

► 21世纪通信网络技术丛书

App
A
li
cation

网络通信与工程应用系列

光通信中的OFDM

OFDM for Optical Communications



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪通信网络技术丛书
——网络通信与工程应用系列

光通信中的 OFDM

OFDM for Optical Communications

[美] William Shieh 著
Ivan Djordjevic

白成林 冯 敏 罗清龙 译

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

出版说明

通信网络技术是当今发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一。通信技术发展到今天,已经不是传统意义上的充满神秘色彩的深奥技术了,它已经与日常的应用密不可分。可以说,网络的出现,使通信技术得以有了广阔的用武之地。正是由于有了固定电话网、移动通信网和 Internet,使通信技术的应用在这些平台上有了用武之地,渗透到了我们日常生活的方方面面。

为了促进和推动我国通信产业的发展,电子工业出版社通信出版分社特策划了一套《21 世纪通信网络技术丛书》。这套丛书根据不同的层面,又细分为三个系列:《移动通信前沿技术系列》、《3GPP LTE 无线通信新技术系列》和《网络通信与工程应用系列》。

《移动通信前沿技术系列》是从移动通信技术(3G 技术)的应用现状与发展情况出发,全面介绍当今移动通信领域涉及的关键技术与热点技术,例如:软件无线电;移动 IP 技术;移动数据通信;WCDMA;TD-SCDMA;cdma2000;移动通信系统网络规划与优化;智能天线技术;认知无线电技术;WiMAX,WiFi,ZigBee 宽带无线接入技术;UWB 技术;UMTS 技术;Ad Hoc 技术等。

《3GPP LTE 无线通信新技术系列》是以 3GPP 中 LTE 标准的关键技术在无线、宽带、高速、资源中的有效管理和利用,以及在 B3G/4G 无线通信领域中的应用为主。LTE 作为 3G 技术的一个重要的长期演进计划,代表了国际无线通信领域的最新发展需求和解决方案,例如:基于 OFDM 的上、下行(HSxPA)的多址接入技术、随机接入技术、多天线 MIMO 技术、多链路自适应技术、多播技术、功率控制技术、宽带无线网络的安全性、可移动性、可管理性;高效信源与信道编码和调制 MQAM 技术等。

《网络通信与工程应用系列》是以技术为先导,以构建网络的体系结构、标准、协议为目标所开展的对现代无线、移动、宽带通信网络的规划与优化,以及结合工程应用的方向所提出来的。例如:无线网状网、WLAN、无线传感器网络、3G/B3G/4G 通信网工程设计与优化、卫星移动通信网、三网融合技术、网络新技术与策略、RFID 应用网络、下一代基于 SIP 的统一通信、光网络与光通信等。

本套丛书依托各高等院校在通信领域从事科研、教学、工程、管理的具有丰富的理论与实践经验的专家、教授;各研究院所的研究员;国内有一定规模和研发实力的科技公司的研发人员,以及国外知名研究实验室的专家、学者等组成编写和翻译队伍,力求实现内容的先进性、实用性和系统性;力求内容组织循序渐进、深入浅出、理论阐述概念清晰、层次分明、经典实例源于实践;力求很强的可读性和可操作性。

本套丛书的主要读者对象是广大从事通信网络技术工作的各科研院所和公司的广大工程技术人员;各高等院校的专业教师和研究生;刚走上工作岗位的大学毕业生;以及与此相关的其他学科的技术人员,供他们阅读和参考。

本套丛书从 2008 年上半年开始陆续推出,希望广大读者能关注它,多对本套丛书提出宝贵意见与建议,欢迎通过电子邮箱 wchn@phei.com.cn 进行探讨、交流和指正,以便今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术类图书。

电子工业出版社
通信出版分社

译 者 序

光正交频分复用(O-OFDM)是最近几年被广泛研究和关注的新技术,由于在未来高速率、长距离通信条件下,传统光通信对光纤色散的分段补偿显得昂贵而耗时,同时 DSP 等技术的发展使得 OFDM 在无线领域取得了广泛的应用和巨大的成功,因此光通信与正交频分复用技术的结合便应运而生。O-OFDM 技术应用在光网络中可以有效地提高系统抵抗色度色散及偏振模色散等效应的能力,从而改善网络的性能。

本书作者 William Shieh 博士和 Ivan Djordjevic 博士,在非线性光学和光纤通信系统领域论著颇丰。《光通信中的 OFDM》是他们合作推出的一本系统介绍光正交频分复用(O-OFDM)技术理论和应用的新作,其主要内容包括正交频分复用(OFDM)和光通信的基本原理、光纤中的偏振效应、光 OFDM 中的信号处理和编码、各种类型的光 OFDM、高速相干 OFDM 系统、正交频带复用的 OFDM、多模光纤系统中的 OFDM 以及自由空间光通信系统中的 OFDM 和 OFDM 在光接入网络中的应用等。同时,作者还对该技术的发展趋势以及应用前景做出了展望。纵观全书,其内容系统完整、理论体系严谨,但又深入浅出,是一本不可多得的好书。

本书由白成林负责翻译前言、第 2 章至 4 章、第 6 章、第 9 章和第 11 章,冯敏负责翻译第 5 章、第 7 章和第 8 章,罗清龙负责翻译第 1 章、第 10 章和第 12 章,全书由白成林和罗清龙统稿。硕士研究生房文敬、郎丰法、赵正曦、孙伟斌、汤溟、王燕、谢务友、于朋朋、刘新建、张守辉、刘洪朋协助完成了部分章节的初译工作。在此特向他们致以深切的谢意。

感谢 William Shieh 教授和 Ivan Djordjevic 教授对于本书的出版给予的合作,感谢武汉邮电科学研究院的杨奇教授对我们的热情帮助,感谢电子工业出版社对翻译工作的大力支持。由于本书内容涉及多学科专业知识,译者水平有限,不妥和疏误之处,欢迎广大读者批评指正。

