

现代通信信号处理丛书

光通信信号处理

|| 任海兰 刘德明 编著 ||



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

现代通信信号处理丛书

光通信信号处理

任海兰 刘德明 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书介绍光通信工程和全光通信网中的光信号处理技术的基本原理及应用,全书共分10章,内容包括光调制、光复用、光再生、光路控制、光逻辑控制、光检测、光波长技术、光传送网功能等。其中原理部分的阐述力求简明清晰并注重理论的实用性和指导意义;应用部分的介绍则建立在系统收集目前国内外相关研究的最新资料的基础上,涵盖了近几年光信号处理技术的进展和未来的发展动态。

本书层次清晰,内容新颖,系统性和实用性强,可作为光纤通信、光电子、应用物理等专业的科技和工程人员的参考用书,同时也可作为相关专业研究生教材和本科高年级学生的选修教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

光通信信号处理 / 任海兰, 刘德明编著. —北京: 电子工业出版社, 2006.8

(现代通信信号处理丛书)

ISBN 7-121-02568-X

I. 光… II. ①任… ②刘… III. 光通信—信号处理 IV. TN911.74

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第046043号

责任编辑: 王春宁

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 14.5 字数: 363千字

印 次: 2006年8月第1次印刷

印 数: 4000册 定价: 27.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

出版说明

随着通信技术的发展，特别是第三代移动通信技术的发展，宽带无线通信网、高速通信网、新一代信息网技术、光通信技术、个人通信技术和智能信息处理技术等已经进入了一个新的高速发展时期，对各种信号处理技术有了更高的要求。为了适应各种现代通信信息传输网络的技术要求，除了继续采用传统的数字信号处理技术外，还应在此基础上提出新的信号处理技术、算法和模型，以满足应用的需求。

随着通信智能化、大数据量、高速实时的多媒体应用需求的不断增多，处理信号的类型已经不仅仅局限于对常规数据的处理，还要处理大量的语音信号和视频信号等。这类信号的特点是数字化、宽频带、大数据量。信号处理技术在通信工程、电子信息工程、电子信息科学与技术、光信息科学与技术、测控技术与仪器、移动通信、无线通信、卫星通信、光通信、网络通信、智能信息系统以及多媒体通信等领域获得广泛的应用，已经成为应用工程的关键技术之一。而目前，国内市场有关通信应用领域信号处理技术系列化的图书种类还非常匮乏，而市场对这方面的需求量又较大。因此，从这个角度出发，我们依托中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会，在专业委员会专家、教授的大力支持下，组织出版一套面向 21 世纪的《现代通信信号处理丛书》。

这套丛书从我国现代通信信号处理技术应用现状与发展情况出发，以应用为中心，全面、系统地介绍了信号处理领域所涉及的有关关键技术与热点技术，如通信中的智能信号处理、通信中的阵列信号处理、通信中的自适应信号处理、通信中的光信号处理、超宽带技术、通信中的信号检测与估值、量子通信中的量子信号处理、网络信号处理和信号处理算法的实时 DSP 实现等内容。虽然所涉及的领域还不够全面，但我们会一直努力。在确保丛书质量的前提下，不断丰富，不断完善，力求内容的先进性、实用性和系统性，突出理论与应用实践的紧密结合，引导读者将信号处理的原理、技术与应用有机地结合，力争为读者奉献一套可读性与可操作性强的系列丛书。

这套丛书将从 2006 年初陆续推出，主要读者对象是广大从事通信信号处理技术工作的科技研发人员和工程技术人员，也适合高等院校相关学科各专业在校师生及刚刚走上工作岗位的毕业生阅读参考。

在编辑出版这套丛书的过程中，得到了中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会的大力支持，参与编著和审定的各位专家都为此付出了大量的心血，可以说，没有他们的支持和帮助，就没有这套丛书的出版，对此，我们表示衷心的感谢。希望广大读者对这套丛书提出宝贵意见和建议，以便今后我们加以改进，为广大读者奉献更多、更好的优秀通信类图书。
联系信箱：wchn@phei.com.cn。

电子工业出版社
通信与网络图书事业部

前 言

到目前为止，光通信已经历了三十多年的发展历程，其发展的速度可谓日新月异，给通信领域带来了巨大的变化，也使人类社会真正步入信息时代。光通信已由初期的以实现信息的大容量传输为主向进一步承担信息的交换与选路发展，光通信的发展不仅对光信号处理技术提出了更高的要求，也使得光信号处理所涵盖的内容进一步扩大。光信号处理技术已成为光纤通信的支撑，并将在未来的全光通信网中发挥越来越重要的作用。

