

通信工程丛书

MPLS 宽带网络互联技术

石晶林 丁炜 等编著

中国通信学会主编 人民邮电出版社



通信工程丛书

MPLS 宽带网络互联技术

石晶林 丁炜 等编著

中国通信学会主编

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

MPLS 宽带网络互联技术 / 石晶林等编著. —北京: 人民邮电出版社, 2001.3 (通信工程丛书)

ISBN 7-115-08927-2

I. M... II. 石... III. 宽带通信系统—计算机通信网—通信技术
IV. TN915

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 86390 号

通信工程丛书

MPLS 宽带网络互联技术

◆ 编 著 石晶林 丁 炜 等

责任编辑 王晓明

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@pptph.com.cn

网址 <http://www.pptph.com.cn>

北京汉魂图文设计有限公司制作

北京朝阳展望印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 850 × 1168 1/32

印张: 24.75

字数: 651 千字

2001 年 3 月第 1 版

印数: 1 - 6 000 册

2001 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-08927-2/TN·1666

定价: 51.00 元

内 容 提 要

本书专门介绍目前在宽带通信技术领域里非常引人注目的热点技术——多协议标签交换(MPLS)。主要内容包括:概论、通信网络传输交换技术的演变、MPLS 网络体系结构、标签、标签分发协议、MPLS 网中应用的路由技术、标签交换路径、MPLS 网络的 QoS 控制、MPLS 流量工程、MPLS 技术在帧中继网络中的应用、基于 ATM 的 MPLS 网络互联、MPLS 技术应用于虚拟专用网、基于 MPLS 的话音业务、MPLS 网络管理与维护等。

本书内容新颖,概念清楚,理论结合实际,可帮助读者尽快了解 MPLS 技术及应用知识。

本书可供从事宽带通信技术研究的专业技术人员、电信部门的相关人员及院校师生阅读参考。

丛 书 前 言

为了帮助我国通信工程技术人员有系统地掌握有关专业的基础理论知识，提高解决专业科技问题，做好实际工作的能力，了解通信技术的新知识和发展趋势，以便为加快我国通信建设，实现通信现代化作出应有的贡献，我会与人民邮电出版社协作，组织编写这套“通信工程丛书”，陆续出版。

这套丛书的主要读者对象是工作不久的大专院校通信学科各专业毕业生、各通信部门的助理工程师、工程师和其他通信工程技术人员。希望能够有助于他们较快地达到通信各专业工程师实际所应有的理论水平和技术水平。

这套丛书的特点是力求具有理论性、实用性、系统性和方向性。丛书内容从我国实际出发，密切结合当前通信科技工作和未来发展的需要，阐述通信各专业工程师应当掌握的专业知识，包括有关的系统、体制、技术标准、规格、指标、要求以及技术更新等方面，力求做到资料比较丰富完备，深浅适宜，条理清楚，对专业技术发展有一定的预见性。这套丛书不同于高深专著或一般教材，不仅介绍有关的物理概念和基本原理，而且着重于引导读者把这些概念和原理应用于实际；论证简明扼要，避免繁琐的数学推导。

对于支持编辑出版这套丛书的各个通信部门和专家们，我们表示衷心地感谢。殷切希望广大读者和各有关方面提出宝贵的意见和建议，使这套丛书日臻完善。

中国通信学会

序

MPLS(Multiprotocol Label Switching: 多协议标签交换)技术是一种在开放的通信网上利用定长标签引导数据高速传输和交换的网络新技术。自 1997 年提出以来, **MPLS** 技术以其高效率、超时代的特点得到了迅猛发展。**MPLS** 技术在 1999 年被评为十大热门通信技术之一, 其价值在于能在一个无连接网络中引入连接模式特性, 支持多种网络层协议。**MPLS** 是一种独立于链路层和物理层的技术, 因此它保证了各种各样网络的互联互通, 使得各种不同的网络数据传输技术在同一个 **MPLS** 平台上统一起来。**MPLS** 的主要优点在于减少了网络的复杂性, 兼容了现有各种主流网络技术, 大幅度降低了组网成本; 在向用户提供 IP 业务时能确保 QoS 和安全性。**MPLS** 不但支持流量工程, 并且也是当前最有前景的支持 VPN 实现的技术。