译 者

前 言

我们最近目睹了光通信领域专家对正交频分复用 (OFDM) 技术表现出的异乎寻常的兴趣, 这一点也可以从不断增长的出版物数量和许多引人注目的验证 OFDM 技术的实验报道中得到证明。OFDM 技术在光通信领域应用的主要推动力之一是遵循“摩尔”定律的基于硅的信号处理能力的迅速提高。复杂的电子数字信号处理 (DSP) 和编码技术的使用从根本上改变了光网络的现状。另一方面, 虽然在无线通信领域中 OFDM 作为最重要的物理接口已经存在了二十多年, 但是很多光学工程师对此技术仍感到相当陌生。最常问到的一个问题是 OFDM 能否为今日“脆弱”而又“僵化”的光网络出现的麻烦提供解决方案。

这本书试图对独特的具有广泛应用价值的 OFDM 信号处理和编码的基本原理进行全面而又清晰的阐述, 其目的是想使该书适用于两类研究人员: (1) 对光学理论十分熟悉, 且对应用 OFDM 技术感兴趣, 但又畏惧复杂的 OFDM 专业术语的光通信工程师; (2) 能够熟练地使用 DSP, 但又无法将光通信和射频 (RF) 通信紧密联系起来的无线通信工程师。我们努力使每一章具有相对独立性, 同时又保持了章与章之间的内容联系和流畅。

全书共分 12 章, 涉及光 OFDM 的方方面面, 既包括了光 OFDM 中信号处理和编码的基本公式, 又包括了各种各样的具体应用, 如单模光纤传输、多模光纤传输、自由空间光系统和光接入网络等。本书还介绍了光通信的基本概念、基本的信道损耗和噪声源以及光系统的工程处理。该书指出了光 OFDM 领域的研究热点, 并初步探讨了引人关注的光 OFDM 技术的标准化问题。

作者对他们的同事表示衷心的感谢, 特别是在光 OFDM 课题中共同合作的 R. S. Tucker、G. Pendock、R. Evans、B. Krongold、H. Bao、W. Chen、X. Yi、Y. Tang、Y. Ma、Q. Yang、S. Chen、B. Vasic、L. Xu 和 T. Wang, 他们对本书的完成直接或间接地做出了贡献。我们还要感谢贝尔实验室的 C. Xie, 加州大学的 X. Yi, 墨尔本大学的 Davis、K. Hinton、R. S. Tucker 和 Y. Tang, 以及亚利桑那州立大学的 Hussam G. Batshon, 他们仔细校对了本书的每一章。同时, 作者感谢澳大利亚研究理事会甚宽带信息网络研究中心 (CUBIN)、澳大利亚国家信息通信技术有限责任公司 (NICTA) 和国家科学基金 (NSF) 对有关 OFDM 研究活动的支持。

最后, 将特别地感谢 Elsevier 出版社的 Tim Pitts、Melanie Benson 和 Sarah Binns, 正是由于他们的百倍努力才使得这本书顺利出版。

William Shieh^{*}
Ivan Djordjevic

作者简历

William Shieh, 澳大利亚墨尔本大学电气与电子工程系副教授及特约审稿人。他在 1994 年和 1996 年分别获得南加州大学电气工程硕士和物理学博士学位。1996 年至 1998 年间,他以技术人员身份就职于加州帕萨迪纳市的喷气动力实验室。1998 年至 2000 年间,他在新泽西州含德市的贝尔实验室(朗讯科技公司)从事技术工作。2000 年至 2003 年间,他担任马里兰州哥伦比亚市 Dorsal 网络的技术经理。2004 年之后,他一直就职于澳大利亚墨尔本大学电气与电子工程系。

Ivan Djordjevic, 美国图森市亚利桑那大学电气与计算机工程专业助理教授。他在 2006 年 8 月获亚利桑那大学此任职之前,历任英国布里斯托尔市西英格兰大学、布里斯托大学、美国伊顿镇泰科电信、希腊雅典国立科技大学研究助理教授。他当前的研究方向为:光网络、差错控制编码、受限编码、编码调制、Turbo 均衡、OFDM 应用以及量子纠错。他现在指导着亚利桑那大学电气与计算机工程系光通信系统实验室的工作。Djordjevic 博士同时还是 Research Letters in Optics 和 International Journal of Optics 的副主编。Djordjevic 博士发表了大约 100 篇期刊论文和 80 多篇学术会议论文。

目 录

第1章 导论	(1)
1.1 光通信的发展历史	(2)
1.2 光通信的发展趋势	(3)
1.3 摩尔定律及其对数字信号处理的影响	(6)
1.4 单载波还是多载波传输:一场光学争论	(8)
1.5 射频 OFDM 和光 OFDM 系统的不同	(11)
1.6 OFDM 给这场“竞赛”带来什么?	(13)
1.7 信道编码和 OFDM	(15)
1.8 本书综述	(15)
参考文献	(16)
第2章 OFDM 原理	(21)
2.1 引言	(21)
2.2 OFDM 的发展史	(21)
2.3 OFDM 基础	(22)
2.4 OFDM 信号的峰值平均功率比	(28)
2.5 频率偏移和相位噪声敏感性	(31)
参考文献	(35)
第3章 光通信基础	(38)
3.1 引言	(38)
3.2 主要的光学器件	(38)
3.3 噪声源	(58)
3.4 信道损耗	(64)
3.5 传输系统性能估计与系统设计	(75)
3.6 总结	(83)
参考文献	(83)
第4章 光 OFDM 中的信号处理	(84)
4.1 引言	(84)
4.2 点对点的 OFDM 信号处理	(84)
4.3 DFT 的窗口同步	(86)
4.4 频率偏移同步	(88)
4.5 子载波恢复:信道估计和相位估计	(89)
4.6 信道估计	(90)
4.7 数模/模数转换的影响	(98)
4.8 MIMO-OFDM 展望	(100)
参考文献	(103)