本书在系统搜集目前国内外有关光通信信号处理的最新资料的基础上，对目前的光纤通信系统和未来的光网络中所涉及到的光信号处理技术的原理、特点和应用进行了介绍。

全书共分 10 章。第 1 章是概述部分，在对光通信的发展历程作简单回顾的基础上，指出了光信号处理在光纤通信系统、尤其是在未来的全光网中所占据的举足轻重的地位，随后探讨了光子学与光信号处理的现状和发展趋势；第 2 章介绍光调制技术，介绍了光通信中的光调制技术的分类和工作原理，由于在光传感技术中光调制是实现光传感探测的基础，本章还对光传感中的光调制技术进行了介绍。为了实现光通信网的大容量传输，光复用是一个有效的解决途径，本书第 3 章介绍了多种光复用技术，包括波分复用、时分复用、码分复用、极化复用、微波副载波复用等。第 4 章为光再生技术，从实现上来说光再生可以分为光 / 电 / 光再生和全光再生，而只有全光再生才能实现真正意义上的“透明”光网，适应光通信未来发展的需要，因此本章重点介绍全光再生，包括光放大、光整形和光时钟恢复技术。第 5 章是光路控制技术，包括以下几个方面：光路行进方向的控制（如光隔离器与光环形器）、光路的选择与分配（如光开关与光功率分配器）、特定光路的选择（如光滤波与光上、下复用）、光波特性的改变（如光波长变换与色散补偿等），对这些技术的原理和特点进行了介绍。本书第 6 章对光逻辑控制技术的最新进展做了介绍，超高速全光逻辑器件则是未来全光分组交换网络中至关重要的基础元件，包括光计算、光缓存、光标签和光互连，其中光计算主要指光逻辑门运算，光缓存用于实现对分组的暂时存储以解决分组竞争问题，光标签用于为信号波长或分组做上“标记”以实现交换和路由功能，而光互连则是实现大规模信息的并行处理的基础。第 7 章是光检测技术，在对光检测的类型与原理做简单介绍的基础上，介绍了光通信用光探测器的类型、工作原理和特点，除了介绍已获得普遍应用的光直接探测技术以外，本章还对光外差探测技术的原理和特点做了介绍。

光交换技术作为全光网的支撑技术，在全光通信系统中发挥着重要作用，可以说，光交换技术的发展在某种程度上决定了全光通信网的发展。由于 DWDM 的普遍应用，在多波长光传输技术上发展基于波长的交换与路由技术已成为历史的必然，本书第 8 章对光波长交换与路由技术进行了介绍，分析了波长交换节点设备 OADM 和 OXC 的功能与实现方案，并对节点的光信道串扰问题、光功率均衡与光功率管理进行了探讨。随着因特网的迅猛发展和 IP 业务量的爆炸性增长，以波长路由为基础的网络难以适应各种承载的要求，这就要求光传送网从以波长为粒度的交换向以分组为粒度的光分组交换网过渡，鉴于光分组交换良好的发展前景，本书将光分组交换与路由技术单列一章，作为本书的第 9 章，介绍了光分组交换的发展和演变、光分组交换的节点结构及关键技术，以及目前实现光分组交换的两种可行策略——光突发交换技术和光标签交换技术。本书第 10 章从逻辑的角度探讨光传送网的功能

与光信号处理流程，其中功能的描述以 ITU-T 的原子功能描述法为基础，对光传送网的各层网络功能和信号处理的流程进行了描述，并对与层网络逻辑功能相对应的具体技术实施进行了探讨。

本书的写作力求体系完整、层次清晰，基本概念和基本原理的讲述力求简练清晰、深入浅出，避免繁琐的公式，并且原理与应用和前沿技术相结合，使读者能了解光通信信号处理技术发展的动态。

在本书的编写过程中，作者得到了武汉邮电科学研究院马声全老师的指导和帮助，还得到了武汉邮电科学研究院烽火科技学院、华中理工大学光子工程学院领导的支持，在本书完成之际，谨向所有给予作者关心、爱护和支持的朋友们表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免有诸多遗憾和谬误之处，恳请读者提出宝贵意见。

编著者
2006 年 3 月于武汉

目 录

第 1 章 光通信与光信号处理概述	(1)
1.1 光通信的发展	(1)
1.2 光通信中的光信号处理	(2)
1.2.1 全光网与光信号处理	(2)
1.2.2 光信号处理的现状与发展	(5)
第 2 章 光调制技术	(9)
2.1 光调制技术的分类	(9)
2.1.1 连续式调制和脉冲式调制	(9)
2.1.2 直接调制和间接调制	(12)
2.2 电光调制	(14)
2.2.1 电光调制的原理	(14)
2.2.2 电光振幅(或强度)调制	(17)
2.2.3 电光相位调制	(18)
2.2.4 M-Z (Mach-Zahnder) 波导调制器	(19)
2.3 声光调制	(19)
2.3.1 声光效应	(19)
2.3.2 喇曼-奈斯衍射和布拉格衍射	(20)
2.3.3 声光调制器	(21)
2.4 磁光调制	(21)
2.5 电吸收调制	(22)
2.6 光传感中的光调制技术	(23)
2.6.1 光强度调制传感	(24)
2.6.2 光相位调制技术	(26)
2.6.3 光波长调制技术	(28)
第 3 章 光复用技术	(30)
3.1 光波分复用	(31)
3.1.1 光波分复用的概念及特点	(31)
3.1.2 光合波与光分波技术	(32)
3.1.3 波分复用技术的应用与发展	(37)
3.2 光时分复用	(39)
3.2.1 光时分复用的概念	(39)
3.2.2 光时分复用的关键技术	(40)
3.2.3 时分复用技术的应用与发展	(43)