石晶林博士在博士后期间, 在他的导师丁炜教授指导下, 在短短 1 年多时间里带领多位研究生对 **MPLS** 协议和实现技术进行了系统而深入地研究。并在此基础上编写了这本《**MPLS** 宽带网络互联技术》。他们以极大的热忱, 倾注了大量的精力, 终于完成了该书的写作。书中包含了如此之多的新内容, 又有如此之广的覆盖面, 在这么短的时间里完成写作工作, 如果没有坚实的基础和顽强的毅力是难以想像的。

我认为本书的出版能起到一种启迪和及时雨的作用，并成为从事 MPLS 宽带互联技术的研发人员以及需要深入了解 MPLS 的工程技术人员喜爱的一本好书。

中科院资深院士
北京邮电大学名誉校长，教授

叶浩大
二〇〇四年十月

前 言

随着信息技术的高速发展，Internet 已经成为一个巨大的公众数据网。数以千百万计的各种用户在最近几年中已开始大量使用 Internet，这样快速增加的用户数使得 Internet 主干网的数据量扶摇直上。为了适应这种对业务和带宽的需求，所有的 ISP 都成倍地提高了网络的规模和带宽。同时还有许多更加令人吃惊的关于下一步发展的预测。那些风起云涌的新技术，如 VoIP 和电子商务，要求极大程度地扩展现有的网络能力。为了达到这一目标，人们迫切需要一个高带宽、业务发展受限少的宽带网络传输交换技术。

由于 ATM 具有高带宽、快速交换和可靠服务质量保证的优点，因此，用 ATM 实现交换与传输已是业界的共识。而 Internet 的迅速发展也使 IP 成为计算机网络应用环境中“既成事实”的标准和开放系统平台。因此宽带网络发展的方向是把最先进的 ATM 交换技术和最普及的 IP 技术融合起来，这种融合如以时间发展和技术先进性为主线的话，则它集中体现在了 IP 交换、Tag Switch、ARIS、IPOA、LANE、MPOA 等技术方面。这些技术虽说利用了 ATM 高速交换的特性，但存在的问题是要么没有充分利用 ATM 的 QoS 特性，要么就是过于复杂和标准不完善。例如 LANE 只能应用于较小规模的网络，不能支持像 Internet 这样的大型网络；IPOA 在不同子网间的互联仍需使用传统的路由器，因而吞吐量和延迟问题仍然存在，此外它只限于处理 ATM 上的 IP 业务，只支持较小规模的网络；MPOA 经实验证明也只能支持中小型网络等。此外，它们在 IP 路由的灵活性与 ATM 交换的高速性的相互结合方面也做得并不如人意。再者，当前网络具有多样性的特点，我们需要把使用不同技术的网络（如 ATM、X.25、帧中继 FR、SDH、DWDM 等）

在同一个平台上统一起来，上述技术均无法有效实现这一点。基于此，Internet 网络工程组（IETF）在 1997 年提出了多协议标签交换（MPLS, Multiprotocol Label Switching）技术。ITU-T 在 1999 年底一致同意将 MPLS 的标签分发协议（LDP）作为以 ATM 为基础的公网数据传输标准信令，并由 SG 11、SG 13、SG 15 小组立项进行有关实现细节的专门研究。

MPLS 技术是将分层网络的第二层交换和第三层路由结合起来的一种 L2/L3 集成数据传输技术。MPLS 之所以称为“多协议”是因为 MPLS 不但可以支持多种网络层面上的协议如 IPv4、IPv6、IPX、Appletalk、DECnet、CLNP 等，还同时可以兼容第二层上的多种链路层技术。

