



光分组交换技术

GUANGFENZU
JIAOHUAN JISHU

刘焕淋 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

光分组交换技术

刘焕淋 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书介绍了光分组交换及关键技术研究的主要内容和方法,主要包括光分组交换的基本概述和发展概况、光分组交换涉及的主要器件及系统、节点结构、冲突解决机制和方案、全光分组处理有光分组头提取技术和方案的分析,涵盖了近几年光分组交换及全光信息处理技术的研究进展和方法。

本书可供具有一定通信理论基础的光纤通信、光电子、通信网络等科研技术人员和工程技术人员阅读,也可用为高等院校、科研院所等通信专业及光通信相关专业研究生的选修教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光分组交换技术/刘焕淋编著. —北京:国防工业出版社,2010.12

ISBN 978-7-118-07205-1

I. ①光… II. ①刘… III. ①光纤通信—通信网—连接技术 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 264876 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 11¼ 字数 256 千字

2010 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

21 世纪是信息技术发展的全新时代,随着微电子技术、计算科技技术、光电子学技术的发展,通信与计算机密切结合。通信技术作为国家基础信息设施,在信息产业中发挥着越来越重要的作用,通信技术发展水平成为世界各国信息时代的标志和战略竞争热点,一个支持多业务融合的宽带快捷的通信网络成为现代信息社会的重要支撑技术。

在信息的传输、交换和处理环节中,光纤以巨大的带宽和优良的传输性能成为通信业务高速、大容量传输的理想媒介。光纤通信技术经过 40 年发展,给通信领域带来了深刻变革。随着光纤波分复用和密集波分复用技术的发展,光纤单波长信道实现了 40Gb/s 传输速率,实验室中报道的单光纤实现了总容量达 10Tb/s 传输速率,光纤传输具有巨大的传输容量和带宽,成为现代信息骨干传输的主要方式。自 20 世纪 90 年代以来,WDM 使光纤通信系统的容量提高了近 10 万倍,突破了信息传输的“电子瓶颈”极限速率限制。然而,处在通信网核心的交换节点的电子信息处理速率远远满足不了信息业务发展的需求,电子交换已经成为制约通信技术发展的瓶颈。交换技术作为通信网络和通信系统不可或缺的核心技术,传统的电子交换技术在经过 100 多年发展后交换速率已经得到极大提高,电子信息处理的速率受到电交换设备成本和微电子技术极限限制而难以再提高,电子交换节点成为网络信息处理的瓶颈点。同时,随着因特网的广泛应用和视频业务发展,用户对信息处理速率需求的不断增加,信息交换的速率显然落后于光传输的速率,电子交换严重限制了光纤通信优势的进一步发挥,网络的信息瓶颈正从传输层转移到了网络层,尤其是在线路传输速率超过 10Gb/s 时,光交换技术被认为是解决通信网络信息处理瓶颈的根本途径。

光交换技术在网络节点上不进行“光/电/光”转换,直接在光域将输入光信号高速交换到不同输出端,克服了电交换与光传输的速率失配问题。随着光交换技术的发展和研究深入,提供任意细小的分组传输和交换颗粒,具有分组交换“存储—转发”的带宽利用率高、配置灵活、以数据为中心的小粒度光分组交换,被通信业内专家视为光交换的最高阶段和光通信发展长远理想目标,

是支持灵活 Internet 业务的最理想方式。光分组交换技术的实现,依赖于光分组头标记技术、光分组竞争解决机制、光分组封装技术、光交换节点结构和全光缓存及逻辑器等的研究进展。

本书共分 5 章,第 1 章讨论光交换技术发展及光分组交换的基本概念;第 2 章介绍光分组交换的全光器件基础知识及研发水平;第 3 章讨论光分组交换的波长路由型、广播选路型和空分型光交换节点结构,并研究了短包抢先型光分组交换节点结构及资源调度机制,光分组的长度分布特性对空分型光分组交换节点性能影响;第 4 章讨论光分组资源竞争解决方案,分析了光纤延迟线、波长变换器的配置结构对冲突解决性能影响;第 5 章研究了光域实现分组头提取、同步、编码、同步、再生和压缩技术及实现方法,全光信号处理是高速全光交换实现的必由之路。

本书在编写过程中得到白晓棠、庞俊宇、张斌和陈春燕的大力支持,他们参与了相关章节的编写、勘误和整理工作。在成书过程中,参考了纪越峰、龚倩、徐宝强、顾婉仪、余重秀、李宝权、任海兰、张民、高志国等学者的思想和研究成果,在这里对本书所有参考文献的作者表示衷心感谢。另外,本书获得了重庆邮电大学出版基金的资助,在此一并表示感谢。

