



光网络 下卷

组网技术分析 (原书第2版)

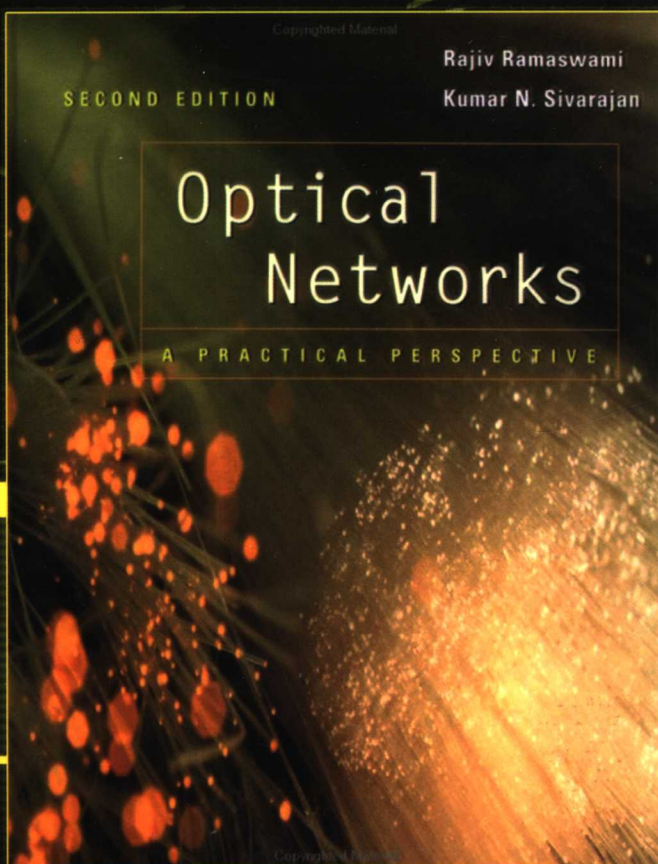
Optical Networks:

A Practical Perspective

(Second Edition)

(美) Rajiv Ramaswami 著
Kumar N. Sivarajan

乐孜纯 译



机械工业出版社
China Machine Press

电子与电气工程丛书

光网络 下卷

组网技术分析

(原书第2版)

Optical Networks:
A Practical Perspective
(Second Edition)

(美) Rajiv Ramaswami 著
Kumar N. Sivarajan

乐孜纯 译



机械工业出版社
China Machine Press

本书英文版原书是关于光通信网络技术方面的权威著作,详细地描述了网络中的单元以及传输技术,并且强调了网络评估、配备以及光学方案等一些实际的组网问题。中文版分成《光网络》(上卷:光纤通信技术与系统)和《光网络》(下卷:组网技术分析)。上卷主要讲述光网络元器件和传输技术,下卷主要介绍光网络的构造、控制和管理技术。本书不仅适合作为相关专业的教材,对专业人员 also 具有很高的参考价值。

Rajiv Ramaswami & Kumar N. Sivarajan: Optical Networks: a Practical Perspective, Second Edition (ISBN 1-55860-655-6).

Copyright © 2002 by Morgan Kaufmann Publishers.

Translation Copyright © 2004 by China Machine Press.

All rights reserved.

本书中文简体字版由美国Morgan Kaufmann公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有,侵权必究。

本书版权登记号: 图字: 01-2003-2626

图书在版编目(CIP)数据

光网络·下卷,组网技术分析(原书第2版)/(美)拉马斯瓦米(Ramaswami, R.), (美)斯瓦拉扬(Sivarajan, K. N.)著;乐孜纯译.-北京:机械工业出版社,2004.9
(电子与电气工程丛书)

书名原文: Optical Networks: a Practical Perspective, Second Edition

ISBN 7-111-14566-6

I. 光… II. ①拉… ②斯… ③乐… III. 光纤通信-通信网 IV. TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第051738号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑: 蒋 玮

北京瑞德印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004年9月第1版第1次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 23印张

印数: 0 001 - 4 000册

定价: 45.00元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010) 68326294

前言

自1998年2月本书第1版面世以来,我们已经注意到光网络令人瞩目的发展。对光网络的研究曾经一度只局限于研究人员和工程师这样一个很小的范围,现在光网络引起了包括学生、光学元器件工程师和光学设备工程师、服务提供商网络设计者、投资者、风险投资者以及产业与投资分析师在内的众多人员的兴趣。

在过去的三年里,随着光网络技术的迅速发展和广泛的应用,对本书第2版的需求也显现了出来。在第2版中,我们尽量将光网络最新进展及其底层技术编写在内,同时我们也努力使有兴趣学习光网络的广大读者感到此书通俗易懂。基于这样的想法,我们将此书中的几章进行了重新编写,加入了大量的新素材,删除了一些与实际的光网络不太相关的内容,同时对参考文献进行了更新,并加进了一些新的习题。

本书的主要变化如下:为了反映业界当前对光网络的理解和认识,对第1章进行了重新编写。在光网络概述中添加了“传输系统的基本概念”一节,在此节中介绍了与光网络系统工程和波分复用(WDM)相关的一些基本术语和概念,目的是使初学者容易入门。

在第2章中,我们添加了几小节,介绍了色散控制和光孤子方面的内容,还加入了一节来描述目前已有的光纤种类。在第3章中,我们将电吸收调制激光器、调谐激光器、喇曼放大器和L波段掺铒光纤放大器的内容包括了进来。也大大扩充了关于光开关的章节,包括了利用机电系统(MEMS)和其他技术的新类型的开关。

在第4章中,包括了归零调制和其他一些广泛用于高比特率系统的新的调制技术,如双二元调制、前向纠错等。第5章扩充了色散补偿和极化效应方面的内容,这些都是影响高比特率长距离传输系统设计的重要因素。

对本书中涉及网络系统的章节进行了彻底的改写和补充,以便更清楚地反映本领域所取得的重大进展。这些章节的安排如下:第6章^①现在包括同步光网络/同步数字体系(SONET/SDH),异步传输模式(ATM)和网际协议(IP);第7章专门介绍基于波分复用(WDM)网络单元的网络结构特征;第8章集中描述了一些与光网络的设计和路由相关的问题;第9章详细描述了网络的管理和控制;第10章介绍了网络的生存性,详细讨论了光学层的保护问题;第11章中涵盖了接入网的内容,重点介绍新兴的无源光网络(PON);第12章介绍了光学包交换网络的最新进展;最后,在第13章中重点介绍了光网络的应用依据,并试图使读者能更广泛地理解电信网络的发展过程,在这一章中包括一些典型的长距离和城域网络规划实例研究。

当前在光网络领域中有很多的标准,我们在附录中列出了这些相关的标准。在附录中,我们还列出了本书中采用的一些英文缩写术语,并将关于脉冲传播的一些较深层的内容放在附录中介绍。

我们在添加新素材的同时,也删除了第1版中的一些章节,删除了广播和分配网,因为这些网络当前主要侧重在理论研究方面;同样,我们也删掉了描述光网络测试台的章节,因为

① 前言中第1至5章对应上卷的1至5章,第6章对应下卷第1章,依次类推。——编辑注

现在已经没有讨论它们的必要了。有兴趣的读者可以在网站www.mkp.com/opticalnet2 上得到这些章节的内容。

怎样使用本书

本书可以作为电子工程或计算机科学专业的研究生教材，本书中的大部分内容都包含在我们所教过的课程之中。第2章到第5章包括了光网络元器件和传输技术方面的知识，第6章到第13章则介绍关于网络方面的内容。为了理解网络方面的知识，要求学生具备通信方面大学本科水平的基本知识。我们尝试在本书中加入了一些与传输相关的章节，以使其更易于为网络工程方面专业人士所接受和利用。例如，首先从网络设计者的角度对元器件进行了简单定性的论述，然后再详细解释它们的运行原理。半导体和电磁学方面的先期知识将有助于理解某些章节的详细深入的论述部分。

期望更广泛地了解光网络主要内容的读者可以阅读第1、第6、第7和第13章；对底层元件和传输技术感兴趣的读者可以跳过那些定量描述的章节，而只详细阅读第1至第5章内容。

这本书可以作为电子工程或计算机科学专业的研究生课程的基本教材。与网络有关的课程侧重网络的构造、控制和管理，因此在使用本书时可以略去技术部分的章节，只讲授本书的第6至第13章。对于电子工程等与光学传输有关的课程，在使用本书时可以只讲授第2至第5章而略去其他章节。每章后面附有一定数量的习题，习题的参考答案可向英文版原出版社 (mkp@mkp.com) 索取。

致谢

首先，我们要感谢的是评阅本书的那些出色的专家，他们仔细地阅读了本书的所有章节，对本书素材的选择和组织提出了很多建议，他们对本书的最终成稿所起到的作用是非常宝贵的。应该说我们对此感到非常荣幸，在此我们要特别感谢Paul Green, Goff Hill, David Huuter, Rao Lingampalli, Alan McGuire, Shawn O'Donnell, Walter Johnstone, Alan Repech, George Stewart, Suresh Subramainiam, Eric Verillo, Martin Zirngibl。此外，我们非常感谢Bijan Raahemi, Jim Refi, Krishna Thyagarajan, Mark R. Wilson, 他们指出了本书第1版中的一些错误，也对本书第2版提出了一些建议。Mark R. Wilson还为我们提供了他在讲课中使用的一些面向应用的习题，这些习题已经被收录到本书的第2版中。我们还要感谢Amit Agarwal, Shyam Iyer, Ashutosh Kulshreshtha 和Sarath Kumar，我们使用了他们的网路分布设计工具，Ashutosh Kulshreshtha还提供了网路分布设计实例。感谢Tapan Kumar 提供了光学通道拓扑结构设计实例，Parthasarathi Palai提供了掺铒光纤放大器（EDFA）增益曲线的模拟计算图，Rajeev Roy对我们的一些结果进行了验证。本书作者将对此书中任何错误和疏漏负责，感谢您的批评指正，请将您的意见和建议用电子邮件发送至mkp@mkp.com。

目 录

前言

第1章 光学层的用户层	1
1.1 SONET/SDH	1
1.1.1 复用	3
1.1.2 SONET/SDH层	5
1.1.3 SONET帧结构	6
1.1.4 SONET/SDH物理层	9
1.1.5 SONET/SDH结构中的单元	11
1.2 ATM	13
1.2.1 ATM的功能	14
1.2.2 适配层	16
1.2.3 服务质量	17
1.2.4 (数据)流量控制	18
1.2.5 信令和路由选择	18
1.3 IP	18
1.3.1 路由选择和转发	19
1.3.2 服务质量	21
1.3.3 多协议标记交换(MPLS)	21
1.3.4 ATM将何去何从	22
1.4 存储区域网络	23
1.4.1 ESCON	24
1.4.2 光纤信道	24
1.4.3 HIPPI	25
1.5 千兆位和10千兆位以太网	25
小结	25
辅助阅读材料	26
习题	26
参考文献	27
第2章 波分复用网络单元	29
2.1 光线路终端	30
2.2 光学线路放大器	32
2.3 光分插复用器	32
2.3.1 光分插复用器(OADM)的结构	34

2.3.2 可重配置OADM	38
2.4 光交叉互联器	40
小结	47
辅助阅读材料	48
习题	48
参考文献	50
第3章 波分复用网络设计	53
3.1 费用均衡: 一个详细的环状网络的例子	56
3.2 光学通道拓扑设计(LTD)和选路与波长分配(RWA)问题	61
3.2.1 光学通道拓扑设计	61
3.2.2 路由选择和波长分配	65
3.2.3 波长转换	67
3.2.4 与图形着色的关系	70
3.3 波长路由选择网络的尺度	71
3.4 统计的定尺度模型	72
3.4.1 第一通道模型	73
3.4.2 阻塞模型	73
3.5 最大负载定尺度模型	79
3.5.1 离线光学通道请求	80
3.5.2 环状网络的在线RWA问题	83
小结	85
辅助阅读材料	85
习题	86
参考文献	89
第4章 网络控制与管理	93
4.1 网络管理功能	93
4.1.1 管理框架	94
4.1.2 信息模型	95
4.1.3 管理协议	96
4.2 光学层的服务和接口	97
4.3 光学层中的子层	98
4.4 多个供应商之间的互操作性	99

4.5 性能和错误管理	101	小结	154
4.5.1 透明性的影响	101	辅助阅读材料	154
4.5.2 误码率测量	102	习题	154
4.5.3 光学追迹	102	参考文献	156
4.5.4 报警管理	102	第6章 接入网	159
4.5.5 数据通信网络(DCN)和信号发送	104	6.1 网络结构概述	160
4.5.6 控制	105	6.2 增强的HFC	163
4.5.7 光学层总括信息	105	6.3 光纤到路边(FTTC)	164
4.6 配置管理	109	小结	172
4.6.1 设备管理	109	辅助阅读材料	173
4.6.2 连接管理	110	习题	173
4.6.3 适应性管理	112	参考文献	174
4.7 光学安全	114	第7章 光子包交换	177
小结	116	7.1 光时分复用	180
辅助阅读材料	117	7.1.1 位交错	180
习题	117	7.1.2 包交错	182
参考文献	119	7.1.3 光学与门	184
第5章 网络的生存性	121	7.2 同步	187
5.1 基本概念	122	7.2.1 可调谐延时	188
5.2 在SONET/SDH中的保护	124	7.2.2 光学锁相环路	189
5.2.1 点到点链路	126	7.3 头处理	190
5.2.2 自愈环	127	7.4 缓冲	191
5.2.3 单向通路交换环	130	7.4.1 输出缓冲	192
5.2.4 双向线路交换环	130	7.4.2 输入缓冲	193
5.2.5 环状互联和双归宿	135	7.4.3 再循环缓冲	193
5.3 IP网络中的保护	136	7.4.4 使用波长来解决冲突	194
5.4 使用光学层保护的原因	137	7.4.5 偏向路由选择	198
5.5 光学层的保护设计	143	7.5 突发交换	201
5.5.1 1+1的OMS保护	145	7.6 测试台	201
5.5.2 1:1的OMS保护	145	7.6.1 光学包交换的要点(KEOPS)	202
5.5.3 OMS-DPRing	145	7.6.2 NTT的光学ATM开关	203
5.5.4 OMS-SPRing	146	7.6.3 英国电信实验室测试台	204
5.5.5 1:N转发器保护	148	7.6.4 普林斯顿大学测试台	204
5.5.6 1+1光学信道(OCh)专有保护	148	7.6.5 全光网络(AON)	204
5.5.7 OCh-SPRing	149	7.6.6 用延时线解决冲突(CORD)	205
5.5.8 光学信道网状保护	149	小结	206
5.5.9 保护技术的选择	153	辅助阅读材料	206
5.6 层之间的交互工作	153	习题	207
		参考文献	208

第8章 网络应用方面的考虑	213	小结	240
8.1 电信网络的演化发展	213	辅助阅读材料	241
8.1.1 SONET/SDH核心网络	214	习题	241
8.1.2 下一代传输网络的结构选择	217	参考文献	244
8.2 传输层的设计	223	附录A 首字母缩略语	245
8.2.1 使用空分复用 (SDM) 技术	224	附录B 符号和参数	251
8.2.2 使用时分复用 (TDM) 技术	224	附录C 标准	255
8.2.3 使用波分复用 (WDM) 技术	225	附录D 波动方程	259
8.2.4 单向与双向WDM系统	226	附录E 在光纤中的脉冲传播	261
8.2.5 长距离网络	228	附录F 非线性极化	269
8.2.6 长距离网络个案研究	229	附录G 多层薄膜滤波器	271
8.2.7 长距离海底网络	234	附录H 随机变量和过程	277
8.2.8 城域网络	236	附录I 接收机的噪声统计	283
8.2.9 城域环的个案研究	237	参考书目	289
8.2.10 从不透明的链路到灵活的全光 网络	239	索引	317

第1章 光学层的用户层

这一章将介绍几种以使用光纤为基本传播机制的网络。这些网络可以被看作是光学层的用户层。光学层为这些用户层提供光学通道。对于用户层而言,光学通道与用户层网络单元之间的物理链路非常相似。而所有这些我们将要探讨的用户层,都在电域中处理数据,并实现诸如固定的时分复用或者统计的时分复用(包交换)功能。这些用户层将各种低速的声音信息、数据信息和专线业务信息聚集并传入网络。每一个用户层网络都具有基于其自身的优越性,它们可以利用光学层为其提供的那些光学通道,工作在点到点的光纤链路,或是基于更为复杂的光学层结构工作。

当今骨干网中占优势的用户层有同步光网络/同步数字体系(SONET/SDH)、网际协议(IP)以及异步传输模式(ATM)。SONET/SDH特别适用于处理低速的时分复用信息流,而IP和ATM则特别适用于处理统计复用的包信息流。在许多情况下,IP和ATM将SONET/SDH作为其基本的传输机制。随着在IP和ATM设备出现了高速接口,我们也将看到IP和ATM直接位于光学层上,而不需要单独的SONET/SDH设备。在城域网中,快速涌现出了几种类型的用户层,如千兆位以太网、企业串行连接(ESCON)以及光纤信道。而后面提到的许多网络,都被用于互联计算机或者与其周围所谓的存储区域网络(SAN)相连。

在这一章中,我们要描述各种这样的网络,主要是定性地了解它们。当然也介绍了那些对于阐述光学层非常重要的特性。例如,我们比较详细地描述了SONET/SDH网络,包括SONET网络的子层、帧结构和各种附加字节。在第4章和第5章中,我们将看到光学层的很多功能与SONET层的那些功能很相似。特别地,SONET/SDH网络中的控制、管理以及生存性是这些功能如何在光学层中执行的基础。相似地,在涉及IP网络的内容中,我们讨论了IP路由和信号协议。而用这些协议控制光学层,在业界有很大的吸引力。

361
363

1.1 SONET/SDH

在北美,同步光网络(SONET)被用来作为运营商网络的底层结构,是当前对于高速信号进行传输和复用的标准网络结构。而与之非常相似的另一种标准网络结构,同步数字体系(SDH),则被欧洲和日本所采用,并被用于大多数的海底系统中。

为了理解那些决定和影响SONET和SDH网络的评估和标准化的因素,我们需要回顾其发展历程,并设法理解在公共网中是如何进行信号复用的。在SONET和SDH网络出现之前,构建的网络底层结构基于准同步数字体系(plesiochronous digital hierarchy, PDH),该体系的使用应追溯到上个世纪60年代中期(在北美,PDH通常被表述为异步数字体系(asynchronous digital hierarchy, ADH))。那时人们主要致力于复用数字音频电路。一个带宽为4 kHz的模拟音频电路可以在8 kHz处采样,并且每个采样点用8比特来量化。这就产生了一个比特率为64kb/s的数字音频电路。这在当时是一种被广泛采用的标准。而高速信息流则被定义为多个这样的64kb/s的基本信息流的组合。对于这些高速的信息流,在世界上不同的地方拥有其不同的标准,如表1-1所示。在北美,该64kb/s的信号被称为DS0(即0级数字信号),类似地,1.544Mb/s的

信号被称为DS1, 44.736Mb/s的信号被称为DS3, 等等。而在欧洲, 该体系则被标记为E0、E1、E2和E3等, 其中E0的比特速率与DS0相同。这些比特速率标准被广泛用于运营商的网络中, 并且被作为专线服务由运营商向其客户出租。通常此类网络承载的是声音信息, 而不是数据信息。

表1-1 异步和准同步信号的传输速率, 取自文献[SS99]

级 别	北 美	欧 洲	日 本
0	0.064Mb/s	0.064Mb/s	0.064Mb/s
1	1.544Mb/s	2.048Mb/s	1.544Mb/s
2	6.312Mb/s	8.448Mb/s	6.312Mb/s
3	44.736Mb/s	34.368Mb/s	32.064Mb/s
4	139.264Mb/s	139.264Mb/s	97.728Mb/s

20世纪80年代后期, 限制准同步数字体系 (PDH) 的几个问题, 使得运营商和 (设备) 供应商共同来寻找新的传输和复用标准, 进而导致了SONET/SDH标准的出现。它解决了许多与PDH相关的问题。在下文中我们给出了与PDH相比, SONET/SDH所具有的优势:

1. 复用简化: 在异步复用中, 每一个终端有其各自的时钟, 同时我们为信号标定了一个名义上的同步脉冲重复频率 (时钟速率), 该时钟速率可能与其他时钟实际钟速相去甚远。例如, 在一个DS3信号中, 不同时钟之间的时钟速率的20ppm (ppm即每百万分之一) 的变化 (这样的情况比较常见), 将引起两个信号之间的1.8kb/s的比特率差别。因此, 当低速信息流通过交错其比特率被复用后, 附加的比特率可能需要被填充进复用的信息流中, 以计算不同信息流的钟速之间的差异。结果在异步体系中, 比特率并不是基本的64kb/s比特率的整数倍, 而是略高于填充的比特。例如, 一个DS1信号被设计承载24个64kb/s的信号, 但是它的比特率 (1.544Mb/s) 则略高于 $24 \times 64\text{kb/s}$ 。

对于异步复用, 如果不将高速信息流完全解复用到其各个单元信息流, 要从一个高速信息流 (比如说一个DS3信息流) 中取出一个低速信息流 (比如64kb/s的信息流) 是非常困难的。这就导致了每一次提取出一个低速信息流时, 就要使用所谓的“复用器山”, 即需要堆叠多个复用器, 如图1-1所示。由于使用了大量的电子学器件, 这将是相当昂贵的, 而且还会降低网络的可靠性。

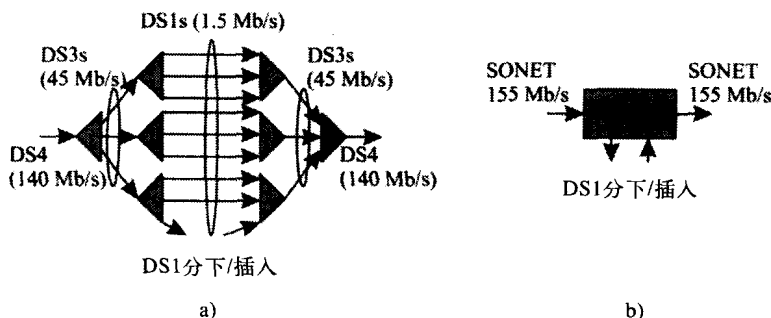


图1-1 异步和同步复用的比较

- a) 在异步情况下, 必须堆叠多个解复用器, 以便从一个复用的信息流中提取一个低速信息流
- b) 在同步情况下, 通过使用相当简单的电路, 可以在一个步骤之内实现相同的功能

SONET/SDH的同步复用结构大幅度地降低了复用和解复用的费用。网络中的所有时钟都与一个信号的主时钟精确同步。这样，在SONET/SDH网络中定义的比特率是基本比特率的整数倍，因此将多个信息流复用在一起时，不需要比特填充。结果，从一个复用的SONET/SDH信息流中提取一个低速的信息流只需要一个步骤，即在复用的信号中找到相应比特的合适位置。这使得设计SONET复用器和解复用器，比设计异步体系中的复用/解复用器要容易得多。

1.1.1节中将深入讨论。

2. **管理**：SONET和SDH标准包含了广泛的管理网络的管理信息，包括广泛的性能监控、连接和信息类型的识别、识别和报告失效，以及在各个节点之间传输管理信息的数据通信信道。而上述的大部分功能在PDH标准中都没有。

3. **互操作性**：虽然PDH定义了复用方法，但是它并没有为传输链路定义标准的格式。这样，不同的供应商使用不同类型的线路码型、光学接口等来优化它们的产品。这就使得通过传输链路连接一个供应商的设备与另一个供应商的设备变得非常困难。SONET和SDH靠着定义标准的光学接口来避免这种情况的发生，这样的标准光学接口实现了不同供应商的设备之间的链路连接。但是，SONET和SDH的某些方面是最近才被标准化的，比如上面提到的数据通信信道。结果，截至目前，互连不同供应商的SONET设备仍是一个大问题。

4. **网络有效性**：SONET和SDH标准已经补充进特殊的网络拓扑、特殊的保护技术以及提供高有效性服务的相应协议。这样，SONET和SDH失效后所需要的服务修复时间要短得多，少于60毫秒。相比较而言，PDH的典型的修复时间则需要几秒到几分钟。

364
366

1.1.1 复用

SONET和SDH运用了复杂的复用方法，然而该方法可以通过今天的大规模集成（VLSI）电路很容易地实现。虽然SONET和SDH本质上很相似，但在SONET和SDH中采用的术语是不相同的。在接下去的文字中，我们将采用SONET中的用语，并在适当的地方介绍SDH中的用语。

对于SONET系统，基本的信号比特率是51.84Mb/s，被称为同步传送信号（synchronous transport signal, STS）等级1（STS-1）。更高速率的信号（STS- N ）是通过交错 N 个帧定位的同步传送信号等级1（STS-1）中的字来实现的。因为每个单个信号的时钟是同步的，所以不需要比特填充。基于同样的原因，一个更低速率的信息流可以非常方便地从一个复用的信息流中提取出来，而不需要对整个信号进行解复用。

目前对于SONET和SDH的比特率的定义如表1-2所示。应该注意的是，一个STS信号是一个电信号，在很多情况下（特别是在速率更高的情况下），它仅存在于SONET设备的内部。而与其他设备的接口则通常是光学的，其本质上是一个STS信号的光学形式的扰频信号。扰频被用来在数据流中防止长连的0或者长连的1。每一个SONET发射机在将信号发射入光纤之前，对信号进行扰频，接下来SONET接收机则对该信号进行解扰频。相应于STS-3的光学接口被称为OC-3（即光学载波等级3），已经定义了类似的光学接口有OC-12、OC-48、OC-192和OC-768，分别相应于STS-12、STS-48、STS-192和STS-768等级的信号。

对于SDH系统，基本的比特率为155Mb/s，被称为同步传送模块1（synchronous transport module-1, STM-1）。注意它比基本的SONET比特率更高，SONET比特率被选择与通常使用的异步信号，即DS1和DS3信号，相匹配。而SDH比特率则被选择与通常使用的PDH信号，即E1、E3和E4信号，相匹配。更高比特率的信号的定义类似于SONET，如表1-2所示。

表1-2 SONET/SDH的传输速率, 取自文献[SS99]

SONET信号	SDH信号	比特率 (Mb/s)
STS-1		51.84
STS-3	STM-1	155.52
STS-12	STM-4	622.08
STS-24		1244.16
STS-48	STM-16	2488.32
STS-192	STM-64	9953.28
STS-768	STM-256	39 814.32

一个SONET帧包含了一些被称为传送负载的总括信息字节以及有效负载字节。有效负载数据由所谓的同步有效载荷包络 (SPE) 承载, SPE包括了一组额外的通道附加字节。该通道附加字节在源节点处被插入, 一直保留在数据中, 直到数据到达它的目的节点处。例如, 其中的一个字节是路径追迹字节, 它可以识别SPE, 并被用来确保网络的连接。在1.1.3节中, 我们将深入探讨帧结构。

SONET和SDH广泛地使用了指针功能, 以便在一个帧中标明复用的有效负载数据的位置。在一个帧中, SPE并没有一个固定的起点。它的起点是由一个位于连线负载之中的指针来指明。尽管SONET中的时钟全部由一个信号源中提取, 但不同信号之间, 在频率上仍然有可能会有小的瞬时变化。输入信号与用以生成输出信号的本地时钟之间的差别, 将转换成两个信号之间的累积的相位差别。通过让有效负载在一个帧中向前或向后漂移, 并且通过修改相应的指针来标明这种漂移, 可以很容易地解决这个问题。这样避免了需要比特填充或者需要附加的缓冲, 但还需要大量的指针处理过程, 当然对于今天的集成电路而言, 实现起来是很容易的。

低于STS-1比特率的更低速的非SONET信息流被转换成虚拟支路 (virtual tributary, VT)。每一个虚拟支路被设计成拥有充足的带宽来承载它的有效载荷。在SONET中, 虚拟支路被定义为四种尺寸: VT1.5、VT2、VT3和VT6。这些虚拟支路被设计用来承载1.5Mb/s、2Mb/s、3Mb/s和6Mb/s的异步/准同步信息流, 如图1-2所示。在这些虚拟支路中, VT1.5信号是最常用的, 它承载通用的DS1准同步信号。在该体系的下一个等级, 虚拟支路群包括了4个VT1.5, 或者3个VT2, 或者2个VT3, 或者1个单个的VT6。7个这样的VT群与一组通道附加相交错建立起一个基本的SONET同步有效载荷包络 (SPE) 的字节。仅当SPE浮于一个SONET帧中时, VT有效载荷 (称为VT SPE) 也能浮于STS-1 SPE中, 一个VT指针被用于指向该VT SPE。该指针被置于每一个VT群中的两个标志字节。图1-3给出了该指针结构。

在很多情况下, 必须把更高速率的非SONET信号转换成SPE, 以便在SONET网络中传送。当今最通常的例子可能就是来自IP路由器或者ATM开关的高速包信息流了。基于这样的目的, 一个具有封闭有效载荷的STS-Nc信号也在这个标准中给出了定义, 其中c代表串联。串联的或者封闭的有效载荷意味着该信号不能被解复用成低速信息流。例如, 一个150Mb/s的ATM信号被转换成一个STS-3c信号。在该标准中, 已经对各种信号定义了其变换, 包括IP、ATM以及光纤分布式数据接口 (FDDI)。

SDH采用的基本原理与SONET相同, 但对于亚STM-1信号, 在术语和复用结构上有所不同。类似于SONET虚拟支路, SDH使用虚容器 (VC) 来适配低速非SDH信号。虚容器定义有5个尺寸: VC-11、VC-12、VC-2、VC-3和VC-4。这些虚容器被设计用来分别承载1.5Mb/s (DS1)、2Mb/s (E1)、6Mb/s (E2)、45Mb/s (E3和DS3) 以及140Mb/s (E4) 的异步/准同步

信息流。然而，在这里定义了一个两级体系，其中VC-11s、VC-12s和VC-2s能够被复用进VC-3s或者VC-4s，VC-3s和VC-4s然后被复用进一个STM-1信号。

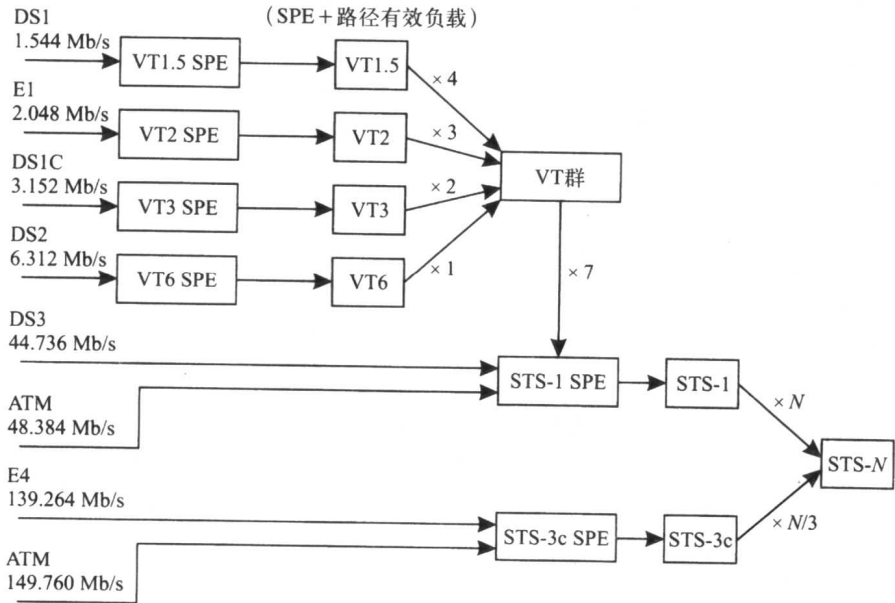


图1-2 在SONET中，将低速异步信息流变换到虚拟支路

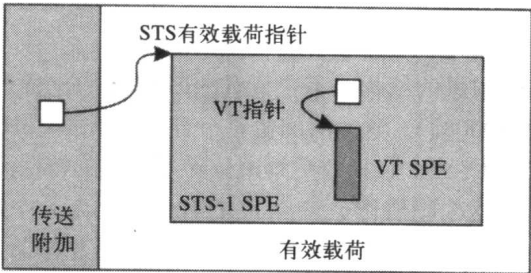


图1-3 在一个承载虚拟支路 (VT) 的SONET STS-1信号中指针的应用。
在传送附加中的STS有效载荷指针指向STS-1同步有效载荷包络 (SPE)，而在STS-1 SPE中的VT指针指向VT SPE

1.1.2 SONET/SDH层

SONET层包括四个子层，分别是通道层、线路层、节段层和物理层。图1-4给出了上面三个层的示意图。除物理层之外的每一层都包含一组相关的附加字节，无论何时一个层被建立或取消，或者在一个网络单元中，一个层被终止，这些附加字节都将被加上。在下一节讨论帧结构和与每一层相关的附加信息时，将会理清这些层的功能。

SONET（以及SDH）中的通道层主要完成节点之间的端到端的连接，并且仅终止于SONET连接的端部。中间的节点有可能完成对通道层信号的监控功能，但是通道附加信息本身是在源节点处插入，而在目的节点处终止。

每一个连接都跨越了一组链路和网络中的多个中间节点。线路层（即在SDH中的复用节

段层)在两个节点之间将多个通道层连接复用进一条单个的链路。这样,该线路层在每一个中间的线路终端复用器(TM),或者是沿着一个SONET连接的路由的分插复用器(ADM)处终止。该线路层也完成一定类型的保护切换的功能,并且在线路失效的情况下恢复网络的服务。

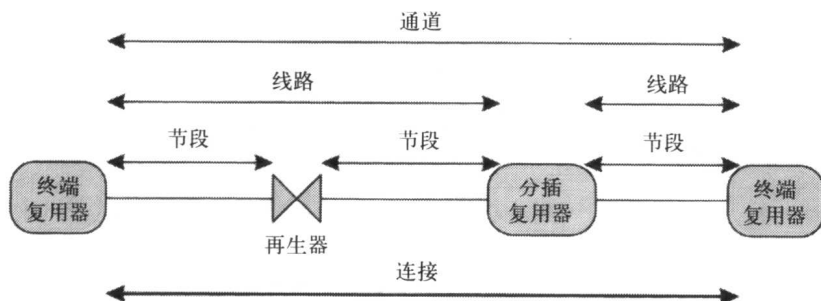


图1-4 以通过终端复用器(TM)和分插复用器(ADM)的一个连接为例,给出了在SONET/SDH层中通道层、线路层和节段层被终止的图示。图中并未画出物理层

每一条链路包括了多个阶段,相应于再生器之间的链路段。节段层(即SDH中的再生器节段层)在网络中的每一个再生器处终止。

最后,物理层完成实际的比特信息在光纤中的传输。

1.1.3 SONET帧结构

图1-5中给出了一个STS-1帧的结构。不考虑SONET信号的比特率,一个帧的持续时间为 $125\mu\text{s}$ (相应于速率为每秒8000帧)。这一时间由一个音频电路的8 kHz的采样速率来设定。这个帧是一个特别的810字节的序列,包括分配给进位附加信息的特殊的字节,以及承载有效负载的其他字节。我们可以将这个帧看作是包含了9行和90列,每一个单元占8比特字节。这个字节被从左到右逐行传输,每一个字节中的最重要的比特被优先传输。

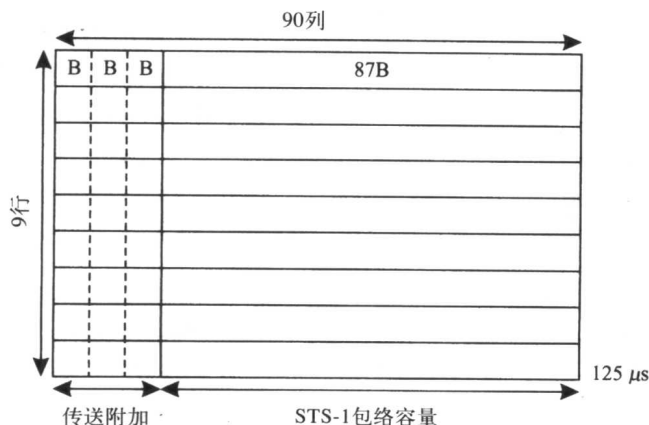


图1-5 一个STS-1帧的结构, B代表一个8比特的字节

前三列被保留,作为节段和线路的附加字节。这些保留的字节承载同步传送信号等级1的

同步有效负载包络 (STS-1 SPE)。STS-1 SPE本身包括了一列附加字节，该列附加字节承载通道附加信息。

一个STS- N 帧通过交错 N 个STS-1帧的字节来获得，如图1-6所示。传送附加被置于前 $3N$ 列，而其余的 $87N$ 列则包含着有效负载。在交错之前需要对传送附加进行帧排列。然而，由于每一个STS-1有一个相应的有效负载指针来标明其SPE的位置，有效负载并不需事先进行帧排列。除了在SONET层中有效负载不能被分解为低速的信号之外，一个STS- N c帧与STS- N 帧很相似。相同的 $87N$ 列包含了有效负载信息，STS有效负载指针的一个特定值被用来标明有效负载是级连的。

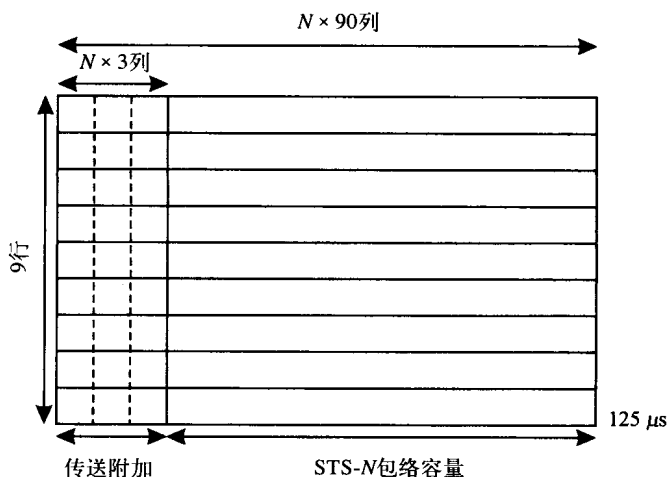


图1-6 一个通过交错 N 个STS-1帧的字节而获得的STS- N 帧结构

图1-7给出了在一个STS-1帧或者一个STS- N c帧中的附加字节。在一个STS- N 帧中，有 N 组

			通道附加
节段附加	成帧 A1	成帧 A2	追迹/生长 J0/Z0
	位交错奇偶检验 8位码B1/未定义	联络线 E1/未定义	用户 F1/未定义
	数据通信 D1/未定义	数据通信 D2/未定义	数据通信 D3/未定义
	指针 H1	指针 H2	指针 H3
	位交错奇偶检验 8位码B2	数据通信 D5/未定义	数据通信 D6/未定义
	数据通信 D4/未定义	自动保护切换 K1/未定义	自动保护切换 K2/未定义
	数据通信 D7/未定义	数据通信 D8/未定义	数据通信 D9/未定义
	数据通信 D10/未定义	数据通信 D11/未定义	数据通信 D12/未定义
线路附加	同步状态/增长 S1/Z1	远程误码指示-L/ 增长M0或M1/Z2	联络线 E2/未定义
			追迹 J1
			位交错奇偶检验 8位码B3
			信号标记 C2
			通道状态 G1
			用户信道 F2
			标识 H4
			增长 Z3
			增长 Z4
			串行连接 Z5

图1-7 SONET的附加字节。X/Y的入口格式表示：第一个标记X用于一个STS- N 信号的第一个STS-1；第二个标记Y用于STS- N 信号的其余的STS-1

附加字节，每一组对应着一个STS-1。而每一个STS-1有它自己的一组节段和线路附加信息。另一方面，一个STS-Nc仅有单个一组附加字节，这是因为它的有效负载在SONET网络中传输时，从其源节点到其目标节点必须保持原封不动。

我们在这里探讨附加字节，是因为它们提供了一些关键的管理功能，这些管理功能使得SONET网络对于网络运行者来说非常有吸引力。在下面的讨论中，可以看到字节的实际位置和格式并不像理解其所完成的功能那样重要。对于其所完成的功能，将在第4章介绍光学层时给出更深入的讨论。节段和线路附加信息对于光学层来说特别重要，其中有一些字节受光学层中的设备监控。此外，一些附加字节目前并没有定义，这些字节被考虑用来承载光学层的附加信息。在第4章中我们将对这方面的内容做进一步的讨论。而对于附加字节的更为详细的介绍，请参阅参考文献[TeI99]。

节段附加信息

成帧 (A1/A2)。这两个字节被用于描述帧，并被用来在一个STS-N中为每一个STS-1设定预定值。网络单元使用这些字节来确定一个新的帧的开始。

节段迹迹 (J0) / 节段增长 (Z0)。这个J0字节存在于一个STS-N的第一个STS-1中，并被用于承载一个识别符，该识别符可以被监控，并用以确保网络中相邻节段终止节点之间的连接。而Z0字节则存在于其余的STS-1中，它的作用还未被确定。

节段位交错奇偶检验8位码 (B1)。这个字节被置于一个STS-N的第一个STS-1中，并被用来监控每一个节段的误码率。而位于一个STS-N的其余帧中的字节目前还没有定义。发射机计算一个在扰频之后涵盖了所有先前的STS-N帧的位交错奇偶校验码，并在扰频之前将其置于当前帧的B1字节。一个奇数奇偶校验值标明了一个错误。

联络线 (E1)。这个字节 (位于一个帧中的第一个STS-1中) 被用于承载节点之间的一个音频信道，为该领域中的维修人员所使用。

节段用户信道 (F1)。这个字节 (位于一个帧中的第一个STS-1中) 被用于支持用户插入附加的特别信息。

节段数据通信信道 (D1、D2、D3)。这些字节 (位于一个帧中的第一个STS-1中) 被用于承载一个数据通信信道 (DCC)，主要是为了维修而设立的，比如警报、监控以及控制。

线路附加信息

下面我们对于一些线路附加字节的功能进行简明的概述：

STS有效负载指针 (H1和H2)。线路附加信息中的H1和H2字节承载一个两字节的指针，该指针标明了STS SPE的位置。更精确地说，这些字节承载着一个值，该值相应于指针与STS SPE中的第一个字节之间的偏移。

线路位交错奇偶检验8位码 (B2)。B2字节承载着一个位交错奇偶检验码的检验值，该值针对STS-N中的每一个STS-1。它的计算涵盖了线路附加的所有位的奇偶性，以及扰频之前前面所有的STS-1帧的包络容量。这个字节由线路终止设备检测。中间的节段终止设备检测并重置节段附加信息中的B1字节，但是并不改变B2字节。

自动保护切换信道 (K1、K2)。K1和K2字节被用来提供一个信道，该信道在自动保护切换期间承载信号信息。在第5章中，我们将探讨不同类型的SONET自动保护切换方案。K2字节也被用来探测一个特殊类型的信号，该信号称为前向缺陷指示器，承载一个返回的缺陷指示信号。在网络中，这些缺陷指示信号维修时用到。在4.5.4节中，我们将对它们的使用做详

细的探讨。

线路数据通信信道。字节D4到D12（位于一个帧中的第一个STS-1中）被用来承载一个线路数据通信信道，主要是为了维修而设立的，比如警报、监控以及控制。

通道附加信息

STS通道追迹（J1）。正如在节段附加信息中一样，通道附加信息包括一个承载通道识别器的字节（J1），该通道识别器可以被监控，并确保其在网络中的连接。

STS通道位交错奇偶检验8位码（B3）。B3字节在通道层提供误码率监控。它承载一个位交错奇偶检验码的检验值，该值的计算涵盖了扰频之前，前面的STS SPE的所有的位。

STS通道信号标记（C2）。C2字节被用来指明STS SPE的内容。对映射SONET STS-1每一类型的信号配以特殊的标记。

通道状态（G1）。G1字节被用来传送从目的节点返回源节点的通道性能的信息。目的端将对接收信号中当前错误的计数插入该字节中，该字节然后被源节点监控。该字节的一部分也被用来承载一个缺陷指示信号，并返回到源。在4.5.4节中，将探讨缺陷指示信号的使用。

1.1.4 SONET/SDH 物理层

表1-3取自ITU推荐的G.957和G.691标准。在跨度之内不使用光学放大器。应用编码的首字母指明了目标传输距离，跟着的数字标明比特率。句点之后的数字标明光纤类型以及工作波长：一个空格或者1表示1310nm的波长在标准单模光纤（G.652）中的传输。2表示1550nm的波长在标准单模光纤（G.652）中的传输。3表示1550nm的波长在色散位移光纤（G.653）中的传输。而5表示1550nm的波长在非零色散位移光纤（G.655）中的传输。发射机包括多纵模（MLM）F-P激光器和单纵模（SLM）分布反馈式激光器，也包括发光二极管（LED）。两个色散限制值分别相应于发射机的两种不同的选择。ffs表示需要进一步研究的规范。使用直接调制SLM激光器的色散限制链路就属于这种情况，它对于如何标明啁啾限制并没有统一的标准。其中一些应用是损耗限制的，因此色散限制并不适用（NA）。

表1-3 SDH的不同的物理接口

比特率	编码	波长 (nm)	光纤	损耗 (dB)	发射机	色散 (ps/nm)
STM-1	I-1	1310	G.652	0-7	LED/MLM	18/25
	S-1.1	1310	G.652	0-12	MLM	96
	S-1.2	1550	G.652	0-12	MLM/SLM	296/NA
	L-1.1	1310	G.652	10-28	MLM/SLM	246/NA
	L-1.2	1550	G.652	10-28	SLM	NA
	L-1.3	1550	G.653	10-28	MLM/SLM	296/NA
STM-4	I-4	1310	G.652	0-7	LED/MLM	14/13
	S-4.1	1310	G.652	0-12	MLM	74
	S-4.2	1310	G.652	0-12	SLM	NA
	L-4.1	1310	G.652	10-24	MLM/SLM	109/NA
	L-4.2	1550	G.652	10-24	SLM	ffs
	L-4.3	1550	G.653	10-24	SLM	NA
	V-4.1	1310	G.652	22-33	SLM	200
	V-4.2	1550	G.652	22-33	SLM	2400
	V-4.3	1550	G.653	22-33	SLM	400