3.3	光码分复用	(47)
3.3.1	光码分复用的概念	(47)
3.3.2	光码分复用系统的分类	(47)
3.3.3	光码分复用的工作原理	(48)
3.3.4	码分复用的编 / 解码技术	(49)
3.3.5	码分复用技术的应用与发展	(51)
3.4	光极化复用	(52)
3.4.1	光极化复用的概念	(52)
3.4.2	光极化复用关键技术	(53)
3.5	微波副载波复用	(54)
3.5.1	微波副载波复用的概念	(54)
3.5.2	微波副载波复用的应用	(55)
第 4 章	光再生技术	(56)
4.1	信号再生的概念与光再生技术概况	(56)
4.1.1	信号再生的概念	(56)
4.1.2	光再生技术概况	(57)
4.2	光放大技术	(57)
4.2.1	掺稀土元素光纤放大器	(58)
4.2.2	拉曼光纤放大器 (RFA)	(62)
4.2.3	半导体光放大器	(66)
4.3	光整形技术	(67)
4.3.1	基于非线性光环形镜 (NOLM) 的光判决门	(68)
4.3.2	基于半导体光放大器的光判决门	(68)
4.3.3	基于非线性饱和吸收效应的光判决门	(69)
4.4	光时钟恢复技术	(70)
4.4.1	基于锁模激光器的时钟恢复	(70)
4.4.2	基于光锁相环的时钟恢复	(72)
第 5 章	光路控制技术	(73)
5.1	光隔离器与环形器	(73)
5.1.1	光隔离器	(73)
5.1.2	光环行器	(74)
5.1.3	微光学器件与光路的耦合技术	(75)
5.2	光开关	(76)
5.2.1	波导型光开关	(77)
5.2.2	微电子机械光开关	(78)
5.2.3	液晶光开关	(79)
5.2.4	气泡开关	(80)
5.2.5	光栅开关	(80)
5.3	光滤波与光上下复用	(81)

5.3.1	固定式光滤波	(81)
5.3.2	可调谐光滤波器	(83)
5.3.3	OADM	(87)
5.4	光波长变换	(88)
5.4.1	基于半导体光放大器的波长变换	(89)
5.4.2	基于非线性光学环形镜的波长变换	(91)
5.4.3	基于四波混频的波长变换	(91)
5.4.4	基于交叉吸收调制效应(XAM)的波长变换	(92)
5.4.5	基于注入锁定半导体激光器的波长变换	(93)
5.4.6	基于光纤光栅外腔激光器的波长变换	(94)
5.5	色散补偿技术	(94)
5.5.1	色度色散补偿技术	(95)
5.5.2	偏振模色散补偿技术	(100)
5.6	光功率分配器	(102)
5.6.1	光功率分配器的分类	(102)
5.6.2	可调光功率分配器的实现技术	(103)
第6章	光逻辑控制技术	(107)
6.1	光计算	(107)
6.1.1	利用光孤子陷阱开关实现光逻辑与门	(108)
6.1.2	利用SOA交叉增益调制效应实现光逻辑与门	(108)
6.1.3	利用超快非线性干涉仪作为光逻辑门	(109)
6.1.4	基于马赫-曾德尔干涉仪的全光逻辑异或门	(110)
6.1.5	利用TOAD实现全光逻辑门	(110)
6.2	光缓存	(111)
6.2.1	基于光纤延时线的光缓存	(112)
6.2.2	半导体量子点结构的光缓存	(115)
6.2.3	基于光波长转换的方案	(116)
6.2.4	基于空间偏转路由的光缓存	(116)
6.3	光标记	(118)
6.3.1	副载波复用光标记	(118)
6.3.2	时分复用光标记	(122)
6.3.3	专用波长光标记	(122)
6.3.4	高强度光标记	(123)
6.3.5	电光调制光标记	(124)
6.3.6	用光波长标记进行波长通路状态监控	(125)
6.4	光互连	(126)
6.4.1	光互连的必要性和现状	(126)
6.4.2	光互连的实现方法	(127)
6.4.3	光互连计算机体系结构	(131)