作者多年在全光传送与光分组交换技术领域从事研究工作,本人在总结多年研究成果的研究内容和本人指导硕士生及博士论文成果基础上,参考了大量的国内外文献和资料,结合教学实践,完成了本书的编写。但由于编者水平有限,经验不足,书中难免有错误和疏漏不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2010 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 光交换技术发展	2
1.2.1 光线路交换	2
1.2.2 光突发交换	3
1.2.3 光分组交换	4
1.3 光分组交换结构及关键技术	4
1.3.1 光分组交换的基本结构	4
1.3.2 光分组交换关键技术概述	7
1.4 光分组交换的研究现状	11
1.4.1 国外研究现状	11
1.4.2 国内研究现状	12
第 2 章 光分组交换的器件基础	14
2.1 概述	14
2.2 光开关	15
2.2.1 机械式光开关	15
2.2.2 MEMS 光开关	16
2.2.3 电光开关	19
2.2.4 热光开关	20
2.2.5 声光开关	22
2.2.6 其他光开关	22
2.3 光 放 大 器	25
2.3.1 光放大器概述	25
2.3.2 半导体光放大器	27
2.3.3 光纤光放大器	34
2.4 光波长转换器	39
2.4.1 基于光电再生型的波长转换器	40
2.4.2 基于 SOA 的波长转换器	40
2.4.3 基于激光器的波长转换器	43
2.4.4 基于光纤非线性的波长转换器	44
2.5 光 调 制 器	45
2.5.1 电光调制器	46

2.5.2	磁光调制器	47
2.5.3	电吸收光调制器	47
2.5.4	其他光调制器	48
2.6	其他光器件	49
2.6.1	光滤波器	49
2.6.2	光探测器	49
2.6.3	光衰减器	50
2.6.4	激光器	50
2.6.5	光连接器与耦合器	51
第3章	光分组交换节点结构	52
3.1	概述	52
3.2	空分交换型光分组交换节点结构	53
3.2.1	纯空分型 OPS 节点结构	54
3.2.2	无缓存型空分 OPS 节点结构	54
3.2.3	输出缓存型空分 OPS 节点结构	55
3.2.4	反馈缓存型空分 OPS 节点结构	56
3.3	波长广播—选择型光分组交换节点结构	56
3.3.1	KEOPS 项目中的广播选择型交换结构	57
3.3.2	ATMOS 项目中的广播选择型交换结构	57
3.4	波长路由型光分组交换节点结构	58
3.4.1	输出缓存型节点结构	59
3.4.2	输入缓存型节点结构	60
3.5	改进的光分组交换节点结构研究	61
3.5.1	短包抢先调度光分组交换节点结构	62
3.5.2	分组长度分布特性对光交换节点结构性能影响	72
第4章	光分组竞争解决和资源分配技术研究	77
4.1	概述	77
4.1.1	基于光纤延迟线光域解决分组竞争	77
4.1.2	基于波长变换光域解决光分组竞争	82
4.1.3	基于偏射路由解决光分组竞争	86
4.1.4	基于 FDL 和波长转换结合解决光分组竞争	87
4.2	FDL 联合电子存储器的混合冲突解决方法	88
4.2.1	光电混合缓存结构	88
4.2.2	共享反馈 FDL 缓存的 FIFO 和 FF-VF 调度算法分析	90
4.2.3	光电混合缓存结构的改进 FF-VF 调度算法	92
4.2.4	光电混合缓存结构的性能仿真	93
4.3	负载选择光纤延迟线缓存方式的分组竞争解决方法	95
4.3.1	基于负载选择的 FDL 光缓存冲突解决结构	95
4.3.2	负载选择 FDL 缓存调度及资源分配	97

4.3.3 负载选择 FDL 缓存结构的性能仿真及结果分析	100
4.4 光分组排序占用光纤延迟线的资源分配方法	103
4.4.1 FDL 缓存排队 OPS 节点模型	105
4.4.2 FDL 的几种缓存方案	105
4.4.3 FDL 缓存排序方案性能仿真与分析	109
4.5 有限波长变换与参量波长变换器结合冲突解决方案	113
4.5.1 有限波长变换与参量波长变换器结合节点结构	113
4.5.2 参量波长转换器优先算法	114
4.5.3 仿真及结果分析	115
第 5 章 全光分组处理技术研究	118
5.1 全光信号处理概述	118
5.2 全光分组编码与分组识别技术	123
5.2.1 全光分组编码技术	123
5.2.2 全光分组识别技术	125
5.3 光分组时钟同步技术	129
5.3.1 光时钟同步概述	129
5.3.2 光时钟恢复技术	130
5.3.3 基于 SOA 和延迟干涉仪的光时钟同步方案	136
5.3.4 基于改进的 SOA-DI 的全光同步方案	136
5.3.5 STFZ 基于双 SOA 单臂调制的全光同步方案	141
5.4 全光信号再生技术	145
5.4.1 光信号再生技术概述	146
5.4.2 光信号 2R 再生	147
5.4.3 光信号 3R 再生	149
5.5 全光分组头提取技术研究	150
5.5.1 基于 SOA 和可调 DI 干涉仪的光分组头提取方案	151
5.5.2 基于 SOA 嵌套延迟干涉仪的全光分组头提取方案	155
5.5.3 基于 SOA 串联 MZI 的全光分组头提取方案	158
英文缩写词汇表	163
参考文献	166

第1章 绪论

1.1 引言

在1960年7月,美国科学家西奥多·梅曼(Maiman)在加利福尼亚的休斯空军试验室发明了第一个红宝石激光器,和普通光相比,激光具有波谱宽度窄、方向性极好、亮度极高、以及频带和相位较一致的良好特性。激光器的发明和使用,使光通信的发展进入一个崭新的阶段。这束仅持续了3亿分之一秒的红色激光标志着人类文明史上一个新时刻的来临。1966年英籍华人高锟(Kao C C)博士等人根据介质波导理论,首次提出只要设法消除玻璃中的各种杂质,做出有实用价值的低损耗光纤进行光信号传输是完全有可能的^[1,2]。这两件大事使光通信变成现实成为可能,从那时起到现在,光纤通信技术以远远超乎人们预料的速度发展,其传输容量和速率都得到极大提高,光纤通信已成为现代通信传输特别是干线传输的主要方式,40年间发展起来的光通信技术给整个通信界带来了深刻变革。