第 5 章 光纤中的偏振效应	(106)
5.1 引言	(106)
5.2 光纤中的偏振色散效应	(106)
5.3 偏振相关损耗	(113)
5.4 在偏振效应存在的情况下相干光 MIMO-OFDM 信号的理论模型	(114)
5.5 MIMO-OFDM 系统的仿真与实验研究	(116)
5.6 非线性偏振效应	(124)
参考文献	(127)
第 6 章 光 OFDM 系统中的编码	(130)
6.1 标准的 FEC 体系	(131)
6.2 图形编码	(143)
6.3 M 进制 QAM 和 M 进制 PSK	(158)
6.4 编码调制	(160)
6.5 直接检测光纤通信系统中的编码 OFDM	(164)
6.6 相干检测光纤通信系统中的编码 OFDM	(173)
6.7 总结	(183)
参考文献	(184)
第 7 章 各种类型的光 OFDM	(189)
7.1 引言	(189)
7.2 相干光 OFDM	(189)
7.3 直接检测光 OFDM	(195)
参考文献	(209)
第 8 章 高效频谱的高速相干 OFDM 系统	(212)
8.1 引言	(212)
8.2 正交频带复用的 OFDM	(212)
8.3 111 Gb/s 无保护间隔的 CO-OFDM 传输	(220)
8.4 100 Gb/s CO-OFDM 传输仿真	(222)
8.5 高频谱效率的 CO-OFDM 系统	(228)
参考文献	(230)
第 9 章 多模光纤系统中的 OFDM	(232)
9.1 多模光纤	(232)
9.2 MMF 链路中的光 OFDM	(235)
9.3 应用于中长 MMF 链路的光 OFDM	(241)
9.4 基于 MMF 链路的广播 MIMO 光 OFDM	(242)
9.5 总结	(250)
参考文献	(250)
第 10 章 自由空间光通信系统中的 OFDM	(252)
10.1 引言	(252)
10.2 FSO-OFDM 传输系统	(254)

10.3	大气湍流信道建模	(258)
10.4	软迭代译码	(262)
10.5	采用直接检测的编码 FSO-OFDM 系统的性能评价	(263)
10.6	混合光网络中的 OFDM	(265)
10.7	总结	(272)
	参考文献	(272)
第 11 章	OFDM 在光接入网络中的应用	(275)
11.1	RoF 系统中的 OFDM	(275)
11.2	无源光网络中的 OFDM	(278)
11.3	超宽带信号和光正交频分复用(OFDM)	(280)
11.4	基于塑料光纤(POF)的编码 OFDM	(285)
11.5	室内光无线通信与 OFDM	(289)
11.6	总结	(292)
	参考文献	(293)
第 12 章	未来研究方向	(295)
12.1	引言	(295)
12.2	1Tb/s 以太网传输的光 OFDM	(296)
12.3	多模光纤的高频谱效率长距离传输	(298)
12.4	光 OFDM 的光电子集成电路	(300)
12.5	光 OFDM 中的自适应编码	(301)
12.6	基于光 OFDM 的接入网	(304)
12.7	光 OFDM 的标准化问题	(306)
12.8	结论	(306)
	参考文献	(307)

第1章 导 论

在近乎无限宽的电磁波频谱中,现代宽带通信大量使用的只是其中的两个频谱窗口。第一个频谱窗口覆盖了从长波到毫米波的范围,频率从 100 kHz 到 300 GHz;而第二个频谱窗口位于红外光波区域,频率从 30 THz 到 300 THz。第一个频谱窗口提供我们日常生活中的应用,包括广播、电视、无线局域网(LANs)和移动电话。这些应用提供终端用户信息网络第一米或第一英里的接入,实现宽带连通和无线系统的可移动性。然而,大多数数据速率低于千兆每秒(Gb/s)的上限,这主要是因为射频频微波范围内缺乏可利用的频谱。与之不同的是,由于第二个频谱窗口内有几太赫兹(THz)的巨大带宽,光波系统可以提供 100 Tb/s 或更高的数据传输能力。实际上,光通信系统,特别是光纤通信系统,已经成为现代信息基础设施不可或缺的主干网。在过去的 10 年,全世界都在推动光纤入户。尽管互联网“泡沫”在 2000 年的早期就已破灭了,但是,互联网流量仍以每年 75% 的惊人速率增长^[1,2]。新兴的以视频为中心的应用,如 IPTV 将持续对信息基础设施造成压力。

数字调制技术通常可以分为两大类。第一类是单载波调制,其数据在一个主载波上传输。这是一种“常规”的调制方式,在光通信中已经使用了三十多年。事实上,近几年单载波调制经历了快速发展,对传统非归零(NRZ)格式的一些变换形式进行了积极探索,其中包括归零(RZ)^[3,4]、双二进制^[5,6]、差分相移键控(DPSK)^[7,8,9]和相干正交相移键控(QPSK)^[10-12]。第二类调制技术是多载波传输,其数据通过多个相互靠近却又彼此隔开的子载波进行传输。正交频分复用(OFDM)是一类特殊的多载波调制系统,最近,尤其是它被提出作为相干检测^[13]和直接检测^[14,15]的长距离传输方式后,在光通信领域备受关注。多个研究团体^[16-18]进行了传输速率为 100 Gb/s 的相干光正交频分复用(CO-OFDM)实验,这使得光 OFDM 跻身到下一代 100 Gb/s 以太网传输竞赛中。