第 7 章 光检测技术	(133)
7.1 光检测的类型与原理	(133)
7.1.1 光电子发射探测器	(133)
7.1.2 光电导探测器	(134)
7.1.3 光伏探测器	(134)
7.2 光通信用光探测器的类型	(136)
7.2.1 PIN 型光电二极管	(136)
7.2.2 APD 型光电二极管	(136)
7.2.3 MSM 光电探测器	(137)
7.2.4 光探测器的工作参数	(137)
7.3 光接收机	(139)
7.3.1 光接收机的组成	(139)
7.3.2 光接收机的参数	(140)
7.4 光外差探测	(142)
7.4.1 相干光通信的基本原理	(142)
7.4.2 相干光通信的关键技术	(143)
7.4.3 相干光通信在超长波长光纤通信系统中的应用	(145)
第 8 章 光波长交换与路由技术	(146)
8.1 光交换与路由概述	(146)
8.1.1 光交换与路由的必要性	(146)
8.1.2 光交换与路由的分类	(147)
8.1.3 光交换与路由技术的现状与发展	(148)
8.2 从多波长光传输到多波长光交换	(151)
8.2.1 光传送网概念的提出	(151)
8.2.2 光传送网的现状	(152)
8.3 OADM 节点的功能与实现方案	(153)
8.3.1 OADM 的功能和结构	(153)
8.3.2 OADM 的组成	(154)
8.3.3 OADM 的实现方案	(155)
8.4 OXC 的功能与实现方案	(158)
8.4.1 OXC 的功能和结构	(158)
8.4.2 OXC 的组成	(159)
8.4.3 OXC 的性能评价	(159)
8.4.4 OXC 的实现方案	(161)
8.5 光波长交换节点的关键技术	(164)
8.5.1 光信道串扰问题	(164)
8.5.2 光功率均衡与光功率管理	(168)
第 9 章 光分组交换与路由技术	(173)
9.1 光分组交换的发展和演变	(173)

9.1.1	IP over DWDM 光网络的演变	(173)
9.1.2	光分组交换的现状	(175)
9.1.3	光分组交换的发展趋势	(177)
9.2	光分组交换的节点结构及关键技术	(178)
9.2.1	光分组交换的节点结构	(178)
9.2.2	光分组交换的关键技术	(178)
9.2.3	光分组交换网	(181)
9.3	光突发交换技术	(182)
9.3.1	光突发交换的概念及特点	(182)
9.3.2	光突发交换相关技术	(183)
9.3.3	光突发交换的现状和应用前景	(185)
9.4	光标签交换技术	(186)
9.4.1	光标签交换的提出	(186)
9.4.2	多协议波长交换 (MPLmS) 技术	(188)
9.4.3	通用多协议标签交换技术	(190)
第 10 章	光传送网功能与光信号处理	(191)
10.1	光传送网的分层与分割	(191)
10.1.1	光传送网的分层结构	(191)
10.1.2	光传送网的分割	(192)
10.2	层网络功能与光信号处理流程的规范语言	(193)
10.2.1	基本功能块描述方法	(193)
10.2.2	原子功能描述方法的基本思想	(193)
10.2.3	层网络的原子功能	(194)
10.2.4	传送网络基本结构元件	(195)
10.3	光传送网层网络的光信号处理流程	(198)
10.3.1	OTN 层网络的原子功能	(198)
10.3.2	OTN 层网络的光信号处理流程	(200)
10.3.3	光传送网中的光信号处理过程	(200)
10.4	光信号处理逻辑功能的技术实现	(202)
10.4.1	OCh 层	(202)
10.4.2	Oms 层	(206)
10.4.3	OTS 层	(207)
缩略语	(209)
参考文献	(215)

第 1 章 光通信与光信号处理概述

到目前为止，光通信已经经历了三十多年的发展历程，其发展的速度日新月异，给通信领域带来了巨大的变化，也使人类社会真正步入信息时代。光通信已由初期的实现信息的大容量传输为主向进一步承担信息的交换与选路发展。光子信息处理技术已涉及到光信号处理和光信息存储以及光计算和光传感等多个方面。目前，光子信息科学技术已初露锋芒，而光信号处理技术是光通信技术的支撑，并将在未来的光通信中发挥越来越重要的作用。

1.1 光通信的发展

用光子代替电子作为信息载体，用光纤通信代替电缆和微波通信，使得信息的传输发生了本质性变革，这不仅是通信史上，也是人类史上的划时代进步。

现代通信的起源可追溯至 19 世纪末，电报、电话和无线电三大发明标志着现代通信的诞生。在相当长的一段时间内，通信都是以电作为信息载体，且传输的信息以语音信息为主。直至 20 世纪 70 年代初期，美国 Corning 公司拉制出了世界上第一根损耗低于 20 dB/km 的光纤，使人们看到了用光纤作为信息传输媒质的希望。同年，在室温下连续工作的长寿命的 GaAlAs 异质结半导体激光器研制成功，为光纤通信提供了理想的光源。这两项技术的突破标志着一个光纤通信新时代的来临，因此，1970 年又被称为光通信的“元年”。自此以后，光纤通信登上历史舞台并迅速发展走向成熟，给人们的生活带来了极大的变化。