1970年,美国的康宁公司首先研制出损耗为20dB/km的光纤,并在1972年又把光纤的损耗降低到4dB/km,此时,各国都开始重视了光纤通信这一新的通信方式,继而使光纤通信的研究有了飞速的发展,就在光纤有了重大突破的同一年,美国贝尔实验室研制成功室温下连续振荡的半导体(GaAlAs)激光器,为光纤通信找到合适的光源。现在,借助高速光发射和接收技术,单一光波长的传输容量已达到40Gb/s,并且有80Gb/s的试验系统;应用波分复用技术,单光纤的传输容量可达到1Tb/s~10Tb/s量级。在2002年的OFC会议上,日本Mitsubishi Electric Corporation报道了一个复用了65个波长、每波长22.8Gb/s、传输距离超过8398km的实验;NEC Corporation报道了一个复用了273个波长、每波长40Gb/s的10.92Tb/s试验系统。我国也已基本建成了覆盖全国的、主要基于SDH和波分复用(WDM)传输设备的通信传输骨干网,并在此基础上构建了面向各种业务和应用的信息应用系统。

目前,在高速光传输方面,已经实现10.96Tb/s(274波×40Gb/s)的实验系统,在超长距离方面,已经达到了4000km无电中继的技术水平。在光网络方面,“光网络技术合作计划”(ONTIC)、“国际透明光网络”(NTON)、“泛欧光子传送重叠网”(PHOTON)、“泛欧光网络”(OPEN)、“光城域通信网”(MTON)等一系列光网络研究项目的相继启动、实施与完成,为下一代宽带信息网络,尤其是为承载未来IP业务的下一代光通信网络奠定了良好的基础^[3-8]。光网络作为信息社会的基础设施,拥有广阔和美好的市场前景。光通信市场经历了2000年—2002年起落后,从2003年开始步入稳健发展状态,光通信年均市场增长率维持在10%以上,光网络将发展成为面向业务驱动的动态灵活光网络,而光纤通信的极大带宽支持了整个信息社会进步,光通信产业成为现代信息社会支柱产

业^[8,9]。

经过 100 多年的发展,电子交换技术的速度已经得到极大提高,从 20 世纪 64Kb/s~2Mbit/s 的数字程控交换速率发展到 155Mb/s~160Gb/s 的 ATM 交换,电子信息处理的速度已近极限,无法达到 Tb/s 级交换。因此,通信网络中不可缺少的节点交换设备如果继续采用纯电子交换方式,将受到电交换设备成本和微电子技术极限的限制而难以提高,况且还中断了 WDM 传输的透明性,从而严重限制了光纤通信优势的进一步发挥。光交换技术的研究始于 20 世纪 80 年代,然后逐步地发展,但从目前光通信技术的发展现状来看,光交换技术的发展速度显然落后于光传输技术的发展^[10,11]。另一方面,从 20 世纪 90 年代的中后期开始,通信新业务不断涌现,特别是因特网业务的迅猛崛起,导致全球信息量呈级数增长,通信业务由传统单一的电话业务转向高速 IP 数据和多媒体为代表的宽带业务,对通信网络的带宽和容量提出了越来越高的要求。而当前限于电子速率极限的路由器已在层出不穷的宽带新业务和人们无止尽的带宽需求下越来越显得捉襟见肘,核心交换节点处理速度面临严重考验,电子交换方式将逐渐阻碍通信网的发展和交换速率的提高。因此,对交换技术自身进行变革是解决交换节点信息处理速率问题的根本途径,这就要求我们必须突破电子式交换造成的瓶颈,大力发展光交换技术。

1.2 光交换技术发展

光交换技术是在光域中直接将输入光信号交换到不同的输出端。与电子交换技术相比,光交换无需在光纤传输线路和交换机之间设置光端机进行光/电(O/E)和电/光(E/O)交换,而且在交换过程中,还能充分发挥光信号的高速、带宽和无线电磁感应的优点。光纤传输技术与光交换技术有机融合在一起,可以起到相辅相成的作用,从而使光交换技术成为通信网交换技术的一个发展方向^[13-16]。实现光域的交换技术是分阶段逐步实现的,根据光交换技术发展阶段和交换粒度的不同,光交换大致可分为光线路交换(Optical Circuit Switching, OCS)、光分组交换(Optical Packet Switching, OPS)和光突发交换(Optical Burst Switching, OBS)方式。图 1-1 是光交换技术发展演变的示意图。

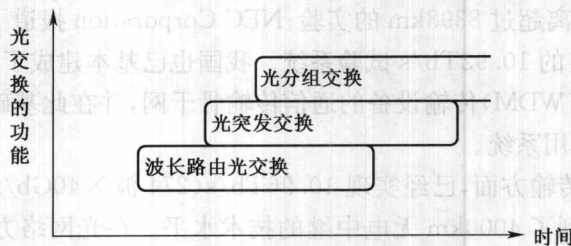


图 1-1 光交换的发展演进

1.2.1 光线路交换

第一阶段是正进入实用的光线路交换(OCS),光线路交换的交换方式与传统的电路交换相对应,它以整个光波长为交换粒度,一个交换过程可分为三个阶段:光路建立、光路保持和光路释放。OCS 主要利用光分插复用(OADM)、光交叉连接(OXC)等设备来实