OFDM 作为先进的调制技术已应用于射频领域,并且逐步成为发展快速、充满生机的发展方向。它几乎在每个主要的通信标准中都有成功应用,例如,无线局域网(IEEE 802.11 a/g,也被称为 Wi-Fi)、数字视频和音频标准(DAV/DAB)及数字用户环路(DSL)。因此,来自计算机领域的全球互通微波存取(WiMAX 或 IEEE 802.16)和来自电信领域的长期演进(LTE),这两个相互竞争的第四代(4G)移动网络标准,均采用 OFDM 作为其物理接口的核心技术也就不足为奇了。虽然光 OFDM 出现非常晚,但它却延续了无线领域已进行了十几年的争论——单载波和多载波传输谁更优的问题^[19,20]。OFDM 由于采用了快速傅里叶变换(FFT)而具有计算效率高的优势,但是,合并循环前缀基于块传输的单载波方式也可以达到同样目的^[19,20]。或许,OFDM 的优点与多载波调制技术固有的两个特性有关。第一个特性是可扩展的频谱划分,这种划分可以从单独的子载波到子波段或者是整个 OFDM 频谱,与单载波传输相比,无论是对设备、子系统还是系统级设计,这种特性都提供了巨大的灵活性。第二个特性是导频对数据载波的实时适应性,这样可以快速、方便地进行信道和相位估计。在本书中,我们打算解决单载波和多载波传输谁更优的争论,我们关注于和多载波调制有关的原理、设计、传输以及应用。对单载波传输高级调制格式感兴趣的读者,可以参考其他总结单载波传输进展的阅读材料^[21,22]。

光 OFDM 与射频既有相似之处,又有所不同。一方面,光 OFDM 存在着两个众所周知的问题,即峰值平均功率比(PAPR)和相位/频率噪声敏感性。另一方面,光通道有其一系列特有的问题。其中一个突出的差异是光纤通道存在非线性 and 其与光纤色散复杂的相互作用,这是射频系统不存在的。此外,在射频系统中,主要的非线性源于射频功率放大器,这是由于滤波器本身的损失,带通滤波器不能完全滤除带外泄漏所致。然而,在光 OFDM 系统中,无论是否达到饱和,掺铒光纤放大器(EDFA;目前最普遍的光纤放大器)都呈现出良好的线性,它通常和波长复用器配合使用,波长复用器可以消除带外频谱泄漏。

总之,读完本书后,我们希望读者——无论是来自射频或者是光学领域——都能抓住光 OFDM 系统独特的机遇和挑战。

1.1 光通信的发展历史

光作为一种通信手段是很自然的,可以追溯到早期文明时代。例如,沿着中国的长城,无数的烽火台构成了相对复杂的古老通信系统,它在许多方面类似于现代光通信系统。它利用烟雾的颜色或烽火数量来报告来犯敌人的多少,这是一种表示“多级”信号的粗略的做法。沿着长城,烽火台有规律地间隔分布,每一个烽火台上的士兵看到前一个烽火台的信号,再将同样模式的信号传送给下一个烽火台,这类似于今天的重复通信系统。在一个多小时的时间内,信息可以从长城的一端转发到另一端,传输距离超过 7300 千米。

在 20 世纪前半叶,电报、电话和无线网络出现后很长时间内,光通信系统发展滞后。但是,在 20 世纪后期,以电子为基础的系统在容量和传输距离方面趋于饱和。一个速率为 200 Mb/s 的典型同轴电缆传输系统,每传输一千米都需要进行信号再生,这样运行成本太高。研究光波通信系统成为很自然的选择,在光通信系统中,数据传输速率可以得到显著提高。等到为发射机提供相干光源的激光器被发明和实现之后,光通信得到了突飞猛进的发展^[23]。剩下的障碍是找到一种适于光波传输的介质。1966 年,高锟和霍克曼提出利用光纤作为光波传输介质的想法。尽管在当时光纤引起的损耗还是不可接受的^[24],但他们认为,当时光纤存在的衰减是由光纤中可去除的杂质引起的,而不是由诸如瑞利散射等一些基本的物理效应引起的。他们预言的 20 dB/km 损耗的电信级光纤,在 5 年后由康宁的研究者实现,现在,常规规格单模光纤的损耗是 0.2 dB/km。

与射频相比,光系统尽管损耗极低,但跨度不到 100 km 时仍需再生。在 1980 年年末至 1990 年年初,相干检测通信系统被引入用以提高传输距离^[25-27]。但是,在 20 世纪 90 年代光放大器发明后,这方面的研究逐渐减少。光放大器的发明预示着光通信新时代的到来,在该时代,大量波分复用(WDM)信号可以传输数千千米^[28]。

图 1.1 总结了光通信在过去的 30 年里取得的进展。由于线路速率(x 轴)和可打包进一条光纤中的波长通道数量的增加(y 轴),使得系统容量增加。20 世纪 90 年代初,单通道系统容量已经达到 10 Gb/s。放大系统是在 90 年代初期投入使用的,通过支持 WDM 系统,显著提高了系统容量。2003 年,进行了每通道 40 Gb/s 的 WDM 系统的商业化部署。最近的研究论证了 21.7 Tb/s 的传输,从而跨过了每条光纤只能承载 10 Tb/s 的屏障^[29, 30]。100 Tb/s 的光纤容量对光通信领域提出了新的挑战,这需要进行光放大器、调制格式或光纤设计的创新。