光纤通信的发展首先表现在光纤传输特性的改进，由于光纤制作工艺尤其是材料提纯技术的不断发展，到 1973 年，光纤在 0.85 μm 波段的传输损耗已下降到 2 dB/km 左右；与此同时，光纤的结构也不断改进，从带宽较窄的阶跃型折射率光纤转向带宽较大的渐变型折射率光纤，使光纤的带宽不断增加。与此同时，光源的寿命不断增加，光源和光电检测的性能不断改善，这些都为光纤传输系统的诞生创造了有利条件。

1976 年，第一条速率为 44.7 Mb/s 的光纤通信系统在美国亚特兰大的地下管道中诞生，该系统经过现场实验和全面性能测试后，很快商用化。

20 世纪 80 年代是光纤通信大发展的年代。在这个时期，所用光纤由多模光纤转向单模光纤，通信传输窗口由 0.85 μm 波段转向 1.3 μm 波段。同时，由于石英光纤在 1.31 μm 波段有一个色度色散的零点，有利于实现长距离传输，促成了 1.3 μm 波段单模光纤通信系统的迅速发展，也使得光纤通信显示出优越的性能和强大的竞争力，在世界各地迅速发展并很快替代电缆通信，成为电信网中重要的传输手段。

20 世纪 80 年代末期，掺铒光纤放大器 (EDFA) 问世，它实现了光信号的直接放大，增益达到 30 dB 以上，其优越的性能是传统的基于光 / 电 / 光转换的放大器所无法比拟的，因此很快进入批量实用化阶段。由于掺铒光纤放大器工作在 1.55 μm 波段，而在这一波段光纤的损耗也最低，这两方面的因素使人们的兴趣由 1.3 μm 波段转向 1.55 μm 波段，此外，长波长半导体激光器的成熟也为 1.55 μm 波段的应用提供了有力的支持。因此，在这一阶段，1.55 μm 波

段光纤通信开始走向应用。

20世纪90年代,随着人类社会信息化时代的来临,对通信的需求呈现加速增长的趋势。为了满足人们对带宽和容量的需求,对系统的传输容量提出了更高的要求,90年代初期主要通过提高单信道系统的速率实现扩容,1993年2.5 Gb/s系统已经实用化,1995年又推出10 Gb/s的系统。但是,受电子速率瓶颈的限制,单信道速率很难达到40 Gb/s以上。在这种背景之下,密集波分复用(DWDM)技术应运而生,它改变了以往一根光纤中只传输一个波长信道而造成光纤带宽资源浪费的情况,在同一路光纤中传输若干个不同波长的光信号,并且与宽带掺铒光纤放大器相配合,显示出一系列无可比拟的优势;这一技术在1996年推向实用化并很快获得普遍的应用,开辟了光通信发展的又一个新时期。目前,密集波分复用系统的传输容量已达1 000 Gb/s以上,全光传输距离达到1 000 km以上。

回顾光纤通信三十年来的发展历程,可以看出,光纤通信自诞生以来,一直以惊人的速度发展着,新技术、新型器件层出不穷,为信息基础设施提供了宽阔的传输通路。光纤通信之所以能得到如此迅速的发展,与光纤通信的优越性是分不开的。光纤通信的主要优点有:传输损耗低,传输容量大;光纤光缆尺寸小,重量轻,有利于敷设和运输;抗电磁干扰性能好,适合应用于有强电干扰和电磁辐射的环境中;光纤之间的串扰小;制造光纤的主要原料是SiO₂,它是地球上蕴藏量最丰富的物质,价格低廉。

当前,光纤通信已成为信息领域的重要支撑,应用领域由长途网进入局域网并进一步向接入网延伸,并且毋庸置疑地将在未来的通信领域中扮演越来越重要的角色。

1.2 光通信中的光信号处理

1.2.1 全光网与光信号处理

1. 未来的全光网

从光纤通信未来的发展来看,在建设信息高速公路的浪潮推动下,高速公用通信网和数字数据网会很快发展,发展迅速的各种新型业务对通信网的带宽和容量提出了越来越高的要求。以欧美为例,尽管传统的电话业务增长缓慢,用户线年增长率仅百分之三,但是高速数据交换网和国际互联网主机的数量以及各类交互式服务(如多媒体通信和家庭购物等),在过去的几年里几乎每年增加一倍。移动电话市场也在迅速扩大。面对上述挑战,通信网的两大主要组成部分——传输和交换,都在不断的发展与革新。

随着掺铒光纤放大器的广泛应用和波分复用技术的成熟,一根光纤中已经能够传输太(10^{12})位每秒的数字信息。传输系统容量的快速增长带来的是对交换系统发展的压力和动力。通信网中交换的规模越来越大,运行速率越来越高,未来的大型交换系统将需要处理总量达几百太位每秒的信息。但是,目前的电子交换和信息处理网络的发展已接近了极限。为了解决“电子瓶颈”限制问题,研究人员开始在交换系统中引入光子技术,从而引出光传送网(OTN)的概念。光传送网是在光层传输的基础上,在光层实现业务的配置和选路,即光上、下复用和光交叉连接,从而减轻电交换节点的压力,它可大大提高网络的传输容量和节点的吞吐容量,已成为未来网络升级的首选方案。