现,中间节点不使用光缓存,OCS引入 OXC;与边缘 IP 路由器紧密结合,具备较好的伸缩性并且在成本上也具有一定优势。OCS 的实现将极大地提高网络的交换速度和容量,而且实现相对简单;但它本质是在光域上提供波长粒度的电路交换服务,难以高效承载没有经过整形或静态复用的数据流量,而且电路交换模式不适合未来基于分组交换的光 Internet 网络,不易实施灵活的流量管理和业务接入。

光路交换的主要特征是需要一个光路的建立和拆除过程,它需要一个大小为往返时间的连接建立延迟,故造成大量带宽浪费。近年来,人们将光交换研究的重点放在光突发交换和光分组交换。

1.2.2 光突发交换

第二个阶段将可能是以突发为交换粒度的光突发交换技术(OBS),1997 年,由 Chunming Qiao 和 J. S Tunnor 分别提出的一种新的光交换技术——光突发交换^[17-19]。

光突发交换的思想是在光网络中,突发数据包与控制信息包在交换节点和传输信道上相分离,控制信息包被交换节点提前发送,控制信息包在到达的各个节点采用延迟预定方式预约端口、波长资源,突发数据包无需收到预约请求的确认信息而随后发出,并沿着控制包预定好的波长和端口透明地到达目的节点,光突发交换原理如图 1-2 所示。在光突发交换中最基本的交换单元叫做突发(Burst),每个突发由突发数据(Burst Data, BD)包和控制信息(Control Packet, CP)包组成,突发包由具有相同属性的数据分组汇聚而成。控制包对应于突发数据,包含了该突发数据的数据长度、偏置时间、生存时间、路由选择等参数。光突发交换的核心问题是资源预约协议设计,资源预约协议可以分为双向资源预约协议和单向资源预约协议,双向资源预约协议的缺点是带宽利用率低,缺乏网络的灵活性。因此,光突发交换资源预约协议大多采用单向预约方式。

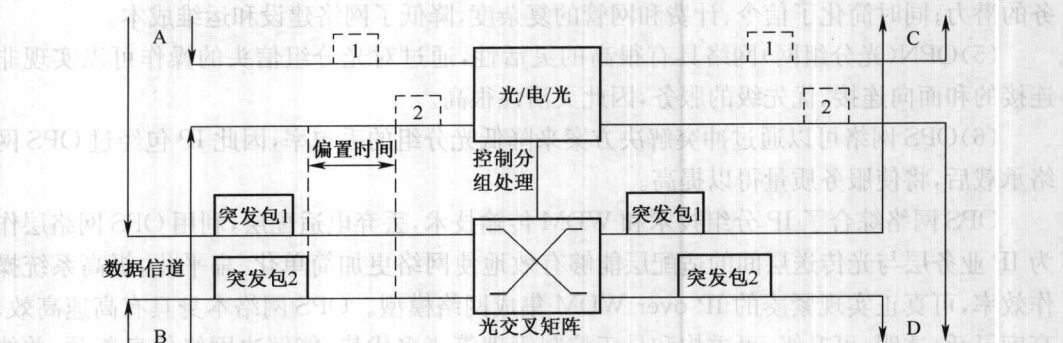


图 1-2 光突发交换原理图

光突发交换作为光线路交换和光分组交换的折中方案,虽然可以充分利用光传输与电处理的优势,提高交换的灵活性和扩展性,但是,光突发交换存在下面的问题:①光突发数据包粒度太大,导致带宽利用率下降;②截止到目前为止,OBS 的单向资源预留协议仍然不够成熟,采用 JET 协议预留资源时,偏置时间需要精确考虑实际光网络的交换节点距离、波长信道的时延特性;③光突发交换的控制协议有待进一步创新。

1.2.3 光分组交换

第三个阶段,也是被业内视为光交换的最高阶段和光通信发展长远目标的光分组交换(OPS)阶段^[20-23]。光分组交换是分组交换思想在光层上的延伸与实现,支持以光分组的形式承载数据,虽然仍旧遵循分组交换的“存储转发”原则,但分组的存储和转发都在光域中进行。与光突发交换相比,它以更小粒度的光分组作为交换单位,能良好地支持带宽利用率高、配置灵活、以数据为中心的光 Internet 网络。每个光分组由分组头(header)和净荷(payload)两部分组成。数据部分由电层若干个具有相同业务特性的数据分组汇聚而成,分组头部分包含了交换过程所需的必要的路由控制信息。

由于光交换技术的不断发展以及 Internet 业务的不断增多,所以 OPS 综合了 IP 分组技术和光 WDM 传输技术,将分组交换与 WDM 传送无缝地集成在一起,继承了 WDM 的高速率、大容量、透明性和可重构性等特点,同时也延续了 IP 分组灵活、透明的异构通信环境。在上层业务不断 IP 化的未来,OPS 网络的出现恰好利用了 OPS 技术的优势来满足 Internet 业务的发展需要。OPS 网络更适合承载突发性大且分布非对称的 IP 等数据业务,OPS 特点主要表现在:

(1)OPS 可以直接在光域完成 IP 包的打包和复用,光分组的复用、传送与交换都可以在光域里实现,一定程度上缓解了交换系统的“电子瓶颈”问题,避免了光/电/光的转换。

(2)OPS 以光分组为单位实现对波长通道的统计复用,带宽资源是共享的,可以按统计时分复用的方法灵活高效地利用网络的空闲带宽资源,所以能够显著地提高网络的带宽利用率,且带宽分配灵活,适合承载突发性大的 IP 业务。

(3)OPS 交换的粒度多样化,可以实现任意大小传送的颗粒交换与传送,易于实现终端业务的灵活接入,并便于实施流量管理,适用于自相似突发性数据和数字视频业务。

(4)OPS 对用户数据速率和格式透明,因此具有良好的可扩展性,并具备提供综合业务的潜力;同时简化了信令、计费 and 网管的复杂度,降低了网络建设和运维成本。

(5)OPN(光分组网)网络具有很高的灵活性,通过对光分组信头的操作可以实现非连接的和面向连接、优先级的服务,因此灵活性很高。

(6)OPS 网络可以通过冲突解决方案来降低光分组的丢包率,因此 IP 包经过 OPS 网络承载后,将使服务质量得以提高。

OPS 网络综合了 IP 分组技术和 WDM 传输技术,丢弃电适配层,利用 OPS 网络层作为 IP 业务层与光传送层间的适配层能够有效地使网络更加简单化、扁平化,提高系统操作效率,可真正实现紧凑的 IP over WDM 集成网络模型。OPS 网络本身具有高速高效、高度灵活、透明、可升级、可重构和易于控制管理等诸多优势,能解决网络信息瓶颈,并能对未来多样化的 IP 业务提供理想的支持。因此,OPS 被业内视为 IP 业务和下一代网络(NGN)的理想承载平台,开展对其关键技术的研究具有非常重要的现实意义。

1.3 光分组交换结构及关键技术

1.3.1 光分组交换的基本结构

光分组交换是在光域以分组为单位实现微秒粒度量级的分组交换技术,以光分组形

式承载业务,净荷的传输与控制在光域进行,光分组头的处理在光域或电域实现。光分组交换网络的基本功能需求包括:①光分组路由功能,即根据光分组头中的路由信息,为光分组寻找从源点到宿点的光通道;②光分组同步功能,即在交换节点输入/输出端对光分组进行时间和相位上的校准,以使光分组的位置与交换操作相配合;③光分组头识别与重写,在交换节点输入端捕获光分组头并读取信息,在输出端插入更新后的分组头;④流量控制与冲突解决功能,即控制网络流量,防止光分组资源竞争和网络拥塞现象,确保光分组交换网络的服务质量;⑤波长交换功能,即为光分组从交换节点输入端口经波长变换和资源配置到达输出端口,实现交换节点内部路由。根据这些基本功能特点,光分组交换节点可以分为核心节点和边缘节点两种,核心节点实现简单快速的光分组交换和路由功能,如大颗粒的波长路由交换和批量光分组路由等 OSI 模型对应的低层功能;边缘节点进行复杂且费时的光分组封装/拆分功能、流量整形、业务量疏导及连接会话建立等过程,如图 1-3 所示。

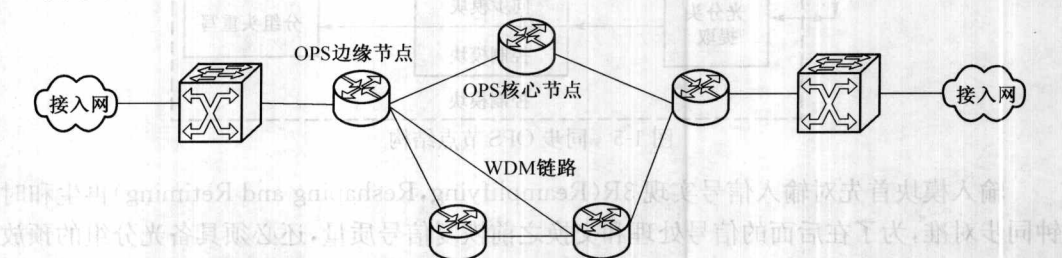


图 1-3 光分组交换网络结构

图 1-4 是 OPS 通用的光分组数据结构,它由分组头、保护带、有效净荷三部分组成,这一结构首先被用于欧洲的 KEOPS OPS 项目研究中。其中分组头承载了路由、管理维护相关信息,保护带用于避免由定时抖动而产生的负载和分组头信号干扰,占分组长度大部分的有效负载承载用户数据。

光分组头可以由很多段组成,包括:定位和同步比特,用于分组的定界和同步操作;源标记,用于给出分组边缘入口节点地址;目标标记,用于给出分组边缘出口节点的地址;分组类型,用于实现对多优先级业务的支持;分组序列序号,用于对属于同一原数据的多个分组的排序操作;OAM 段,用于管理和维护操作;信头差错控制段(HEC)等。