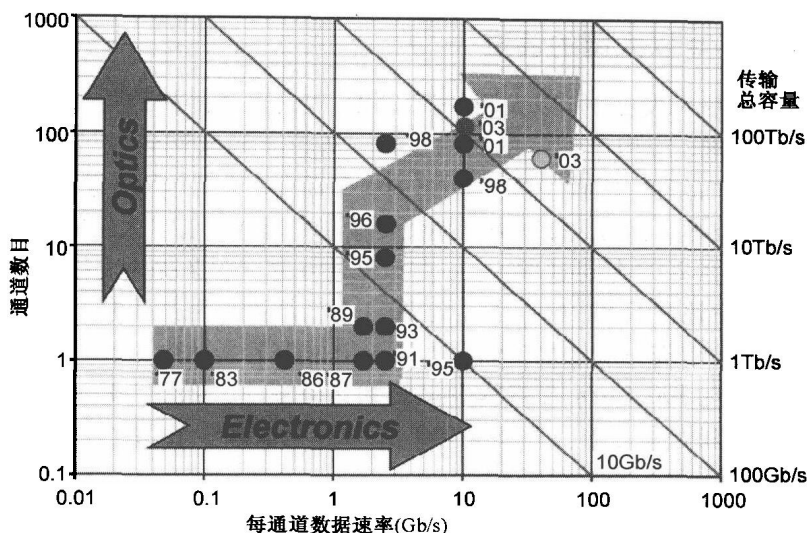


图 1.1 光纤传输系统中波分复用通道数量和每通道数据速率的进展情况(每个圆圈代表具有所给性能的传输系统的商业实用事件。在靠近相应事件处给出该事件的年代。承蒙H. Kogelnik提供)

1.2 光通信的发展趋势

互联网的出现从根本上改变了信息通信网络的基础结构。在 20 世纪末至 21 世纪初,带宽的显著增长推动了全世界电信业的发展,与此相对应,在光通信中以大量 WDM 光放大系统为代表的技术发展迅速。尽管随后所谓的“互联网泡沫”在资本投资市场破灭,但互联网流量仍获得了快速增长。并且出现了许多新型的应用,例如,视频网站和网络电视,这些再次推动了对带宽的需求。在可预见的未来,互联网流量的增长并没有放慢的迹象^[31]。图 1.2 给出了思科公司对 2011 年互联网流量的预测,从图中可以看出所需带宽每两年翻一番。这种显著的增长对信息基础设施产生了巨大的压力,这种压力从核心网到城域网、接入网,在不同层面上都有。在后面的章节,我们从 IP 流量和融合应用的快速增长中找出光通信网络发展的几个趋势。

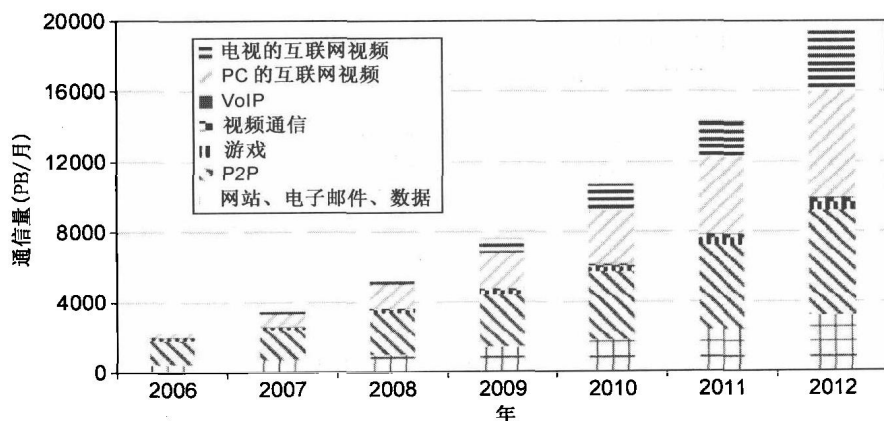


图 1.2 对 2011 年互联网通信量增长预测示意图(修改自思科公司^[31])

1.2.1 向 100 Gb/s 以太网的演进

在过去 30 年的演变和发展中,以太网(IEEE 802.3)已经从最初的共享媒介局域网技术发展成为可靠的技术标准,应用于网络的所有层次,从校园局域网到城域网、广域网(MANs/WANs)。由于有大量产品和应用程序符合 IEEE 802.3 标准,从成本和可靠性方面考虑,使得以太网成为必选的通信技术。有两股推动力量促使传输速率超过当前以太网的 10 Gb/s(10GbE)。首先是 IP 骨干网流量在 2007 年迅速增长,一些大型的互联网服务提供商报道说路由器到路由器的干线网络连接速率超过了 100 Gb/s^[2]。到 2011 年,新型应用的出现,如网络视频电视和视频通信,将使带宽需求进一步增加 3 倍,这需要 IP 链路容量达到 1 Tb/s^[31]。其次,线路传输速率从 10 Gb/s 升至 100 Gb/s 有望减少投资和运营成本。预计 100 Gb/s 下运营成本较 10 Gb/s 每 Gb/s 将下降四到五倍。升级至 100 Gb/s 还可以减少 IP 路由器间的大量的带宽线路,进而减少流量规划/施工和运营成本。

1.2.2 动态重构网络的出现

由于占用带宽较多的网络视频业务急剧增长,给传统的通信网络带来巨大压力。虽然可以通过将传输速率提高至 40 Gb/s 或 100 Gb/s,或者通过采用更多的 WDM 通道,但这些简单提升光传输容量的做法仅在简单的双节点点到点网络中起作用。因而,为了适应带宽需求不断变化的模式,光网络需要在许多单个节点上能够动态地上、下和组成波长通道。这将大大减少光领域中不必要的光-电和电-光转换成本。这种光领域的带宽管理可以通过所谓的可重构光分插复用器(ROADM)实现^[32-34]。图 1.3 给出了一种基于 ROADM 的连接众多分布网络城域核心网的典型结构。光可传输的距离和透明传输的 ROADM 节点数量分别超过 1000 km 和 20 个直通节点^[32]。自 2003 年引入以来,ROADM 已经变成了核心网的主流技术,并且是城域密集波分复用部署中的一大特色。