除了光交换与选路,如果能进一步采用其他的光信息处理技术,如全光再生和全光波长转换等,则网络的信息吞吐量可以进一步增加。在这种背景之下,人们又提出了全光网(All-Optical Network, AON)的概念。所谓全光网,是指信息在网络中传输时,从源节点到目的节点的过程中始终以光的形式存在,不需要经过光/电/光转换,包括光传输、光放大、光再生、光交换、光存储、光信号多路复接/分插、进网/出网等全光处理技术,使得光信息处理过程完全摆脱对电处理的依赖,可以极大地提升网络的性能。

从业务的角度来看,由于近年来IP业务所占比重越来越大,“Everything over IP”已提上议事日程,如何使底层DWDM传输技术与上层IP业务相结合,成为必须考虑的问题,因此IP over DWDM技术受到普遍关注。因为目前所有的分组处理都是在电的层面上进行的,必须依靠电子电路,因此受到电光转换的限制。要实现IP over DWDM,最基本的问题是在DWDM上如何保证QoS和降低丢包率,而真正意义的IP over DWDM全光网仍处于萌芽状态,基于分组交换的全光网将是全光网的下一个战略目标。

全光通信为通信网的发展勾画了一个美好的蓝图,但是这一蓝图的实现需要经历一个漫长的发展历程才有可能实现,在通信网中信号处理是很重要的一项技术。在电通信网中,电信号处理技术已相当成熟,而在光通信网中,人们对光信号处理技术的掌握与应用远不如电信号处理那样得心应手,因此迫切需要发展与光传输相应的光信号处理技术,只有在光信号处理逐步成熟的基础上,全光通信网才有可能逐步成为现实。

2. 光子学与光信号处理

电子学及其电子信息科学技术已经相当成熟。电子作为信息的载体已经成为20世纪信息领域的主要特征和标志,以电子学和微电子学为基础的信息工程技术为人类社会做出了巨大贡献,如通信是从无线电到微波;存储是从磁芯到半导体集成;运算发展是从电子管到大规模集成电路的电子计算机,等等。因此,20世纪又被称为电子信息时代。然而,随着信息容量的剧增,电子学和微电子学越来越显示出其局限性,也为信息技术的发展提供了发展的机遇和挑战。

早期的光学主要研究物质的宏观光学特性,如光的折射、反射、衍射、成像和照明等,其理论基础主要基于传统的电磁场理论,即波动光学,而较少关注其微观本质。随着20世纪60年代初激光的出现,人们开始注重光的粒子性,以量子理论为基础把光看做具有波粒二象性的物质,研究光学现象时越来越多地用到光子的概念,如研究光子的本质和作用、光子与物质相互作用,以及光子的产生、传播和探测等微观机制。光学向光子学方向的开拓,非常类似于20世纪上半期电学向电子学的开拓,具有深远的科学及技术意义。

由于光子的传播速度比电子要快得多,光的频率比无线电的频率高得多,为提高传播速度和载波密度,由电子到光子是发展的必然趋势,它会使信息技术的发展产生突破。目前,信息的探测、传输、存储、显示、运算和处理已由光子和电子共同参与来完成,所产生的一门新兴的交叉学科“光电子学”已被广泛应用在信息领域。继光电子学后,光子学技术正在崛起。

光子学是近代光学的新开拓,是继电子学和光电子学之后的新兴科学,是研究作为信息和能量载体的光子行为及其应用的科学,广义地讲,光子学是关于光子及其应用的科学。在理论上,它主要研究光子的量子特性及其在与物质(包括与分子、原子、电子以及与光子自身)的相互作用中出现的各类效应及其规律;在应用方面,它的研究内容主要包括光子的产

生、传输、控制以及探测规律等。实际上，光子学是一个具有极强应用背景的学科，并由此而形成了一系列的光子技术，如光子发生技术（激光技术）、光子传输技术、光子调制与开关技术、光子存储技术、光子探测技术和光子显示技术等。信息科学是光子学的重大应用领域之一。从光子学的最早定义“以光子作为信息载体的一门系统性科学”，可以看出光子学与信息科学技术具有密不可分的关系。通信和计算机研究与发展的未来属于光子学领域。

如果说电子学到光电子学和光子学是跨世纪的发展，那么在未来的发展中，光子学将继电子学之后成为信息科学的又一个重要支柱。是光子学与信息科学的交叉所形成的新兴学科——信息光学，其主要内容就是研究如何在光域实现信号处理，包括导波（光纤）光子学、光通信技术、光存储技术和光显示技术等。信息光学的出现不但为光子学本身的发展注入生机，更重要的是为信息科学乃至信息社会提供了最佳载体，成为今天乃至未来信息时代的、不可替代的重要支柱，其优越性已被广泛确认，因此可以说，光子学是应运于信息时代而生。光子作为信息的载体的优势与竞争力正在不断地被挖掘和开拓。可以预见，21世纪将是光子信息的时代，它将以在光域实现 Tb/s 超大信息流的传递、存储、处理和运算为标志。随着技术的发展，光子学将在信息领域获得越来越普遍的应用。