MPLS 通过将第二层的交换和第三层的路由技术很好地结合起来的方法，以十分简洁的方式完成信息的传送。MPLS 首先根据某种特定的映射规则在网络入口 LER 处将数据流分组头和固定长度的短标签对应起来，这种映射规则中不但考虑到数据流的目的地的信息，而且也考虑到了有关 QoS 的信息；然后在数据流的分组头中插入标签信息。在以后网络中的转发过程里，MPLS LSR 就只是根据数据流所携带的标签进行交换式转发。正因为如此，使得 MPLS 技术具有了如下功能特征：

- MPLS 在定长标签的严格匹配下简化了转发过程，而且这个转发的硬件基础是成熟的 ATM 交换技术，这大大减少了设备制造商的研发投资，缩短了 MPLS 设备的面市时间，也使产品具有了稳定性。

- 由于 MPLS 将路由与分组转发从 IP 网中分隔开来，这使得在 MPLS 网中可以通过修正转发方法来推动路由技术的演进。同时新的路由技术可以在不间断网络运行的情况下直接应用到网络中，而不必改动现有路由器上的转发技术，这是以前的各种网络技术不易做到的。

- MPLS 简化了 ATM 与 IP 的集成技术，推动了它们的统一，

从而起到平衡用户在 ATM 和 IP 网上的巨大投资，消除了现有网络的 N^2 因素的限制，由此减少了网络维护成本和扩展性问题。

- 在 MPLS 网中可以直接使用显示路由，这使得流量工程的应用变得大为简单，增强了 IP 网络数据流量控制和自愈恢复能力，为支持更多的新业务提供了保障。同时 MPLS 在保证连接可靠性的条件下取消了对专线连接的要求，使得各种新业务可以在基于 MPLS 的 IP 上实现。

- MPLS 技术进一步促进了网络功能的划分，它将复杂的事务处理推到网络边缘去完成，核心只负责完成传送功能，这有利于在一个大的网络中维护 IP 协议的扩展性。

- MPLS 网络中标签堆栈的使用将庞大的路由表变得很小，极大地改善了路由扩展能力。

- MPLS 可用于多种链路层技术，做到对下层与上层的多协议，最大限度地兼顾了原有的各种技术，保护了现有投资和网络资源，促进了网络互联互通和网络的融合统一。

- MPLS 能够以无连接方式或显示路由的方式提供面向连接的业务，这使得 MPLS 适用于动态隧道技术，并保障数据传输业务的 QoS 需求，而隧道技术是目前支持 VPN 业务的有效手段，QoS 的保障是 IP 网上实现语音、实时多媒体信息传输的基础。

- 在综合平台技术上，语音方面，基于 MPLS 的 VoIP 实验十分成功；数据方面，它先天就能承载 IP 业务；视频方面，它已能承载多媒体应用业务。

由于 MPLS 技术的上述巨大优势，它一经提出就得到了迅猛的发展。国际国内都在对它进行着热烈的讨论与大量的研究。目前对它的研究、开发和应用已进入了新的阶段，相关产品也已经推出。为了满足广大科研人员和工程开发人员了解并掌握 MPLS 技术的迫切需要，我们在科研开发的基础上，专门编写了本书。

本书在写作期间，作者得到了许多同事及同行业专家的大力支持与帮助，特别是北京邮电大学原培训中心主任郭志刚教授，他

一直给本书的编写工作以大力的支持，并时时关心着本书的写作进程。此外，东方通信有限公司的李文化博士也给本书的写作给予力所能及的帮助。作者在此向所有为本书编写、出版工作提供过帮助与支持的人表示深深的谢意。

本书主要由石晶林、丁炜编写，另外，徐鹏参与了第三、四章部分内容的编写，并完成第十、十一章的主要内容编写；张宏志完成第十四章的编写；周卫华完成第十二章的主要内容编写；饶超完成第十三章主要内容的编写；王瑜参与第八章的部分内容编写工作。本书由丁炜教授审校，金惠文教授还对书中的所有插图进行了校对。

