物理图像	(118)
§ 5.2 孤子方程及其基本特性	(120)
5.2.1 基态光孤子与高阶光孤子	(120)
5.2.2 损耗对光孤子传输的影响	(123)
5.2.3 频率啁啾对光孤子传输的影响	(125)
5.2.4 高阶效应对光孤子传输的影响	(125)

5.2.5 暗孤子.....	(127)
5.2.6 孤子互作用	(128)
§ 5.3 光孤子通信(实验)系统	(130)
5.3.1 光孤子通信系统的组成.....	(130)
5.3.2 光孤子源.....	(130)
5.3.3 光孤子的探测.....	(133)
5.3.4 光孤子的调制、编码	(137)
5.3.5 光孤子通信实验系统	(138)
§ 5.4 光孤子通信系统设计中的若干问题	(142)
第六章 量子光通信	(144)
§ 6.1 光波、光子与信息	(144)
6.1.1 光子、电子、波粒二重性.....	(144)
6.1.2 光子承载信息的能力	(145)
§ 6.2 量子光通信中的关键技术	(147)
6.2.1 光子计数.....	(147)
6.2.2 量子无破坏测量.....	(152)
6.2.3 亚泊松态与亚泊松态激光器	(158)
§ 6.3 量子光通信实验装置	(159)

第二篇 光纤同步网

第七章 现行异步复接体制	(165)
§ 7.1 绪言	(165)
§ 7.2 数字系列	(166)
§ 7.3 复接方法	(167)
7.3.1 概述.....	(167)
7.3.2 PCM 基群 30 路的复用	(167)
7.3.3 高次群复接原理	(170)
§ 7.4 异步设备	(174)
7.4.1 线路设备.....	(174)
7.4.2 数字复接设备.....	(182)
7.4.3 系统辅助设备	(187)
§ 7.5 光纤通信系统	(194)
7.5.1 系统组成.....	(194)
7.5.2 参考模型.....	(194)
7.5.3 系统主要性能	(196)
§ 7.6 异步复接系统存在的问题	(196)
7.6.1 国际统一接口.....	(197)
7.6.2 复接方式.....	(197)
7.6.3 上/下话路	(197)
7.6.4 辅助信道容量.....	(198)
7.6.5 系统维护.....	(198)

7.6.6 系统的可靠性与造价	(198)
第八章 同步复接体制(SDH)	(199)
§ 8.1 发展历史	(199)
§ 8.2 数字系列	(200)
§ 8.3 复接方式	(201)
8.3.1 复接帧结构	(201)
8.3.2 STM-1 结构图	(203)
§ 8.4 系统性能以及标准光电接口	(210)
8.4.1 同步数字系列光纤系统性能	(210)
8.4.2 标准电接口	(211)
8.4.3 标准光接口	(212)
§ 8.5 同步数字系列(SDH)的优点	(213)
8.5.1 确定世界统一光纤网络接口	(213)
8.5.2 充分的辅助信道与备用信道	(213)
8.5.3 简化的复接与上/下路功能	(214)
8.5.4 先进的操作、管理与维护功能	(214)
8.5.5 确定了统一新型网络部件	(214)
8.5.6 为同步数字系列(SDH)网络提供方便的扩展能力	(215)
8.5.7 迅速实现网络的路由连接与更改	(215)
§ 8.6 同步宽带网的主要设备	(216)
8.6.1 终端复接设备(TM)	(216)
8.6.2 上/下路复接设备(ADM)	(218)
8.6.3 同步数字跨接设备(SDXC)	(219)
8.6.4 网络管理系统设备(NMS)	(221)
§ 8.7 同步交错器(SIR)	(221)
8.7.1 绪言	(221)
8.7.2 同步交错器的基本类型	(222)
8.7.3 随机存储器组成的同步交错器	(223)
8.7.4 设计实例	(231)
8.7.5 结语	(232)
§ 8.8 同步数字复接器电路的设计	(232)
8.8.1 终端数字复接器的分类	(232)
8.8.2 64 通道字同步交错器	(233)
8.8.3 高速同步交错复接器	(236)
8.8.4 SONET STS-3C 用户网络接口电路	(242)
§ 8.9 异步传递方式(ATM)	(256)
8.9.1 引言	(256)
8.9.2 字组单元结构	(256)
8.9.3 ATM 性能特点	(258)
8.9.4 ATM 硬件设计	(260)
§ 8.10 一些国家的同步数字系列设备	(269)
8.10.1 SONET 光纤同步网	(269)