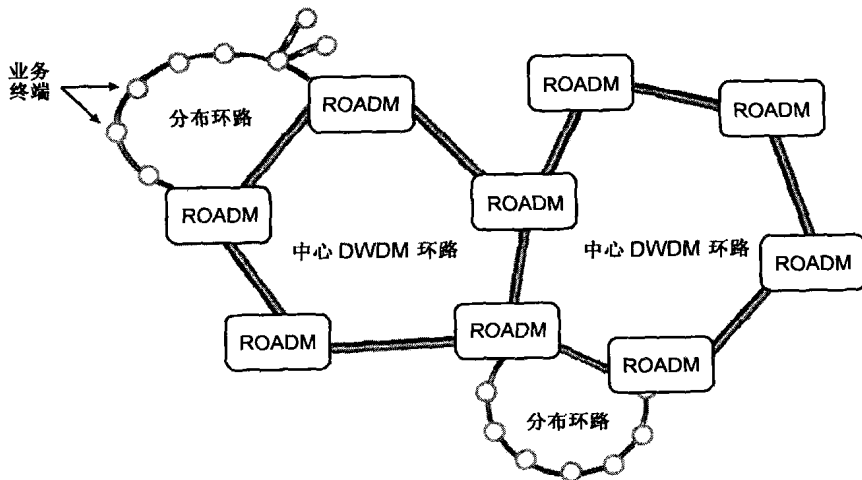


图 1.3 光网络与 ROADM 互连

在向传输速率超过 100 Gb/s 的可重构网络发展过程中,网络设计将面临两大挑战。首先,信号极易受到色度色散、偏振模色散(PMD)、ROADM 滤波效应以及光电子器件缺陷的影响。例如,当线路速率从 10 Gb/s 增加到 100 Gb/s 时,传统 NRZ 调制格式对残余色度色散容

差减少 100 倍。正因如此,就必须对每个通道进行光色散补偿。此外,为了实现 1000 km 范围内的长距离传输,当传输速率达到或超过 100 Gb/s 时,即使最好的光纤链路也需要进行 PMD 补偿。由于光 PMD 补偿器是有损耗的、体积大而且价格昂贵^[35, 36],所以,这样一味强调向 100 GbE 提升来实现节约成本初衷的做法令人质疑。其次,时下的光网络与射频网络相比是“呆板的”,它更难于安装、维护和管理,因而使光网络的运行成本更高。所以,为支持和满足更高容量以及不断发展的用户需求,建立具有自适应的光传输系统,实现灵活、可重新配置的光网络势在必行。

1.2.3 软件光传输

为了应对 20 世纪 80 年代出现的过多的模拟和数字标准,软件无线电(SDR)的概念被认为是一种切实可行的解决方案^[37, 38],也就是通过无线电收发机的软件设置来动态适应用户的环境变化,而无须依赖于专门硬件。SDR 并不是特别的调制技术,它只是促进了无线通信中模拟到数字的平稳过渡。毫不奇怪,现代光通信中也有类似的问题,因为,为了下一代 100 Gb/s 以太网传输,已经提出了多种先进的调制格式^[10, 39, 40]。这或许预示着朝 SDOT 发展的趋势,这样的话收发机可以对多种标准或多种调制格式进行自适应或重新配置^[41]。为了详细说明,类比于软件无线电的概念,我们对智能 SDOT 进行了展望,它应具有以下特点:

- (1) 动态设置物理链路,无须人为干预。例如,通过测量链路的损耗和色散,设置色散补偿模块;
- (2) 为链路分配最佳且留有余量的线路速率;
- (3) 可在多种模式下运行——即可以选择工作在多载波模式或者单载波模式;
- (4) 准确报告信道调节参数,包括 OSNR、色度色散、PMD 和电的 SNR,这有助于确定故障或在故障出现前预警。

我们可以预期,基于电子数字信号处理(DSP)技术的 SDOT 将实现从当前呆板的光网络到下一代具有鲁棒性且可以“即插即用”光网络的转变。SDOT 的引入侧重于自动操作和可重构性,并可降低运行和维护成本,所有这些,均以确保信息基础设施的持续性为关键,使成本效益随激增的带宽需求而增长。

SDOT 的原理图如图 1.4 所示。与传统光学系统的一个显著区别是 SDOT 结构中存在数模/模数转换器(DAC/ADC)和 DSP。整个通信系统被 DAC/ADC 划分成了模拟和数字两部分。为了优化和应用,在 DSP、DAC/ADC 及前端之间采用低速交互技术。另外,SDOT 通过动态调整传输信道和重新配置合适的调制格式,促进了从模拟到数字的转化,增强了光传输。

通过对电色散补偿(EDC)发展的讨论,可以更好地理解模拟到数字的转化。早期的 EDC 实现是基于硬件的,包括前向反馈均衡器(FFE)和判决反馈均衡器(DFE),但它们性能提高有限^[42]。但是,随后出现的基于 DSP 的 EDC 的性能有了显著的改善^[43]。SDOT 实质上给出了各种基于 DSP 的 EDC 的一般结构。例如,对于传统的光学前端强度调制/直接检测(IM/DD)系统,可以使用最大似然序列估计(MLSE)^[44, 45];对光学同相/正交(IQ)调制器和直接检测,可以使用预补偿^[46, 47];对相干检测前端,可以使用数字相位估计代替传统光学锁相环^[48];对光 IQ 调制器和相干检测前端,可以实现 CO-OFDM^[13, 49, 50]。在这些例子中,前端明显不同,但它们都利用 DSP 的优点显著提高了色散容差性能,并且都可以用图 1.4 所示 SDOT 的一般结构来描述。