光子学之所以在信息领域占据着越来越重要的地位，全光网之所以成为通信网发展的理想目标，是由光的一系列无可比拟的优势所决定的。

- 光子具有极高的信息容量和效率

作为信息载体，光比电的信息容量要大出几个量级。例如，一般可见光的频率为 5×10^{14} Hz，而处于微波波段的电波频率仅为 10^{10} Hz 量级；光子在光纤中能够直接传播上百千米以上。因此，光波可承载信息的容量起码比微波高出 3~4 个量级，即千倍以上。一个载子可承载的信息量为信息效率。如果考虑到光子的数字编码与光子的统计特性等，光子的信息效率远远高出电子。例如，在光子学中，如使用所谓光的压缩态和光子数态等作为光子源，量子噪声则有可能减小到极小值，光子的信息效率将成量级地提高。这时，一个光子甚至具有承载成千上万个比特信息的能力。

- 光子具有极快的响应能力

在信息领域，信息载体的响应能力至关重要，因为它是决定信息速率与容量的主要因素。在电子技术中，电子脉冲的脉宽最窄限度在纳秒（ns， 10^{-9} s）量级，因此在电子通信中信息速率被限定在 Gb/s（ 10^9 b/s）量级。对于光子技术来说，由于光子是玻色子，没有电荷，而且能在自由空间传播，因此，光子脉冲可轻易做到脉宽为皮秒（ps， 10^{-12} s）量级。实际上，现在实验室的光子脉冲宽度水平已达到小于 10 个飞秒（fs， 10^{-15} s）量级。而且，近两年有望实现 2~3 个 fs，即相当一个光学周期的宽度。因此，使用光子为信息载体，信息速率能够达到每秒几十、几百个 Gb，甚至几个、几十个 Tb（ 10^{12} b/s）都是可能的。如果使用具有巨大带宽的光纤作为信息的传输媒质，就能够以如此高的速率通过光纤将信息传输到几千千米甚至更远的距离。这样，获得的信息比特率×传输距离之积将是非常可观的。显然，这对于电子技术来说，绝对是望尘莫及的。

- 光子具有极强的互连能力与并行能力

前已提及，电子有电荷，因此电子与电子之间存在库仑作用力，这就使得它们彼此间无法交连。例如，在电子技术中，两根导线如果交连，就会形成短路。所以，在电路中为了实现互连，就只能像搭“立交桥”那样，将其运行路线彼此隔离，显然这就使互连受限，成为限制电子信息速率与容量的一个主要因素。另外，在电子技术中，电子信号只能是串行提取、

传输和处理的,对于二维以上的信号,如图像信号等,则只好依靠扫描一类的手段将其转换为一维串行信号来处理。这是另一个限制电子信息速率和容量的主要因素。对于光子来说,在这些方面恰恰显示出特有的优势。光子无电荷,彼此间不存在排斥和吸引力,具有良好的空间相容性等,对于开发新一代具有超大规模并行处理能力的计算机具有重要意义。

- 光子具有极大的存储能力

不同于电子存储,光子除能进行一维、二维存储外,还能完成三维存储。再考虑频率与偏振等“维”,可用于存储的参量很多,因此,可以说,光子具有极大的存储能力。一个存储器的容量极限是由单位信息量(bit)所需最小存储介质的体积决定的,对于光来说,这个量为其波长(λ)量级,因此,三维存储容量为 $(1/\lambda)^3$ 量级。如果使用可见光(λ 约500 nm),光子的存储能力则可达到 $1\ 012\ \text{b}/\text{cm}^3$ 量级。三维存储除容量大外,另外一个显著特点是并行存取,即信息写入和读出都是“逐页”进行的,并能与运算器并行连接,因此速度很快。此外,由于光子无电荷,既能防电磁干扰,读取准确,又不产生干扰,具有保密性。这样一些优点,都是“电子”无法与之相媲美的。此外,由于光在时间与空间上的特性,可形成反演共轭波,在自适应控制等信息处理领域有独到应用;由于光子的自旋而导致出现的偏振、双折射效应等还可产生一系列新的应用等。

1.2.2 光信号处理的现状与发展

前面我们已经看到了光子的优越性,但是必须认识到,人们对光子的认识和应用还很不成熟,所以现在谈实现全光网还为时过早。相对而言,人们对于电子无论从理论上还从实际应用上都已达到相当成熟的程度。因此将光子学的优越性与电子学的成熟性相结合,可以为现有的信息处理技术提供既优越又具有现实意义的解决方案,而光子学也将受益于电子学而不断获得发展。