8.10.2	日本 NTT 公司新型同步接口设备	(272)
8.10.3	阿尔卡特(Alcatel)同步复接数字系列设备	(273)
8.10.4	爱立克逊(Ericsson)电信产品	(279)
8.10.5	飞利浦(Philips)电信产品	(280)
8.10.6	澳洲电信同步网	(283)
§ 8.11	同步数字系列(SDH)的有关 CCITT 标准建议	(283)
8.11.1	概述	(283)
8.11.2	关于同步复接器的建议(G. 781、G. 782 和 G. 783)	(284)
8.11.3	关于 SDH 设备管理方面的 G. 784 建议	(285)
8.11.4	以 SDH 为基础的光缆数字线路系统建议(G. 958)	(285)
8.11.5	光线路接口(G. 957 建议)	(287)
8.11.6	关于 SDH 网络方面的建议(G. San1 和 G. San2)	(288)
第九章	自动纠误光缆通信系统	(289)
§ 9.1	概述	(289)
§ 9.2	纠误编码的基本概念	(289)
9.2.1	分组码	(289)
9.2.2	奇偶监督码与汉明码	(290)
9.2.3	反馈移位寄存器的多项式描写	(290)
9.2.4	循环码	(291)
9.2.5	几种特殊循环码	(292)
§ 9.3	纠误码在损耗限制型光缆通信系统中的应用	(293)
9.3.1	绪言	(293)
9.3.2	交错延迟十单位自动纠误光缆通信系统的设计	(294)
9.3.3	自动纠误码在光缆通信系统的应用	(298)
§ 9.4	纠误码在色散限制型光缆通信系统中的应用	(299)
9.4.1	绪言	(299)
9.4.2	纠误码在光同步网(SONET)系统中的应用	(300)
9.4.3	纠误码在光缆同步数字系列(SDH)通信系统中的应用	(312)
9.4.4	一种用于 565Mbit/s 光缆通信系统的前向纠误编码方案	(313)
§ 9.5	光纤分配数据接口(FDDI)的误码特性	(317)
9.5.1	概述	(317)
9.5.2	FDDI 编码	(318)
9.5.3	FDDI 规约数据单元	(319)
9.5.4	帧有效性判据	(320)
9.5.5	分类、标准与假设条件	(321)
9.5.6	允许误码率	(322)
9.5.7	单个随机噪声影响	(323)
9.5.8	帧差错率	(325)
9.5.9	令牌帧损失率	(326)
9.5.10	帧校验序列(FCS)多项式	(326)
9.5.11	帧合并	(329)
9.5.12	帧结束符错误	(330)

9.5.13 帧起始符差错	(331)
9.5.14 扩大帧正确判据要求	(331)
9.5.15 结语	(332)
参考文献	(334)

绪 论

光通信是指以光作为信息载体实现的通信。与电通信比较,光通信也可划分为“无线通信”(空间通信)和“有线通信”(光纤通信),前者以大气作为信息传递的导波介质;后者则以光纤作为信息传递的导波介质,由于光纤技术的迅猛发展,已使光纤通信在光通信中几乎成为“主流”,因此,下面除非加以提示,一般情况下在提及光通信时均指光纤通信。

如果追溯人类用光传递信息的历史,至今差不多已有三千多年的时间,就此而言,电通信似乎是“望尘莫及”。但是作为一门技术来说,光通信还是近几十年的事情。作为第一个以无线方式进行光通信的应首推美国贝尔的二百米光电话实验,而在其后,作为第一个以有线方式进行的光通信实验则是英国的亨德尔完成的,不过,由于当时技术条件的限制,这些实验无法获得推广应用,因此只能说,它们仅仅是一种光通信的原理性演示,是一种光通信技术的雏型,在历史上没有得到强烈反响。直到1960年激光的发明才真正促成了光通信的实质性发展。激光因具有高亮度和高度相干性而成为光通信所需要的理想光源。过了十年,相继发生的两件重大事件又为光通信的崛起带来契机,这就是低损耗($\sim 20\text{dB/km}$)光纤和可在室温下工作的半导体激光二极管(LD)的研制成功,它们的面世一下子为光通信打开了广阔的市场,因此有人称它们是光通信发展史上的两个重大里程碑。