由于现代宽带通信技术发展速度极快，MPLS 作为下一代的宽带网络技术仍处于高速发展和不断完善的阶段之中，尤其是 MP⁴S (多协议光波长交换技术)、MPLS 与 xDSL 的结合、VoMPLS 技术、MPLS VPN 技术等正日新月异地改变着，加之作者对宽带通信技术的理解有限，因此书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。作者的通信地址是：

北京邮电大学 156 信箱

邮编：100876

电话：010-62283128

E-mail: jinglin@263.net

作者

2000 年 8 月

目 录

第一章 概 论	1
1.1 B-ISDN (宽带综合业务数字网).....	1
1.1.1 信息高速公路与信息社会.....	1
1.1.2 信息高速公路的关键技术.....	4
1.2 宽带网络技术发展的推动力	5
1.2.1 市场需求	5
1.2.2 技术进步.....	6
1.3 宽带网络互联基本技术及分类	7
1.3.1 宽带网络分类.....	7
1.3.2 宽带网络基本技术.....	11
第二章 通信网络传输交换技术的演变	16
2.1 引言	16
2.2 话音通信与电话交换网	16
2.3 数据通信与数据传输网的演变	19
2.3.1 利用电话网进行数据传输.....	20
2.3.2 电路交换式数据传输网.....	21
2.3.3 报文交换与分组交换式数据传输网.....	24
2.4 帧中继——快速分组交换网	30
2.4.1 帧中继的产生.....	30
2.4.2 帧中继.....	31
2.4.3 帧中继的帧结构.....	32
2.4.4 帧中继业务.....	33
2.4.5 帧中继的参考模型.....	34
2.4.6 帧中继的应用.....	35

2.5	ATM —— 宽带传输交换技术	39
2.5.1	宽带综合业务网的产生及业务分类	39
2.5.2	宽带 ISDN 业务对传输交换技术的要求	46
2.5.3	ATM —— 宽带传输交换技术	49
2.6	宽带信息传输与交换新技术	55
2.6.1	ATM 与 IP	55
2.6.2	IP 交换技术	61
2.6.3	标记交换技术	68
2.6.4	ATM 上的传统 IP 技术	72
2.6.5	ATM 局域网仿真 LANE 技术	75
2.6.6	MPOA 技术	81
2.7	基于路由的聚合 IP 交换技术 —— ARIS	87
2.8	MPLS —— 宽带网络传输交换技术的统一	93
2.8.1	MPLS 的提出及其标准化工作	94
2.8.2	MPLS 工作原理	97
2.8.3	MPLS 的功能特征	99
2.8.4	MPLS 技术特点及优势	100
2.8.5	MPLS 的性能表示	103
2.8.6	IPOA、MPOA、LANE、IP Switching、ARIS、 Tag Switching 与 MPLS 的比较	107
2.9	小结	109
第三章	MPLS 网络体系结构	117
3.1	概述	117
3.2	MPLS 技术发展动力	120
3.2.1	MPLS 核与路由器核的比较	120
3.2.2	MPLS 核与 ATM 核、帧中继核的比较	124
3.3	MPLS 网络的基本运作机制	124
3.4	MPLS 基础	128