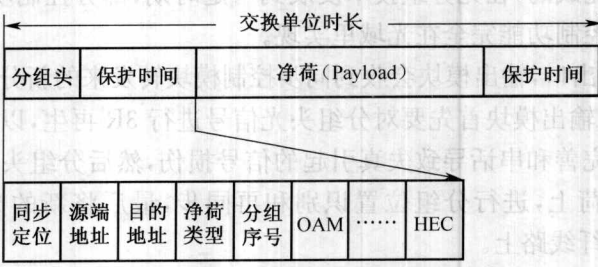


图 1-4 光分组数据的一般结构

根据光交换节点交换信号特性可分为全光分组交换和光电混合光分组交换;根据光交换控制机制和光分组长度可变性,光分组交换还可分为同步光分组交换和异步光分组交换。

在同步光分组交换中,所有光分组的长度固定,每个光分组包在一个固定时隙中处

理,每个时隙的时间长度大于等于光分组的长度,同步光分组交换要求到达输入端口的光分组时钟必须同步,边缘节点还需要对光分组进行封装、分拆和重组。在相同的业务负载情况下,同步光分组交换网的吞吐量更大。同步光分组交换的一般节点结构主要由四部分组成,即:输入模块、高速光交换矩阵、输出模块、控制模块(包括同步、分组头提取与分组头重写等单元),如图 1-5 所示。

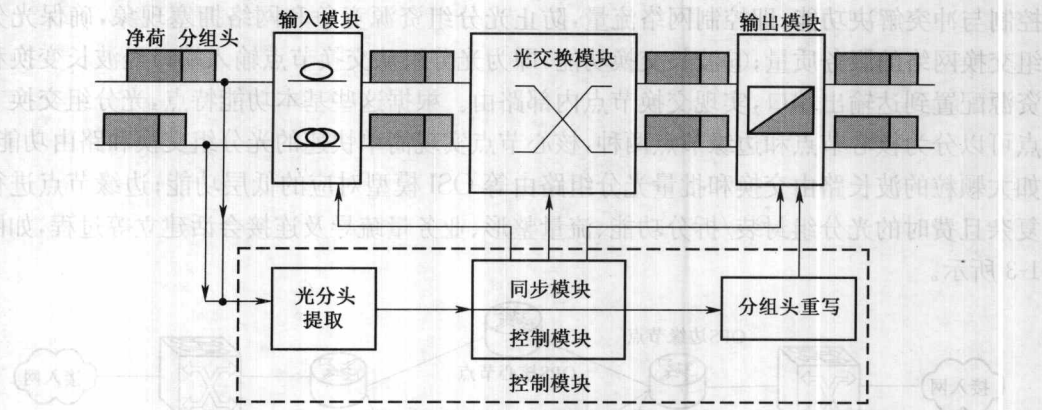


图 1-5 同步 OPS 节点结构

输入模块首先对输入信号实现 3R(Reamplifying, Reshaping and Retiming)再生和时钟同步对准,为了在后面的信号处理和交换之前恢复信号质量,还必须具备光分组的预放大、同步、缓存以及光分组头和净荷定位等多种功能;光分组头提取单元是识别分组头所携带的光分组的地址路由及控制信息,随后光分组头被转发给同步控制模块,同步控制模块根据分组头信息对输入模块、光交换模块和输出模块进行端口配置和资源分配管理。

作为 OPS 节点的核心部件,高速光交换模块的性能基本上决定了节点的交换速率、吞吐量、可扩展性和可靠性等多种指标,交换模块根据控制模块的指令来完成净荷的交换功能。而控制模块负责处理分组头信息和发布所有指令,对交换矩阵模块进行配置。控制模块要询问保存在每一个 OPS 节点的转发表,同时转发表也会根据网络结构的变化在网管系统管理下不断更新;此外,控制模块还要具备分组头的更新以及向输出模块转发新的分组头的功能,通过新分组头包含的信息识别转发到路径中的下一节点。目前,控制功能是由电子电路来完成的,在光分组技术发展 to 一定时期,部分控制功能将在光域完成,长远目标是所有的控制功能完全在光域里实现。

在 OPS 节点的出口,输出模块会收到同步控制模块转发来的新分组头以及交换模块转发来的净荷信息,输出模块首先要对分组头光信号进行 3R 再生,以便重新恢复在交换模块中由于元件不完善和串话导致失真引起的信号损伤,然后分组头重写部分把新分组头重置到相应的净荷上,进行分组位置识别和再同步,最后将新的光分组复用发送至 OPS 节点输出到光纤线路上。

在异步光分组交换中,光分组长度可变,光分组进入交换结构前无需进行同步,可以出现在任意时刻,边缘节点不需要对分组进行分拆和重组,网络结构更加灵活,特别适合承载突发性很大的 IP 业务流。但是,异步光分组交换的流量特性更加复杂,光分组在交换机端口处对输出端口和缓存资源的竞争概率更大,需要设计更加合理的冲突解决方案。围绕如何提高异步光分组交换性能,主要的研究方案有:

器件(1)增加缓存容量,设计更加精细的缓存结构,提高异步光交换节点性能。比如:设计光纤延迟线(FDL)的最佳缓存颗粒;在常规的输出 FDL 缓存结构中引入反馈缓存和多级缓存结构,增加缓存深度和容量;启用复杂的缓存资源调度算法,充分利用 FDL 空隙。

(2)优化交换节点的资源调度算法,减少光分组由于资源冲突导致的丢包概率。比如:异步光分组交换节点一般综合采用光纤延迟线、偏射路由和波长变换的冲突解决方案,以提高交换节点的吞吐量;光交换节点设计高效的节点调度算法,迅速将冲突的光分组路由到可用资源或空闲端口,以减小冲突光分组的丢包概率。

(3)边缘节点对入网的光分组进行流量整形,平滑可变量业务特性改善异步光交换性能。光分组的流量整形可以改善光分组的可变量特性和无序行为,平滑网络的流量特性是提高光交换网络性能的有效措施之一。

异步 OPS 节点结构与同步 OPS 节点结构相比,不需要同步模块。异步 OPS 节点结构中,光分组到达核心节点的输入模块,由光纤分离器分离出光分组头,光分组头处理部分读取光分组头携带的路由、控制信息;控制模块根据光分组头部信息对高速光交换矩阵进行路由和端口资源配置,并控制分组头重写单元将新的分组头信息重写到对应交换矩阵输出的净荷组成光分组,输出模块将重写分组头的光分组输出到光纤线路上。与同步光分组交换相比,异步光分组交换不需要同步模块,由于交换矩阵和控制模块要解决概率更大的冲突光分组的缓存,因此,其吞吐量低于同步光分组交换网络。

1.3.2 光分组交换关键技术概述

从光分组交换节点结构分析中不难发现:要实现光分组光交换,不仅物理链路中要有全光 3R 器件保证全光信号畅通,而且交换节点处要有超高速光逻辑器件来完成分组头的识别与更新、控制信号处理等功能,要有可集成的高速光缓存单元和大容量可升级的高速光交换矩阵来提供有效的冲突解决方案;光交换节点有性能较高的控制和调度策略、冲突解决方案及光分组头提取和处理等;光分组网络还要提供良好的通道保护和恢复机制、光路由策略、业务控制算法、光分组编码方案和分组交换协议等。这些关键技术的解决,尤其是光缓存和光逻辑器件技术上的突破,将极大地推动 OPS 研究,缩短 OPS 实用化进程。

1. 大容量光交换矩阵

光交换矩阵是光信号进行交叉连接和路由选择的关键设备,要求其无阻塞,低延迟,宽带宽和高可靠,并且具有单向、双向和广播形式的连接功能,它在很大程度上决定了节点的交换速率、吞吐量、可靠性和可扩展性等性能。光交换矩阵一般需要在光交换节点的控制作用下实现波长配置、波长转换和交叉连接功能,光交换矩阵的结构主要有^[26,27]:

(1)由 2×2 光开关构成的多端口的交换矩阵,常见的结构有 Crossbar、Benes、Spanke-Benes、Spanke 等。衡量此类光交换矩阵的性能指标有:最少 2×2 光开关的数目,各端口损耗是否均衡,是否存在波导之间的交叉及阻塞特性等。对于单个 2×2 光开关按工作原理可分为:机械型(如 MEMS)、电光开关型、热光开关型、声光开关型、磁光开关型及气泡光开关型。 2×2 光开关的性能指标有:交换速度、插入损耗、串音、消光比及偏振相关损耗。

(2)广播选择交换结构,将光交换矩阵每个输入端的光分组信号广播到光交换矩阵的

每个输出端口,用输出端口的光门决定哪个光分组被选择输出。这种结构要求光耦合器的数目多,而且造成光功率的损耗大。该结构的优点是能够实现组播和广播功能。

KEOPS 项目即采用了这类 OPS 节点。其端口规模为 16×16 ,同步操作,净荷速率为 10Gb/s ,可实现组播。在输入模块里,波长转换器将同一时隙到达的光分组调制到不同波长上,再由合波器将这些光分组复用到一起。在缓存与广播模块里, $1 \times K$ 的分光器将 WDM 光分组信号分为 K 等份并送至 FDL 阵列,从而使所有波长上的光分组都得到 K 种延时。每种延时下的光分组信号再被分为 16 份,然后被广播到输出模块。输出端的光开关先对 WDM 光分组信号进行地址和延时筛选,再把 WDM 光分组信号分解开并进行波长筛选。只有延时、波长、地址都恰当的光分组才被送至输出链路。

波长广播—选择型 OPS 节点通常具备树形结构,不需要烦琐的路由操作,全光缓存设计的速度快,利于 QoS 的实现和减少同频串扰,且利于实现组播功能,适用于网络规模不大的 OPS 城域网和局域网。但设计这类节点时需要考虑功率损耗问题,因此通常采用 SOA 光开关,以便同时实现开关功能与信号放大功能。

(3) 波长路由型交换结构,光交换矩阵每个输入端的光分组通过可调谐波长转换器,根据标签信息进行波长转换。转换后的光分组输入 $N \times N$ 阵列波导光栅,利用 $N \times N$ 阵列波导光栅的波长选择能力将相应波长的光分组衍射到相应的输出端口上。在光交换矩阵的输出端,通过固定的波长转换器将光分组转换到光纤信道中相应的波长上。WASP-NET 项目的 OPS 节点结构属于上述的单波长路由型 OPS 结构,其 OPS 节点具有波长模块性,所以大都具备良好的容量升级性能。节点的光损耗较小且系统硬件复杂性较低,集成度较高因而系统可靠性较高,适用于广域网和网径较大的城域网。但这种节点控制过程较复杂,此外,集成度高的负面影响易于引起光分组通道间的串扰问题。

挪威科技大学的研究组对这种 OPS 节点的单波长模块进行了改动。新方案仅需一个 $(K+M) \times (K+M)$ 的 AWG,采用可调谐波长转换器和共享反馈式的电存储器来缓解网络冲突。其优点是节点扩容时缓存单元数量不会成倍增长,既可用于同步 OPS,又可用于分组长度可变的异步 OPS,且成本较低,但因采用电存储器而使节点交换速度受限。

除上述基本 OPS 交换结构被提出以外,相继各研究机构提出了混合型和环形 OPS 交换结构。阿尔卡特公司于 2002 年演示了容量为 2.5Tb/s 的光 SOA 开关和批量波长路由结合的 OPS 节点交换矩阵,日本的 NTT 公司演示了交换容量为 5Tb/s 的混合型多级波长路由结合 AWG 的 OPS 节点交换结构。依靠波分复用/解复用器、耦合器、FDL、光环形器和布拉格光纤光栅(FBG)等器件,光 OPS 的环形交换结构被大量研究,澳大利亚墨尔本大学提出的 OPS 节点分布式控制和主从式控制两种环形 OPS 交换结构;奥地利 Vienna 理工大学的方案是留出专用波长作为环形分组网中的媒质接入控制(MAC)通道;美国 Stanford 大学在 HORNET 项目中提出的 OPS 节点则以副载波复用(SCM)方式提供光分组的开销与控制。AT&T 实验室提出光环形器与串并变换装置结合的环形 OPS 交换结构。

2. 分组冲突解决方案

在光分组的交换过程中,当两个或两个以上的分组需要同时从交换矩阵的同一个端口的相同波长信道输出时将产生竞争,为了避免光分组因竞争导致的分组丢弃,需要考虑光分组竞争解决方案。由于电的 RAM 比较成熟,一种方法是光分组转换到电域进行

缓存,但这就降低了光分组处理的速率;第二种方法是在光域进行冲突解决,常用的光域解决方法有:波长转换解决光分组波长域竞争,光缓存解决光分组时间上的冲突,而偏射路由通过空间替代路由解决光分组空间上的竞争。在实际应用中,常常是以上三种方案中的某两种或三种的结合使用,以提高光分组解决竞争的效率。其中,光缓存技术可提高网络的吞吐量,光缓存是最常用的冲突解决方案,但需要较多的硬件和复杂的控制。

波长转换是通过利用光器件的非线性特性将因冲突而受阻的光分组转换到其他空闲波长上再送出来解决资源竞争问题的^[28,29]。此方案灵活性高、延时较小,且能保持光分组原有的最短路径,利于提高网络吞吐量;但它增加了系统在控制和集成上的复杂性,其成本仍有待降低而可靠性有待提高。

光纤延迟线(Fiber Delay Line,FDL)是通过控制发生冲突的光分组进入光纤延迟线传输以解决光分组在时间上竞争端口的问题^[30-32]。光纤延迟线的结构有前向型和反馈型两种,在前向型中,对竞争的分组缓存不同的时间以消除其在时间上的重叠。在反馈型中,对竞争的分组反馈回交换矩阵的输入端,重新进行交换。光纤延迟线是迄今为止较为成熟的缓存解决冲突方案,但光纤延迟线提供的缓存带宽和缓存容量都非常有限,不能实现随机接入存储,解决光分组竞争的能力有限,但其优化的配置和调度性能还有待进一步研究,FDL 同时需要大量的硬件和复杂的电子控制。

偏射路由的基本思想是:无冲突时优先为光分组选择最短路由;有冲突时只为其中一个光分组选择最短通道,其他光分组从节点的空闲链路输出并寻求通往信宿的次最短通道。此外,对于不同的业务类型还需要考虑不同的优先级和不同的竞争解决措施^[33]。常见的两种网络拓扑结构是洗牌网(Shuffnet)网和曼哈顿街(Manhattan Street)网,如图 1-6 所示。偏射路由方案以网络吞吐量为代价来降低硬件的复杂性,增加了网络负荷和延迟,还可能打乱分组原来的次序,在终端需要对分组进行排序。

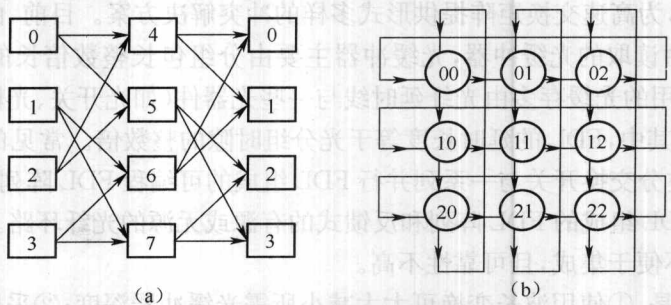


图 1-6 洗牌网和曼哈顿街网
(a)8 节点洗牌网;(b)3×3 曼哈顿街网。

由于以上的三种竞争解决方案各有优缺点,在实际的网络节点结构中,很多时候并不是单一使用某一种竞争解决方法,而是根据实际情况,使用这三种竞争解决方法的组合,以提高 OPS 的交换性能,减小分组丢包率。

3. 光分组头的提取、擦除和写入

当光分组到达交换节点时,为了获取光分组的路由和控制信息,交换节点必须提取光分组头标签信息来完成对交换矩阵和竞争解决单元的设置。

光分组头的处理可以在电域或光域内完成。在电域内,分组头与净荷常在同一速率