其后,光通信的发展几乎是“一帆风顺”。如果从1970年算起,至今只不过22个年头,但光纤通信已历经了三个“时代”。1975~1976年以前被认为是光纤通信的第一个时代,这一代通信技术的特征是:光源是短波长($0.85\mu\text{m}$)的,光纤是多模的,实用化系统是1976年完成的,使用 $0.82\mu\text{m}$ 波长的AlGaAs激光器、PCM三次群信号,传输码速为45Mb/s。这种系统很快得到推广。与此同时人们又发现,在 $1.3\mu\text{m}$ 波长处石英光纤材料的色散趋于零,而且损耗也趋更低的值,可达 0.5dB/km 。这样,就为光纤通信开辟了第二个窗口,习惯上称为长波长窗口。进而人们又先后研制成功长波长的激光器(InGaAsP器件)和探测器(APD和PIN器件)。到1982年由这种长波长器件与多模光纤相结合,中等码速的光通信系统得到推广,这就是第二代光纤通信,又简称长波长多模光纤时代。第二代系统的传输码速与距离都优于第一代的短波长($0.85\mu\text{m}$)多模光纤的系统,因此第二代系统很快取代了第一代系统。

从1982年起人们又开始了新的实验尝试:将长波长器件与单模光纤结合,组成可传输更高码速的通信系统,典型的码速为600Mb/s,中继距离达30km,这种系统的研制成功和推广应用标志着光纤通信的发展进入第三代,即长波长单模光纤的时代。目前还处在这一代中。但是已经发现,在长波长 $1.55\mu\text{m}$ 处还有一个低损耗窗口,损耗可达到更低的值(0.16dB/km),因此更具吸引力,已有诸多的 $1.55\mu\text{m}$ 波长单模光纤实验通信系统开始启动,这预示着新的一代——第四代光纤通信即将开始。

至此人们一定要发问,今后第五代、第六代光纤通信又将是什么样子,是否也将按上述那种“模式”发展?老实讲,确切地回答这些问题是很困难的,即使有答案,恐怕也不尽相同。现在暂且将问题隔置一边,先让我们来看看,目前已实用或接近实用化的系统在信息容量上距理想光纤通信到底还相差多少。

已知现行光通信的光载波其频率大约在 10^{14} Hz 量级,因此光纤本身的理论带宽达 1 THz 以上;而目前已获得的最高传输码速为 2.4 Gb/s,即相当于光纤潜在传输能力的 0.24%,或者说光纤的传输能力大部分尚未开发。是哪一些因素限制光纤通信的深入开发呢?下述诸因素是显然的:

1. 电端机中电子器件的限制

由于电子器件的响应频率是有限的,在现行的光纤通信制式下,由电端机驱动的光端机的码速自然也受到限定,例如现在的电子器件只能运转在几个 Gb/s 以下,因此现行光通信系统的极限码速也在几个 Gb/s 的限度内,从这点看,目前达到的光纤通信码速已接近这个极限。

2. 通信模式的限制

现行光纤通信系统均按(光强调制/直接检测)通信制式工作,它雷同于电通信中最早期的(火花脉冲发射/矿石检波接收)运行模式,就是说,从通信制式上讲,现行光纤通信系统只相当百年前的电通信的水平,在这种制式下,光波的诸多“优良”特性被遗弃了。例如,激光具有极好的相干性,利用时间相干性可实现相干光通信,利用空间相干性可实现空间复用通信;光还有量子特性,利用量子的无破坏测量及光子计数可实现光量子通信,它可以将无穷多信息无损耗地传送给无穷多个收信者;光还有波长可分性、偏振可分性等等,利用这些特性又可以实现各种复用形式的多维通信,如此等等,在现行的通信制式下不可能得以实现。如果我们能从现行通信制式的束缚下解放出来,充分利用光的优良特性,光通信系统的信息容量将有可能成量级的倍增,光通信的潜在能力也就能够得以充分发挥。