在发展模式上,电子学的发展经历了以下历程:电学 → 电子学 → 电子回路 → 电子集成 → 电子系统 → 电子工程 → 电子产业,那么我们可以预见,光子学的发展也将按照类似的历程来发展:光学 → 光子学 → 光子回路 → 光子集成 → 光子系统 → 光子工程 → 光子产业,事实上,目前已发展到光子集成这一步,而光子系统正在开发中。可以看出,光子学和电子学的这种“相似”,为光子学未来的发展提供了很好的借鉴。光子学与电子学之间已形成在应用上相互补充、在发展上相互促进的关系。

对于光信号处理的现状和发展,可以从以下几个方面讨论。

1. 光纤通信中的光信号处理

由于激光有很好的单色性和相干性,能实现高密度复用、并行传输、交叉连接以及分束存储等,因此用光子作为信息的载体将使未来信息系统的传输容量、处理速度和存储密度有着惊人的扩充和提高。

光纤通信中的光信号处理主要包含光的产生、传输、光路的控制和探测,因而必须有相应的光器件。与电子学器件相比,光子学器件的时间响应和单通道超大容量要比电子学器件高得多,这对信息技术发展有很大的推动作用。

由于低阈值、低功耗、长寿命及快响应的半导体激光器的诞生促成了光纤通信的实用化,并以 $0.8\ \mu\text{m}$, $1.3\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 的激光光源为基础形成3个光通信的窗口。多量子阱器件、高密度垂直腔面发射器、量子级连器件和微腔光子动力学器件的发展,使激光阈值不断降低,

激光转换效率与输出功率不断提高,波段得到扩展,线宽得到改善。用掺铒光纤放大器(EDFA)替代常规的光/电/光中继系统,是光信号处理技术给光纤通信带来的伟大变革。

信息技术的迅猛发展以及信息高速公路的飞速建设,不断向光纤通信提出更高、更快的要求。为满足超快速、超大容量的通信要求,人们不断探索。目前普遍认为,复用通信是一种非常方便和有效的通信扩容方式,可有效地解决 21 世纪的不增长的通信要求。在诸多复用通信方式中,波分复用(WDM)加光放大单元的通信被证明是目前最可行有效的通信模式,已获得普遍的应用。此外,由于 OTDM 光通信可以使用单一光源,对光纤放大器平坦度要求较低,从而使光纤放大技术的应用简单化,并且不存在四波混频串扰等问题。因此 OTDM 技术与 DWDM 技术在高速光通信网的发展中都占有重要地位,二者的结合将支撑未来超高速光通信网的实现。

从光纤通信的发展来看,为了使信号传递得更远,传统的以光强度调制、直接检测为特征的非相干光光纤通信将被以相位调制、差分检测为特征的相干光光纤通信所代替。成功的相干光通信可使信息传送距离达到 1 000 km 以上。此外,在一根理想的光纤内,“孤立子”(soliton)可以被无限远地传播。在光纤中孤立子的形状是由克尔效应和色散效应的相互抵消来保持,孤立子的强度衰减用光纤放大器来补偿,而皮秒激光脉冲可使孤立子彼此间不相互重叠。在“零误码”情况下,孤立子可以在光纤中传递万里之远。孤立子传输中同样可以用波分复用技术来增大传递信息的容量。因此相干光通信和孤立子光通信是第五代光通信,是跨入 21 世纪的光纤通信。

对一个实用化的信息光子系统,无论从速率的提高、功能的拓展、系统的可靠性、稳定性以及与微电子系统的兼容性等诸多方面考虑,通信器件的光子回路集成化将是发展的必由之路。光子回路集成化是模拟微电子集成器件,把不同功能的光子器件通过内部光波导互连制成光子集成芯片,包括激光器与光子接受器、放大器、调制器和光开关等。光子集成的研究是一项开拓性的创新工作,它的突破,有赖于对一系列基础性科学与技术问题的深入研究、透彻掌握和熟练运用。目前,光子集成器件主要应用于各种电光效应,同样也离不开电的操作,因此实用的光子集成芯片必须配以相应的电子回路和成熟的微电子技术作为终端处理,即大型的光电子集成系统。一旦光子回路与微电子系统集成得以实现,它将继微电子的成就之后,导致信息技术的第二次革命性飞跃。

可以认为,光信号处理技术是光纤通信技术的重要组成部分,光纤通信的发展依赖于光信号处理技术的发展与成熟,没有光信号处理技术的支持,对光纤通信网的规划将成为空中楼阁。

2. 光存储技术

20 世纪末兴起的光存储,特别是光盘存储技术,对信息的存取产生了重大影响。光盘存储技术是数字化存储的取出,可与计算机直接连接。与磁存储相比较,它有存储容量大、寿命长、可替换、不易损坏等优点。数字光盘存储技术正向更高存储密度和更高存取方向发展,到 21 世纪前期,比现有存储密度高 10 倍(5 in (1 in=2.54 cm) 光盘可存储 100 亿比特)和存取速度快 10 倍(每秒 1 亿比特)的可擦除重写的光盘将获得应用。

随着光子学技术的发展,目前的热记录方式将向光子记录方式发展。21 世纪的超高密度快速存储主要向以下几个方面发展: