



“十三五”科学技术专著丛书

可变带宽 光交换与光接入

陈远祥 著

Variable Bandwidth Optical
Switching and Optical Access



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”科学技术专著丛书

可变带宽光交换与光接入

陈远祥 著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书详细地讨论了引入子波带后的可变带宽光交换技术和引入模式复用的可变带宽光接入技术。主要内容包括:绪论、可变带宽超级信道构建、可变带宽光交换与子波带上下路技术、超级信道变换和组播技术、基于模式复用的可变带宽光接入技术、多功能的可变带宽光接入技术。

本书是一本关于可变带宽光接入与光交换方面的学术专著,适合光通信光网络专业的本科生、研究生等阅读,也可以作为相关专业研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

可变带宽光交换与光接入 / 陈远祥著. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-5635-5305-1

I. ①可… II. ①陈… III. ①带宽—网络交换—研究②带宽—光接入网—研究 IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 254797 号

书 名: 可变带宽光交换与光接入

著作责任者: 陈远祥

责任编辑: 徐振华 董晓丽

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号 (邮编: 100876)

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京玺诚印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 8.25

字 数: 189 千字

版 次: 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5305-1

定 价: 28.00 元

• 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

近年来,随着网络用户的持续增加和新型网络业务的不断涌现,光网络面临巨大的数据交换挑战和灵活的带宽分配需求。传统的基于波分栅格的波分复用网络,其固定的速率配置、低效的网络利用率已经越来越不能适应未来网络业务的发展,光网络正朝着灵活、高效、可配置的方向发展。在这种背景下,可变带宽光网络应运而生。可变带宽光网络克服了传统波分复用网络中粗粒度和固定栅格的限制,它可以根据网络用户的需求进行动态地带宽分配,满足亚波长级到超级信道的业务需求。本书在讨论网络粒度对网络交换性能影响的基础上,提出了基于子波带交换的可变带宽光网络。子波带是网络中最小的交换粒度,对于低带宽的业务,分配单个的子波带;对于大带宽的数据业务,分配多个频谱连续的子波带形成超级信道,满足大容量的数据业务要求。另一方面,光纤中的空间维度已开始的高速光传输领域得到关注,并成功证明空间维度的引入可以带来传输容量数量级的提升。理论上来说,基于少模和多芯光纤的空分复用技术也为光接入网络提供了新的维度,即将不同模式和不同纤芯的光信号分配到不同用户端,构建基于空分复用的可变带宽光接入网络。新的空间维度的引入,可以有效地提高传输容量和扩展网络规模。

本书详细地讨论了引入子波带后的可变带宽光交换技术和引入模式复用的可变带宽光接入技术。主要内容包括:绪论、可变带宽超级信道构建、可变带宽光交换与子波带上下路技术、超级信道变换和组播技术、基于模式复用的可变带宽光接入技术、多功能的可变带宽光接入技术。

在编写过程中,北京邮电大学余建国教授提出了许多宝贵意见,对文章的编排、体系架构和详细的章节内容给了很多的建议,同时在余建国教授的资助下,本书才得以出版,在此特向余建国教授表示诚挚的感谢。感谢北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室各位老师的支持和帮助,书中很多的研究工作是在北京大学国家重点实验室完成的。

由于编者水平有限,书中不可避免还存在一些疏漏和错误,殷切希望广大读者批评指正。

作者

2017年9月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 可变带宽光网络	1
1.2 可变带宽光交换技术	2
1.2.1 WDM 系统中的光交换结构	4
1.2.2 可变带宽光网络中的光交换结构	5
1.3 可变带宽光接入技术	6
1.3.1 可变带宽光接入背景	6
1.3.2 基于模式复用的可变带宽光接入	7
第2章 可变带宽超级信道构建	9
2.1 可变带宽超级信道分类	9
2.1.1 基于奈奎斯特 WDM 的超级信道技术	10
2.1.2 基于 OFDM 的超级信道技术	10
2.2 正交波带的 OFDM 和 SCFDM 超级信道	12
2.2.1 OFDM 基本原理	12
2.2.2 相干光 SCFDM 系统	13
2.2.3 正交波带的 OFDM 和 SCFDM	13
2.2.4 基于光梳的 SCFDM 超级信道	14
2.3 基于光梳的可变带宽超级信道收发机	19
2.3.1 可变带宽收发机总体结构	19
2.3.2 可变带宽收发机实验验证	20
第3章 可变带宽光交换与子波带上下路技术	22
3.1 子波带交换关键器件	22
3.1.1 BV-WSS	22
3.1.2 交换粒度的选择	24
3.2 基于子波带交换的可变带宽光交换系统	24
3.2.1 子波带交换结构	24

3.2.2 子波带交换实验验证	24
3.2.3 子波带交换收发端 DSP 处理	26
3.3 Pbit/s 级可扩展光交换系统	28
3.3.1 Pbit/s 光交换结构设计	28
3.3.2 Pbit/s 光交换实验验证	29
3.4 基于 SCFDM 的子波带上下路	32
3.4.1 子波带上下路原理	33
3.4.2 子波带上下路实验验证	34
第 4 章 超级信道变换和组播技术	37
4.1 非线性光纤中的四波混频	37
4.1.1 四波混频原理	37
4.1.2 四波混频中的相位匹配	38
4.2 超级信道变换技术	38
4.2.1 WDM 中的波长变换	38
4.2.2 可变带宽光网络中的信道变换	39
4.3 基于泵浦切换的四波混频超级信道变换	39
4.3.1 超级信道变换原理	40
4.3.2 超级信道变换实验验证	41
4.4 超级信道组播	45
4.4.1 超级信道组播原理	45
4.4.2 400 Gbit/s OFDM 超级信道组播	46
4.4.3 1.2 Tbit/s SCFDM 超级信道组播	50
4.5 超级信道无中继非线性补偿与疏导技术	53
4.5.1 超级信道无中继非线性补偿技术	53
4.5.2 超级信道子波带疏导	57
第 5 章 基于模式复用的可变带宽光接入技术	61
5.1 模式复用解复用器	61
5.1.1 光纤熔融拉锥型模式复用解复用器	61
5.1.2 基于少模光子晶体光纤的模式转换器和波长转换器	64
5.2 基于自相干检测的模式复用光接入	67
5.2.1 基于自相干检测的 MDM-PON	68
5.2.2 基于自相干检测和 RSOA 的低成本 MDM-TDM PON	72
5.3 基于波长重用的模式复用光接入	76
5.3.1 波长重用的模式复用短距离接入网	76
5.3.2 波长重用的模式复用无线前传	82

第 6 章 多功能的可变带宽光接入技术	87
6.1 具有灵活组播功能的 WDM-PON	87
6.1.1 基本原理	87
6.1.2 具有组播功能的 WDM-PON 实验验证	88
6.2 TWDM-PON 中的灵活组播和汇聚	91
6.2.1 TWDM-PON 中的组播和汇聚原理	91
6.2.2 TWDM-PON 组播和汇聚实验验证	93
参考文献	98

第1章 绪 论

本章首先对可变带宽光网络的研究背景进行了简要的说明,在引入可变带宽光网络的基本概念后,介绍了当前可变带宽光网络的三种网络架构,分析了支持可变带宽光网络的关键技术及其研究现状,详细讨论了可变带宽光交换和关接入技术。

1.1 可变带宽光网络

最近几年,骨干网中网络流量几乎每隔两年翻一番,随着诸如高清晰度、实时视频通信等网络业务的兴起,网络流量还将继续保持指数级的增长。为满足快速增长的网络业务需求,具有大容量和低廉成本的光纤通信还将继续应用于未来网络中。到目前为止,单信道速率高达 40 Gbit/s 和 100 Gbit/s 的波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)系统已经被部署在骨干网络中,400 Gbit/s 的光系统也将很快部署。可以预见,在不久的将来,网络需要支持 Tbit/s 的单信道传输和 Pbit/s 的节点交换容量。随着光传输速率的提升,光信号损伤也越来越严重,当单信道传输速率增加到 400 Gbit/s 和 1 Tbit/s 时,传统的 50 GHz 信道间隔的 WDM 系统已经越来越无法满足高阶调制格式所需要的高信噪比要求。另一方面,新兴的互联网应用如互联网协议电视(Internet Protocol Television, IPTV)、视频点播以及网格计算(Grid Computing)等动态带宽的业务几乎需要从 10 Gbit/s 到 Tbit/s 级别的动态带宽,这也要求构建数据速率灵活可变、频谱动态分配的资源可重构的节约型光网络。传统的基于波分栅格的 WDM 网络,其固定的速率配置、低效的网络利用率越来越不能适应未来网络业务的发展。为了满足未来网络业务的需求,光传输和光网络朝着更加高效、灵活和可扩展的方向发展。基于此,业界提出了可变带宽光网络的概念。它是一种具有灵活的数据速率和频谱分配、高效率的资源调度、低成本、低功耗的新型弹性光网络体系结构。在可变带宽光网络里,网络能够根据当前网络状况和用户请求动态地进行带宽分配,同时能够降低网络能耗和网络成本,满足网络动态的业务需求。

目前国际上有多组研究小组提出了可变带宽光网络的架构,主要有日本电报电话公司(Nippon Telegraph & Telephone, NTT)的“Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network (SLICE)”,阿尔卡特朗讯(Alcatel-Lucent)贝尔实验室的“Data-Rate Elastic Optical Network”,日本电气(NEC Corporation)实验室的“Flexible Optical WDM(FWDM)”。在这三种网络中,SLICE 是基于多载波方式的,可通过调节比特率和频谱宽度来进行带宽的调节;Data-Rate Elastic Optical Network 是通过比特率的调节来进行速率的可变;FWDM 可以是单载波调制也可以是多载波调制,信道速率可以通过比特率和信道频谱宽度进行调节。

这三种网络架构都很相似,其中 SLICE 最早提出,其影响也较大,这里主要对 SLICE 网络结构进行介绍。SLICE 的目的是想通过在具有灵活粒度、高频谱效率和可扩展的传送网中解决现有网络中超 100 Gbit/s 的业务问题。

图 1.1 是传统 WDM 网络与 SLICE 网络的频谱分配情况。基于波分栅格的 WDM 网络中,波长是最小的交换粒度,每个信道的中心波长都在国际电信联盟标准化组织(International Telecommunications Union-Telecommunications Standardization Sector, ITU-T)规定的栅格中。同时每个波长的速率限定为 10 Gbit/s、40 Gbit/s 或 100 Gbit/s,信道与信道之间有很大的保护间隔,整个网络的频谱利用率较低。而在 SLICE 中,信道的带宽和中心波长是不定的,信道的带宽和调制格式都可以变化。SLICE 基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术,其业务分配的最小粒度为单个的子载波。对于低带宽业务分配单个的子载波,对于大带宽的数据业务分配超级信道。超级信道由很多的低速子波带汇聚形成,从而满足大容量数据业务要求。

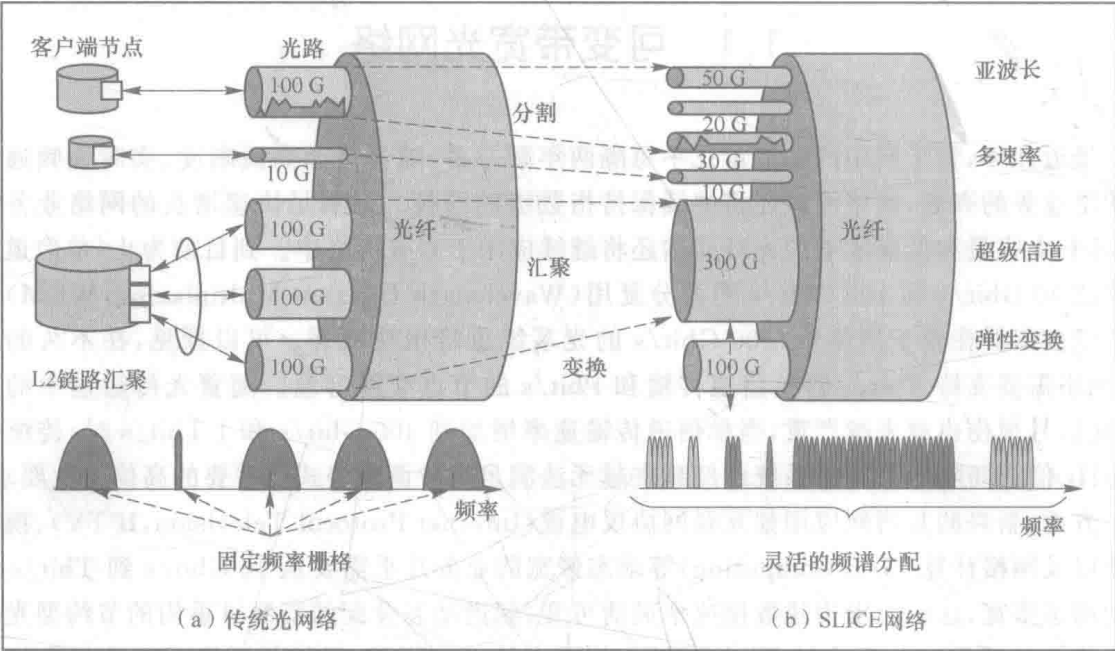


图 1.1 传统 WDM 网络与 SLICE 网络的频谱分配

在可变带宽标准化方面,2011 年 ITU-T 在 DWDM 的基础上对栅格标准进行了扩展,增加了对可变带宽光网络的支持。ITU-T G. 694.1 定义了粒度为 12.5 GHz 的灵活栅格网络,其频率宽度为 12.5 GHz 的整数倍,频率中心为 $(193.1 \pm n \times 0.00625)$ THz, n 为整数。灵活的波长栅格根据信号速率和调制码型进行合适宽度频谱的分配,以实现高频谱效率、大容量的传输系统。

1.2 可变带宽光交换技术

可变带宽光网络中动态的带宽需求要求交换节点能够同时支持亚波长到超级波长粒度的交换。在传统的 WDM 的交换结构中,采用的是基于光纤交换、波带交换和波长交换的

三层交换结构。可变带宽网络中,交换粒度为单个的载波,其交换粒度更小,载波的数量比波长多了一个数量级,如果仍然采用传统 WDM 系统中的三层交换结构,其矩阵规模将大大增加,控制也越来越复杂。同时,随着网络容量的提升,未来交换节点需要能够支持 Pbit/s 级别容量的交换。

在可变带宽光网络中,网络根据用户的请求进行动态的带宽分配。在理想的情况中,网络不受限于 WDM 栅格的限定,在整个频带对频谱任意地分配。为了实现这种灵活的分配,网络中需要可灵活调节的光器件,包括波长快速可调谐激光光源,中心波长和通带带宽快速调谐的波长选择开关(Wavelength Selective Switch, WSS)。然而在实际情况中,大多数的光学元器件无法真正实现完全无网格的可调性。例如,部署在光传送网的典型的可调谐激光器的调谐分辨率是 0.01 nm, WSS 的带宽调谐分辨率一般是一个 GHz 到几个 GHz,最小的通带带宽是十几个 GHz。光器件无法做到真正的完全无栅格,一味地追求无栅格将会大大提高网络的成本。因此,需要考虑网络粒度对网络性能的影响。下面对标准的 ITU-T 波分栅格网络、小栅格网络以及无栅格网络三种网络情形进行了比较。

如图 1.2(a)所示,在传统的 ITU-T 波分栅格网络中,典型的波长间隔为 50 GHz。超密集波分复用中,波长间隔已经达到了 25 GHz。在这种网络中,波长中心严格地固定在 ITU-T 波分栅格中,每个光路分配固定的频谱,而不管光路中动态的带宽变化。同时,为避免信道间的干扰,光路与光路之间有很大的保护间隔,网络频谱利用率不高。与此相反,图 1.2(c)展示的是完全无栅格情形。在这种网络中,网络根据业务请求动态地分配带宽,带宽粒度可以做到无限小,同时光路之间有很小的保护间隔。图 1.2(b)展示的是小栅格网络的情况,在这种网络中,每个光路的中心波长仍然遵循在一组离散的固定频率点上,即每个光路有小的网格粒度——子波带。同时,对于大带宽的业务请求,允许光路跨越多个小栅格,形成多波带的超级信道。相较于完全无栅格情形,基于子波带的可变带宽光网络利用光网络中器件的有限带宽分辨率,大大降低了网络实现的难度。

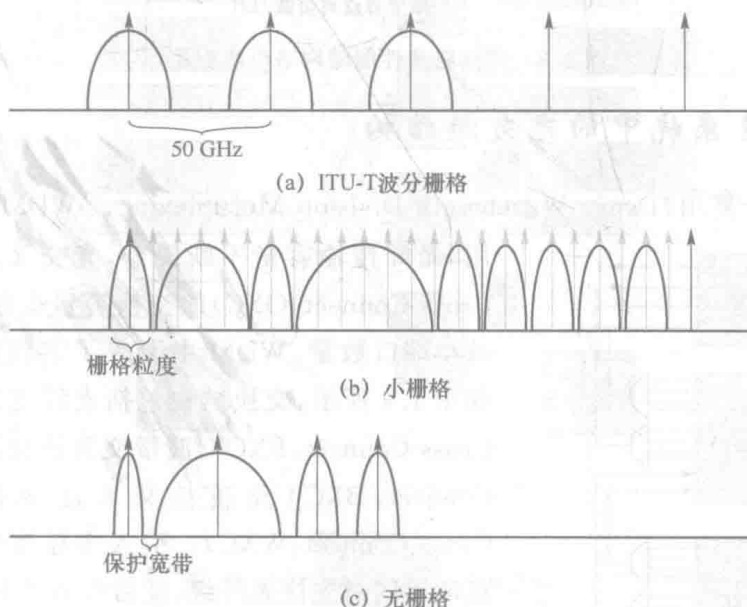


图 1.2 三种交换粒度网络

通过上面的分析,可以看出 ITU-T 波分栅格网络和无栅格网络是小栅格网络的两个特

殊情况。当小栅格网络波长间隔固定为 50 GHz 时,可认为是 ITU-T 网络;当波长间隔无限小时,可以认为是无栅格网络。下面看一下网络交换粒度对网络性能的影响。为不失一般性,采用固定最短光路路由(Fixed Shortest Lightpath Routing)和首次波长分配法(First-Fit Wavelength Assignment)进行波长和频谱分配。通过对典型的具有 14 个节点和 21 个链路的美国国家科学基金会网络(National Science Foundation Networking, NSFNET)进行模拟,图 1.3 展示了链路阻塞性能随网络负载变化的情况。可以看到,随着波长间隔或网格粒度的减小(从标准的 ITU-T 100 GHz 到小栅格 3 GHz 再到无网格),网络阻塞率逐渐降低。同时,当波长间隔减小到 3 GHz 时,小栅格网络和无栅格情况阻塞性能几乎相同,继续减小网格粒度几乎不会带来网络性能的改善。相反,无限小的网格粒度实现困难,对网络器件要求高,导致网络成本大大提高。因此,这里提出了基于子波带的可变带宽光网络。子波带占用一个小栅格的频谱宽度,每个栅格的中心波长仍然在一组离散的固定频率点上,子波带作为最小的网络粒度进行网络业务的分配,对于大容量的网络业务,分配多个频谱连续的子波带。具体交换粒度的选择需要考虑发射机速率和交换器件的限制。

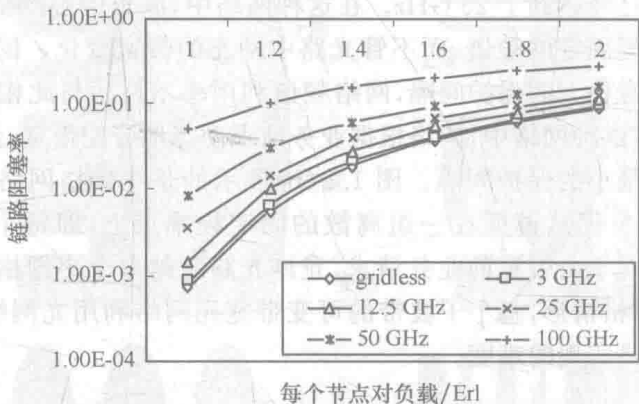


图 1.3 链路阻塞性能随网络负载变化

1.2.1 WDM 系统中的光交换结构

随着密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)技术的广泛应

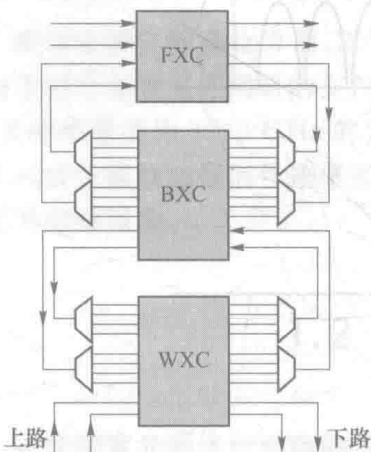


图 1.4 多粒度交换结构

用,光纤传输容量不断提升,光交叉连接器(Optical Cross-Connect, OXC)的交换容量也越来越大。为了减小端口数量,WDM 中引入了多粒度的交换结构。如图 1.4 所示,交换结构包括光纤交叉连接器(Fiber Cross-Connect, FXC)、波带交叉连接器(Band Cross-Connect, BXC)及波长交叉连接器(Wavelength Cross-Connect, WXC)。引入多粒度交换结构后,节点能够同时支持光纤级、波带级和波长级等多种带宽粒度的交换,交换节点没有必要对所有的波长进行解复用和复用,端口数量大大减少,网络控制也可以简化。同时,该交换结构具有本地节点数据上下路的功能。

能。当需要对某一个固定波长进行下路操作时,需要由光纤交换到波带进行波带的解复用,然后再交换到波长进行波长的解复用。当需要对某一路波长进行上路时候,也要经过从波长到波带再到光纤的三层结构。

1.2.2 可变带宽光网络中的光交换结构

在可变带宽网络中,引入了 BV-WSS, BV-WSS 能够对输入信号进行任意频谱的裁剪。如图 1.5 所示,任意频谱的信号进入 BV-WSS 输入端口,通过配置 BV-WSS,输出端口可以是任意形状的频谱。引入 BV-WSS 后,可变带宽 OXC 的结构大大简化。

基于 BV-WSS 的一种可变带宽光交换结构如图 1.6 所示,采用功率分束器级联 BV-WSS 的形式实现可变带宽的交换。这种交换结构具有组播功能,从各个节点来的输入信号经过分束器到各个 BV-WSS 输入端口, BV-WSS 对输入端口的信号进行选择性地输出,从而实现信号从输入端口到输出端口的交换。同时 BV-WSS 也用于本地客户端信号的上路和下路。和 WDM 系统三层交换结构相比,无须分开所有的子波带,上下路结构大大简化。

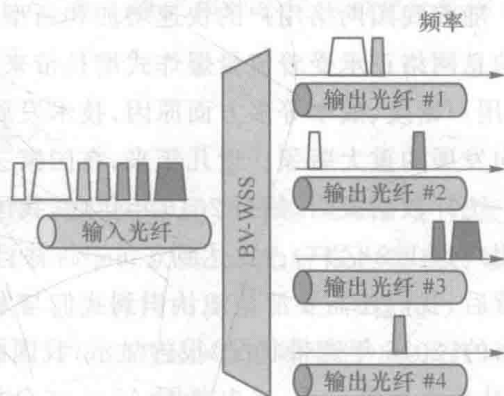


图 1.5 BV-WSS 结构

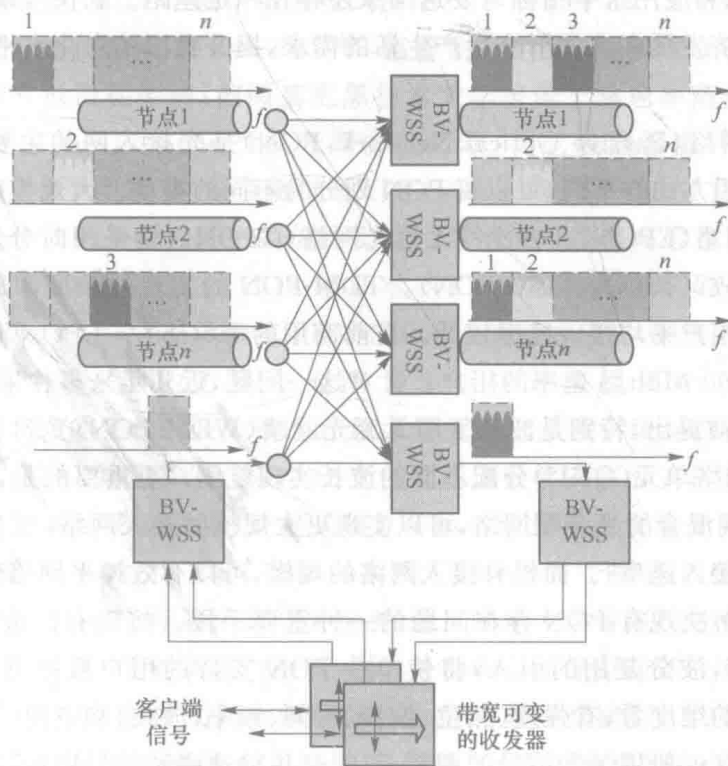


图 1.6 基于 BV-WSS 的可变带宽光交换结构

1.3 可变带宽光接入技术

1.3.1 可变带宽光接入背景

随着我国网络用户的快速增加和新型数据业务的不断涌现,以光网络为主要传送载体的信息网络正承受着流量爆炸式增长带来的巨大压力。特别是光接入网方面,由于业务需求、用户密度、成本等多方面原因,技术发展相对滞后,是制约我国网络向宽带化、全业务化方向发展的重大瓶颈。近几年来,在国家三网融合等政策指导下,光纤接入网有了快速的增长。统计数据表明,截至 2016 年年底,我国固定宽带接入用户已达 2.74 亿户,其中光纤接入用户达 1.8 亿户,占比达到了 66%,并且呈现出非常快的“光进铜退”的趋势。但喜人数据背后,我们还需要清楚地认识到我们与发达国家的差距。2016 年 9 月联合国宽带委员会发布的《2016 年宽带状况》报告显示,我国的固定宽带人口普及率仅为 18%,全球排名第 57 名;从接入速率来看,来自美国 Akamai 公司的统计数据表明,2016 年中国平均网速全球排名第 82 名;从工信部的新增宽带用户来看,2016 年新增的 1 288.8 万宽带用户中,城市宽带用户占了 84.5%,农村宽带用户净增数还不足 200 万户。以上这些数据表明,我国光接入网发展还存在多方面的不足,城乡信息通信基础设施和应用等方面的“数字鸿沟”依然存在,部分人均网络资源和应用水平指标与发达国家还存在一定差距。加快推动光接入网技术发展,对满足我国经济发展和人民群众生产生活的需求,提升我国信息化水平具有十分重大的意义。

目前无源光网络(Passive Optical Network, PON)是光接入网的主要技术方案,根据 PON 所采用的复用方式的不同,可以将 PON 划分为不同的类型。大规模商用的 PON 主要是以太网无源光网络(EPON)和吉比特无源光网络(GPON),均采用时分复用(TDM)方式接入用户端业务(故又被称为 TDM-PON)。TDM-PON 的实现复杂度和成本较低,但其支持的用户数较少,用户平均接入速率较低。目前商用的 10 Gbit/s EPON 和 GPON,一般仅支持数十个最高 100 Mbit/s 速率的用户。针对这一问题,近几年来多种采用其他复用方式的 PON 结构先后被提出,特别是波分复用无源光网络(WDM-PON)受到了广泛的关注,它通过为不同的光网络单元(ONU)分配不同的波长实现复用。更重要的是,在每个波长上级联 TDM-PON 实现混合的光分配网络,可以实现更大规模的接入网络(更多的用户,更远的传输距离,更高的接入速率)。而提升接入网络的规模,可以有效摊平网络建设成本,降低运行和维护费用,是解决现有 PON 存在问题的一种重要手段。按现有的波分复用的常规波段的波长数来估计,波分复用的引入,将使单一 PON 支持的用户数提升数十倍。另一方面,从光的可利用的维度看,有强度、相位、偏振、时间、频率(波长)和空间。这其中,强度、相位、偏振这三个维度一般用于光信号的调制,以提高传输速率和信号质量。除了现已经利用的时间和波长维度,空间维度是唯一没有被有效利用的复用方式。实际上,空分复用已开始引入高速光传输系统中,采用多芯和少模光纤传输多路信号,已被认为是有效提升光传输系

统容量的方法。由于长距离传输时,多个纤芯和多个模式之间产生光能量耦合是难以避免的,这类系统往往通过相干检测和多人多出(MIMO)数字信号处理(DSP)实现解调。但相干检测对于PON来说成本过高,而MIMO DSP也过于复杂,在PON所要求的数十千米的传输距离来说,一种可行的方式是有效降低模式和纤芯之间的串扰,使得多路信号在不同的模式和纤芯里独立传输,这样则无须改变现有强度调制直接检测方案。以现有的包层 $125\text{ }\mu\text{m}$ 的单模光纤为例,如果把它替换成7芯6模的光纤,仍可以保持包层 $125\text{ }\mu\text{m}$ 的物理尺寸不变,而接入规模可获得40倍以上的提升。因此,基于模式和纤芯复用的空分复用,也是在数量级上有效提升PON规模的有效手段。

1.3.2 基于模式复用的可变带宽光接入

目前模式和纤芯的空分复用技术的研究主要集中在高速光传输领域。空分复用(Space-Division Multiplexing, SDM)这一概念,在2008年首次提出,此后作为提高传输容量的一个有效方案受到广泛关注。国际上,日本情报通信研究机构在2012年报道了19芯光纤中总速率高达305 Tbit/s的信号传输;2013年日本KDDI R&D实验室将140.7 Tbit/s光信号在7芯光纤中传输了7 326 km,带宽距离积达到了 $1.03\text{ EMz}\cdot\text{km}$ 。在少模传输方面,墨尔本大学在2011年最早完成了4.5 km少模光纤中107 Gbit/s的2模传输实验;2013年美国NEC实验室使用具有均衡增益的少模EDFA完成了6个空间和偏振模式在500 km少模光纤中的传输;贝尔实验室在同年的ECOC上报道了12个空间和偏振模式在707 km少模光纤中的传输实验;2014年该组结合模式复用和WDM将23 Tbit/s的光信号在常规渐变折射率多模光纤中传输了17 km;2015年,南普顿大学实现了9个LP模式,15个空间模式的低模式色散和低损耗传输;德国慕尼黑技术大学报道了总速率高达41.6 Tbit/s的OFDM信号在74.17 km 12-mode少模光纤中的传输;荷兰埃因霍温科技大学利用 6×6 MIMO频域均衡完成了使用4D星座图的 6×28 GBaud 128-SP-QAM信号在41.7 km支持6个空间和偏振模式的少模光纤中的传输实验。为了进一步提高容量,同时使用纤芯和模式复用的传输方案也被提出,如2014年日本NTT实验室报道了在40 km 12-core $\times$ 6-mode的多芯少模光纤上20路多载波PDM-32QAM信号的传输,频谱效率创纪录地达到了 $247.9\text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。国内方面在天津大学李桂芳教授领导下完成了长距离($>1\text{ }000\text{ km}$)传输实验的工作以及少模光纤放大器的演示实验。该组在2014年与埃因霍芬理工大学合作在1 km少模多芯光纤的42个空间和偏振模式完成了总速率255 Tbit/s的信号传输。北京大学演示了首个两LP模式独立传输的模式复用无源光网络,经过1.8 km少模光纤传输后,模式间串扰优于 -15 dB ,并实现了国际上首个模分-时分混合无源光网络的实验演示。复旦大学2011年有仿真结果发表,北京邮电大学等高校也在展开相关研究。

在空分复用网络方面,受相关器件限制,国内外的研究还停留在器件实现或功能演示阶段。如墨尔本大学在2012年使用两个级联的自由空间薄膜滤波器,实现了支持两个正交 LP_{11} 模式的光分插复用器的原理演示;2013年美国AT&T实验室和OFS实验室演示了纤芯上下路功能;斯坦福大学利用自对准特性,即使用受反馈环路控制的分束器和移相器,实现了模式的上下路。日本中央研究实验室报道了支持多芯光纤的光交换单元,并通过实验

验证了其可满足大容量高可靠性光网络的设计要求。NEC 实验室利用空间光调制器实现了支持少模光纤的光开关,通过相位抖动技术该光开关保证了较低的模式相关损耗与串扰。此外,兼容空分复用光信号的波长选择性开关(Wavelength Selective Switch,WSS)作为空分复用光交换中的关键技术之一近年来也获得了长足发展。2013 年,贝尔实验室将单模 WSS 的单模光纤输入阵列替换为少模光纤输入阵列,初步实现了一个支持少模的 WSS。在 2014 年的 OFC 上,悉尼大学和 Finisar 公司合作提出了基于光子灯笼和多端口单模 WSS 的少模 WSS 方案。随后,该组进一步与贝尔实验室合作,借助飞秒脉冲蚀刻的 3D 波导在少模 WSS 上加入了空间分集能力。日本大阪大学提出了一种频谱和纤芯的按需分配方案,从而构建了空分复用的弹性光网络中的虚拟栅格。英国 Bristol 高性能网络组基于多芯光纤和按需配置可编程节点实现了世界上第一个多维复用光网络交换网络。国内江苏大学报道了完全基于光纤的模式分差复用器,借助多芯光纤耦合器的选择性耦合实现了宽带低串扰的上下路。

以上内容可以看出,受器件限制,模式复用光网络目前还停留在初步的原理和功能演示阶段,还没有成熟的支持空分复用的光接入等关键技术的讨论。本书从模式复用/解复用器出发,将详细地讨论基于模式复用的光接入系统。

第2章 可变带宽超级信道构建

为满足未来光网络不断增长的业务需求,光传输系统中单波长速率一直在以非常快的速度增长。商业系统中,单信道 100 Gbit/s 系统已经部署,实验室中已经实现了 10 Tbit/s、100 Tbit/s 的传输实验。国际电信联盟电信标准化组织预计将在 2015—2020 年完成 T 比特以太网标准化工作。传统的单载波的方式受限于电带宽瓶颈的限制以及高阶调制格式对 OSNR 的要求,单信道速率的提升越来越困难。因此考虑采用多载波并行处理的方法,其数据通过多个相互靠近但又彼此隔开的子载波进行传输。这些紧密排列的子载波,从相同的源到共同的目的,形成超级信道。这种方法的好处是利用成熟的低速光/电技术,采用并行处理的方法,实现超出电子设备限制的高速信道。超级信道中各个子波带在频谱上紧密地连在一起,可以达到最低限度的频谱资源浪费,获得很高的频谱效率。同时超级信道中的各个子波带相互独立,网络用户可以对其中任意的子波带进行接入而不影响其他子波带性能。超级信道具有带宽扩展能力,对于不同的业务,可以通过调整子波带数进行灵活的带宽调整,实现灵活的带宽分配。

2.1 可变带宽超级信道分类

超级信道可以基于单载波的方式,如通过采用 80 GBaud 符号率,结合偏振复用(Polarization Division Multiplexing, PDM)的 16 阶正交幅度调制(16 Quadrature Amplitude Modulation, 16-QAM)可实现超过 300 Gbit/s 的单信道速率。然而,受限于模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)和数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)等信号处理单元的电带宽瓶颈以及高阶调制格式对光信噪比(Optical Signal Noise Ratio, OSNR)的要求,单信道速率的提升越来越困难。因此,引入了多载波传输技术。多载波传输有很多的方式,如可以基于奈奎斯特 WDM(Nyquist WDM),可以基于无保护间隔的全光正交频分复用(No-Guard Interval Optical OFDM, NGI-OOFD)或者基于快速傅里叶(Fast Fourier Transformation, FFT)的正交频分复用(OFDM)技术。

在超级信道中,为实现带宽的改变需要动态地调节光载波数量或者改变信号调制格式。超级信道利用多个并行的多载波进行数据的传输,发射机需要进行大量的光载波的产生,要有高效的光载波产生方案。在接收机中,也希望能够同时对多个波带同时接收解调,也需要有高效的多载波接收方案。传统的超级信道中,利用激光器组、移频或者调制的方式产生超级信道,产生的多载波数量有限,而且只能对单个的子波带进行接收。同时,基于 OFDM 方

式的超级信道有较高的峰值平均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR), 导致在光纤传输过程中会有较高的非线性损伤。

为了获得高频谱效率, 同时降低子波带之间的干扰, 有两种方法可以用于超级信道构建。第一种方法是在频域内各个子波带互不叠加, 子波带通过汇聚形成超级信道, 接收端滤出单个子波带进行检测。典型的方法是奈奎斯特 WDM。第二种方法是在频域内各个子载波正交, 接收端通过采用匹配滤波的方法也可以完全消除子载波之间的干扰。典型的方法是 OFDM。

2.1.1 基于奈奎斯特 WDM 的超级信道技术

基于奈奎斯特 WDM 的超级信道中, 发射端首先对信号进行奈奎斯特滤波, 将信号限制在矩形频谱框中, 信道之间没有频谱交叠时, 各个子波带没有干扰, 子波带通过汇聚形成高频谱效率的超级信道。如图 2.1 所示, 奈奎斯特 WDM 信号频域波形为理想矩形, 时域波形为 sinc 函数, 信号带宽与波特率相同。在这种方式中, 为了形成奈奎斯特波形, 发射端需要在电域或者光域内进行奈奎斯特滤波, 在接收端需要进行匹配滤波。超级信道调节的最小粒度为一个奈奎斯特子波带。

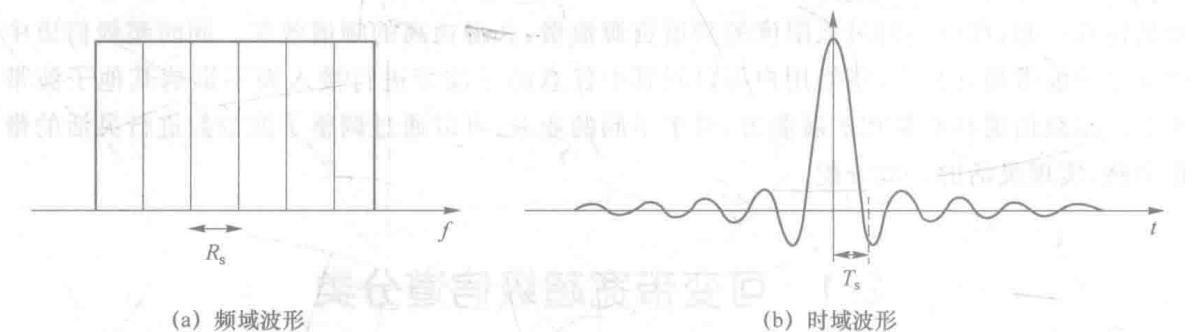


图 2.1 奈奎斯特波形

2.1.2 基于 OFDM 的超级信道技术

在基于 OFDM 的超级信道技术中, 子载波的频域上的波形是 sinc 函数, 时域上的波形是理想的矩形脉冲, 符号周期 $T_s = 1/R_s$, 如图 2.2 所示。当子载波频率间隔是信号周期倒数的整数倍时, 各个子载波正交, 接收端可以通过匹配滤波的方式对子载波进行恢复。

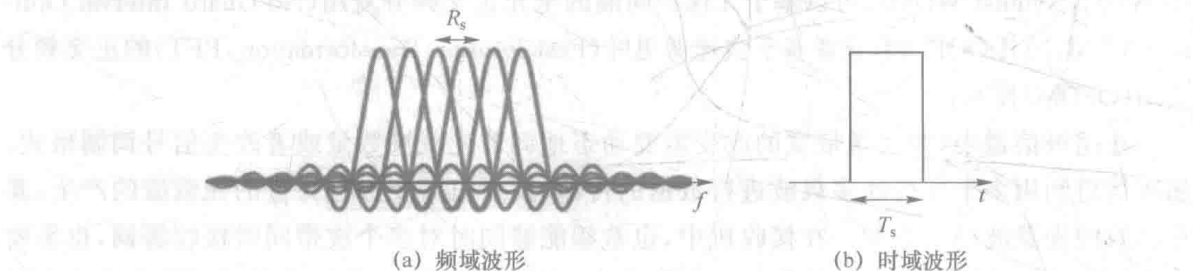


图 2.2 OFDM 波形