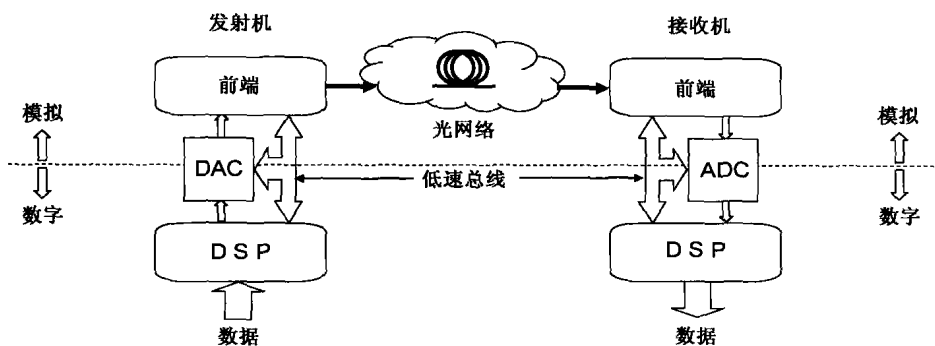


图 1.4 软件光传输(SDOT)示意图

1.3 摩尔定律及其对数字信号处理的影响

基于 DSP 的 SDOT 为未来光网络描绘出了迷人的前景。关键问题是如何使当前的技术与这一概念相匹配。举例来说,我们能够将 SDOT 的功能应用于速率为 100 Gb/s 的数据传输吗?为了回答这个问题,我们首先需要对半导体技术现状作一回顾。

1965 年,英特尔(Intel)的共同创始人戈登·摩尔发表了一篇简单但意义深远的报告^[51]:一片芯片上晶体管数量每 2 年增加一倍,这后来被称为“摩尔定律”。摩尔定律已经变成预言并成为半导体设备和系统性能显著增长背后的根本推动力。它从根本上影响着我们生活的方方面面,从移动电话到视频游戏、个人电脑和用于科学研究的超级计算机。在过去的 40 年里,全世界具有顶级创造力的研究者与来自该行业的大量资本投资,使得半导体技术一直遵循着摩尔定律。图 1.5 给出了在过去 40 年里,通用 CPU 芯片上晶体管数量的变化情况。晶体管的数量已经从 8008 的不足 10000 个增长到了 Titanium CPU 的超过 10 亿个——增长了 5 个数量级。尽管一直有人怀疑摩尔定律在不远将来的有效性,但是,普遍的观点认为这种指数的增长速度将会在下一个 10 年甚至更长时间内一直有效。事实上,国际半导体技术发展路线图预言(2008 年),摩尔定律在直到 2029 年的几代芯片内将继续有效^[52],这意味着 CMOS 技术可能有 4 到 5 个数量级的性能改善。

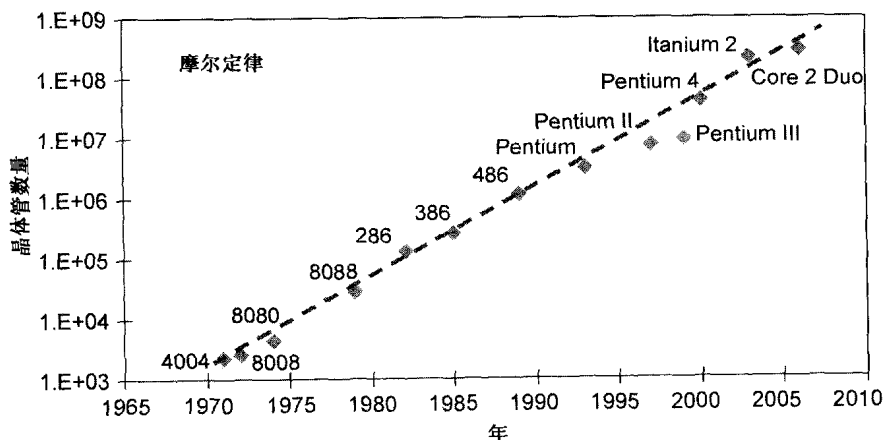


图 1.5 Intel 的 CPU 芯片集成晶体管数量的变化示意图

1.3.1 摩尔定律的扩展

摩尔定律指数增长速度的驱动力来源于两个基本 CMOS 加工过程的持续改善^[53]：

(1) 门电路的特性——例如，集成电路中门电路的尺寸和导线的间距以每年 13% 的速率减小。此外，门电路的尺寸已经从 20 世纪 60 年代的 50 毫米缩减到了 2008 年的 90 纳米^[53]。

(2) 集成电路芯片尺寸，或芯片边长，以每年 6% 的速率增长^[53]，或者大约每 10 年翻一番。

几乎其他所有对集成电路的测量都源于这两个基本参数，如集成电路处理速度、功耗和时钟速度。接下来，基于一些合理的工程假设，我们讨论一些重要参数的范围。在此过程中，我们将找出每个参数每年的变化速度，或参数范围，而省略相应参数的绝对数值。

(1) 可以集成到单片集成电路的元件数量，或摩尔定律：让我们用 x 等于 0.87 表示门电路的尺寸， y 等于 1.06 表示芯片的边长，如前所述，这是两个参数每年的变化速度。那么芯片上门电路数量就是 y^2/x^2 ，等于 1.49，也就是，门电路的数量以每年 49% 的速度增长。这是对摩尔定律的重新解释，这表明集成电路中集成的元件数量每 18 到 24 个月翻一番。

(2) 集成电路的时钟速度：我们假设元件中的载波传输速度是一个常量，因此，时钟速度，即器件的开关反应时间，与门电路尺寸 x 成反比。由此，我们得出时钟速度每年按 15% 的速度呈指数增长。

(3) 集成电路的数字信号处理能力：处理能力的提高得益于两方面共同的作用。首先，更多的元件按 y^2/x^2 的速度集成到芯片内。其次，时钟速度以 $1/x$ 的速度持续增加。因此，集成电路处理能力等于 y^2/x^3 ，以每年高达 71% 的速度增长。这是硅电子在更广范围内得以应用的根本驱动力，这些应用包括从苹果的 iPhone 到任天堂的 Wii，再到个人计算机和超级计算机运算。DSP 或 SDOT 在光通信中的应用，仅仅是 DSP 容量成指数式增长的一种体现。最重要的是，当第一款基于 DSP 的收发器在特定的应用中实现之后，预计基于 DSP 的收发机将以每年 71% 的惊人速度增长。