3. 光纤的非线性特性的限制

在现行通信体制下,光纤是作为线性导波介质工作的,因此称现行的通信系统为线性系统。在这种情况下光纤的任何非线性效应都是有害的。例如,光纤中的受激散射(受激喇曼、受激布里渊)效应、自相位和交叉相位调制效应、四波混频效应等等,都会导致光纤传输特性的劣化,使信噪比降低、信号失真等。对于线性系统,这种状况几乎是不可能改变的,从这个意义上讲,线性系统中的光纤是一种被动性传输介质。那么如何变被动为主动呢?研究发现,光纤的多数非线性效应都可用于改进通信的质量,也就是促成光纤的非线性变为光纤的主动性。例如,利用光纤中受激散射引致的喇曼放大或布里渊放大作用,制作出分布型光纤放大器;利用光纤的自相位调制效应补偿光纤的色散,实现光孤子的传输等等。在这种情况下,线性通信系统转化为非线性系统。理论和实验均已证明,非线性系统较之线性系统具有更好的通信性能,其通信容量大大超过线性系统,而且具有进一步挖掘的潜力,因此成为光纤通信的研究热点。

至此有一个问题发人深省:从上述情况看,无论是哪一代光纤通信系统,尽管在器件和光纤介质上有不同,但就其通信模式和光纤本质而论并无差别,因此已实现和正在实现的光纤通信系统,其性能并没有惊人的提高,距光纤通信的潜在能力相差极远。以作者之拙见,如果仍以这种单一的通信模式发展下去,也可能有称其为第五代、第六代的光纤通信系统相继问世,但可以肯定,不会有惊人之举,在性能指标上不会有本质上的提高。其实,如上所述,人们在克服“三大限制”的过程中已经开拓出许多新概念、新构思和新模式,如利用光纤非线性效应建立的光孤子通信系统、利用光源的时间相干性实现的相干光通信系统、利用光波及波前的可分性完成的复用通信系统、利用光的量子性正在研制的光量子通信系统等等。特别是近年来,掺杂光纤激光放大器件的开发,光电集成的崛起,使这些新系统如虎添翼,得以迅猛发展,近期有可能在通信容量上有惊人的突破。因此有关这些新系统的研制进展,已成为光通信领域中引人关注

的焦点。但令人遗憾的是,全面阐述这些系统的原理、机制等方面的书籍至今尚未见面世。

光纤通信的另一个令人瞩目的发展点是,对光纤同步网的开拓,这将为全球统一的宽带数字综合服务网(B-ISDN)建设和发展奠定坚实的基础。与现行的异步复接体制相比,同步网的优越性是显而易见的。众所周知,支撑当今和未来社会的重要支柱之一是信息。在此,信息的融通是至关重要的,只有融通,信息才能发挥作用、创造财富,只有融通,信息才能称其为信息。要确保信息融通,则要靠网,靠同步网,只有借助同步网才能把一个国家、乃至全世界的电话机、电传机、计算机等各种信息设置联系起来。正因为如此,世界各国对同步网的建设极为重视。自1985年开始,世界各发达国家相继研制出同步网设备。在此基础上,国际电报电话咨询委员会(CCITT)制定了一系列关于光纤同步网的配套建议,其中包括同步数字系列(SDH)比特速率建议(G. 707)、SDH网络节接口标准(G. 708)和SDH复接结构建议(G. 709),以及关于同步数字系列设备(G. 781、G. 782、G. 783)、SDH系统管理(G. 784)、SDH网络光接口(G. 957)和SDH光线路系统(G. 958)等建议草案,为光同步网的发展创造了良好条件。

世界几个发达国家美、德、日、英、法等正在研制光同步设备的同时,正在积极建设光同步网络。就连澳大利亚也将于1993年开始兴建光同步网。预计从1998年开始不再生产异步复接设备,而只生产光同步设备了。美国从1992年开始要将光纤通信系统全部采用同步复接设备。可见,光同步网建设以及新制式光通信进网已成为时代发展趋势。

在我国预计最迟也要在近5~10年内完成光同步设备的研制以及光同步网的建设,因此,了解这种世界趋势,掌握其相关前沿科学技术已成为当务之急。

正是基于上述形势,我们编著了《新一代光纤通信与同步网》一书。其中大部分内容选自我们最近一个时期发表的论文或翻译资料。

第一篇

新一代光纤通信