(4) 功率损耗：泄露电流对于硅集成电路来说是一个根本的问题，我们假设功耗是流动电荷通过电路节点造成的，它等于 $C_{\text{gate}} V^2$ ，其中 C_{gate} 和 V 分别是节点间的电容和电压。电容 C_{gate} 可近似看做平板电容器，它可以简单地用门长度 x 表示。假设场强近似为常数，电压 V 也近似与门长度 x 成正比。这样，每个门电路的功耗就等于 x^3 ，或者说可以说每年下降大约 34%。这一功率的估算很有意义，这表明，使用 x 更小的新一代硅平台是获得高能量效率器件的最好选择之一。

1.3.2 光通信中电子数字信号处理进展

传统的光系统，通过放大器色散补偿模块(DCF)中的色散管理机制来消除传输链路中的色散^[54, 55]。DCF 可以置于两级放大器中的光放大器处，或分布在如图 1.6 所示的色散分布区间内。这种色散管理体制在 10Gb/s 或更低速度的传输系统中工作良好，但在 40 Gb/s 或更高速度上难有作为。所标识的色散需要和 DCF 色散斜率精确匹配。任何与色散不匹配的残余都需要在每个通道的基础上用固定或可调光色散模块进行补偿^[56, 57]。自 20 世纪 90 年代以来，在接收端用电均衡器来替代光色散补偿模块的做法引起了研究者极大兴趣^[58-60]。与光学补偿相比，电均衡器具有成本低、尺寸小和易匹配等优点。电均衡器采用传统的均衡方法，包括前向反馈均衡器、判决反馈均衡器和 Viterbi 均衡器。这些早期的均衡器大多采用 SiGe 或 InP/AlGaAs 技术，通道长度限制为 2 到 3 位。不过，他们均被成功地运用于商业运营

中^[61]。电信号处理的重大突破发生在 2004 年,来自北电网络的研究者公布了他们预失真均衡器的成果,经 5000 km 标准单模光纤(SSMF)传输,而无须光色散补偿器^[46]。这种预失真均衡器基于功能强大的硅芯片,它包括拥有多抽头的数字有限冲激滤波器,高速 DAC 和光学 IQ 调制器。这项工作引起光研究领域的极大兴趣,同时也对图 1.6 所示的色散补偿分布的必要性提出了质疑,色散补偿分布在光通信领域中已根深蒂固地存在了几十年。这项工作开创了电 DSP 应用于光传输的新时代,随之而来的是相干光通信戏剧般的复苏^[11, 12, 62-66]。

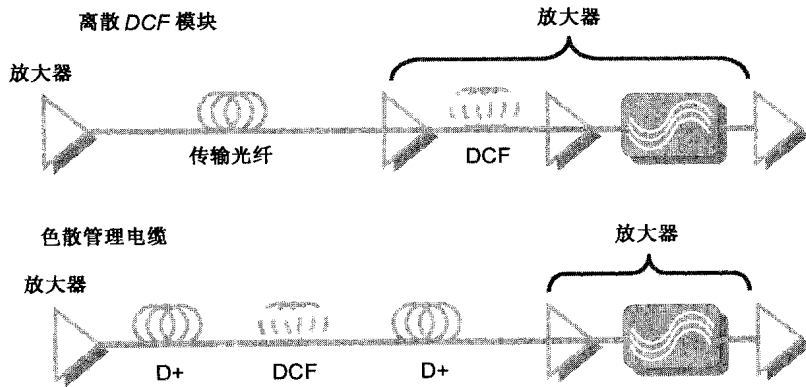


图 1.6 离散 DCF 模块和跨距内色散管理的应用

虽然基于电数字信号处理的单载波传输系统取得了快速发展,但多载波调制已经作为竞争对手出现了。2006 年,三个小组独立提出了两种长距离应用中的光 OFDM,旨在消除光传输系统中色散管理的需要,这两种光 OFDM 是直接检测光 OFDM (DDO-OFDM)^[14, 15]和 CO-OFDM^[13]。CO-OFDM 在光谱效率、接收机灵敏度和偏振色散适应性上性能优越^[67, 68],但其实现却比 DDO-OFDM 复杂得多^[14, 15]。在研究实验室中,CO-OFDM 的传输已经实现了 1000 km SSMF 上, 100 Gb/s 的传输^[16-18]。因为单载波相干系统和 CO-OFDM 都是 100 Gb/s 传输极具吸引力的选择,关于哪一个更优自然就成为一个令人感兴趣的问题。这将在下一节进行讨论。

1.4 单载波还是多载波传输:一场光学争论

虽然 OFDM 在过去的十年里已经获得了蓬勃发展,并且广泛应用于大量通信标准之中,但是,关于 OFDM 和单载波频域均衡技术(SCFDE)谁更优的讨论一直在继续^[19, 20]。OFDM 存在两个基本问题:(1)较大的 PAPR;(2)对频率和相位噪声敏感。但是这场争论并没有给出一个明确的答案,甚至在一些标准中就有两种不同的选择。例如,美国选择了 8 级单载波残留边带调制(8-VSB)作为数字电视标准,然而,欧洲、日本和大多数其他国家却选择了 OFDM 作为标准。在光领域中单载波和多载波传输的争论也即将以与射频领域中同样的方式出现,得出这样的结论可能为时尚早。鉴于这两个领域中通信信道、设备和系统截然不同,所以彻底理解即将出现的问题,弄清争论发生的环境是当务之急。

单载波与多载波传输的争论,在光领域中有不同的含义。图 1.7 给出了单载波系统和 CO-OFDM 系统的发射机结构。二者有两个明显的区别:

(1) 单载波系统采用了一个相对较“传统”、简单的结构,其中离散数字电平调制被馈送至 QPSK 调制器的两臂支路。至于 I 和 Q 分量的生成,QPSK 调制与传统的 BPSK 和 DPSK 调