3.4.1 MPLS 中的基本路由方法	128
3.4.2 标签与转发等价类 (FEC)	130
3.4.3 MPLS 封装	133
3.4.4 标签交换路由器 (LSR) 与标签边缘交换路由器 (LER)	134
3.4.5 标签分发协议 LDP	136
3.4.6 标签分发处理程序	140
3.4.7 标签交换路径 LSP	150
3.5 第二层与第三层转发	156
3.6 MPLS 网络扩展性	158
3.7 MPLS 聚合与流合并	159
3.8 MPLS 环路处理	165
3.8.1 环路处理的必要性	165
3.8.2 环路处理方法	166
3.9 MPLS 与多路径路由	172
3.10 MPLS 的组播	173
3.11 层次化结构的 MPLS 网络运作	174
3.11.1 MPLS 分层操作所要求的组件	175
3.11.2 MPLS 使用层次结构的一些限制	176
3.11.3 MPLS 的分层结构与路由分层结构的关系	177
3.12 基于传统 ATM 技术的 MPLS 系统运作	179
3.13 MPLS 网络操作与管理	180
3.14 小结	181
第四章 标 签	185
4.1 标签的相关概念	185
4.1.1 标签的定义	185
4.1.2 标签的语意	186
4.1.3 标签的粒度	188

4.1.4	标签空间	190
4.1.5	标签空间的使用和标签的唯一性	190
4.1.6	标签堆栈	191
4.2	标签的操作	193
4.2.1	下一跳标签转发入口 NHLFE	194
4.2.2	标签绑定与标签映射	194
4.2.3	标签赋值	195
4.2.4	标签封装和标签编码	198
4.2.5	标签分发	202
4.2.6	标签清除	207
4.2.7	标签保持 (Label Retention)	207
4.2.8	标签转换	209
4.2.9	标签合并	211
4.3	小结	215
第五章	标签分发协议 (LDP)	217
5.1	引言	217
5.1.1	LDP 概述	217
5.1.2	LDP 对等层及 LDP 会话消息	217
5.1.3	LDP 错误处理	218
5.2	LDP 操作过程	219
5.2.1	FEC —— 转发等价类	219
5.2.2	标签空间、LDP 标识、会话与传输	220
5.2.3	LDP 对等层的侦测	222
5.2.4	LDP 会话的建立与维护	223
5.2.5	会话初始化的状态机描述	225
5.2.6	标签分发与管理	228
5.2.7	LDP 标识与下一跳地址	231
5.2.8	循环探测与预防	231

5.3	LDP 协议规范	235
5.3.1	LDP 消息处理程序	236
5.3.2	LDP 消息	245
5.3.3	LDP 消息的处理	247
5.4	LDP 操作的状态机描述法	251
5.4.1	不具 VC 合并能力的 LDP 状态机	251
5.4.2	具有 VC 合并能力的 LDP 状态机	258
5.5	LDP 的应用	264
5.6	小结	266
第六章	MPLS 网中应用的路由技术	271
6.1	概述	271
6.2	路由信息选择协议 (RIP)	273
6.2.1	距离矢量路由算法	274
6.2.2	RIP 路由表	279
6.2.3	RIP 消息格式	279
6.2.4	RIP 工作过程	281
6.2.5	RIP 的改进	282
6.3	内部网关路由协议 (IGRP)	282
6.3.1	IGRP 基础	283
6.3.2	IGRP 特性	285
6.3.3	增强型 IGRP 协议	287
6.4	开放式最短路径优先协议	291
6.4.1	最短路径优先算法 SPF 简介	292
6.4.2	OSPF 的特点	293
6.4.3	OSPF 基本原理	294
6.4.4	OSPF 分组格式	295
6.4.5	OSPF 的路由层次	298
6.5	外部网关协议 (EGP)	301

6.5.1	EGP 分组格式	303
6.5.2	EGP 消息类型	304
6.5.3	EGP 的应用及局限性	308
6.6	边界网关协议 (BGP)	310
6.6.1	BGP 技术基础	310
6.6.2	BGP 协议的操作	312
6.6.3	BGP 路由	312
6.6.4	BGP 消息类型	315
6.6.5	BGP 消息格式	316
6.7	距离矢量组播路由协议	320
6.7.1	DVMRP 基础	321
6.7.2	DVMRP 隧道技术	323
6.7.3	DVMRP 路由算法: TRPB	325
6.7.4	DVMRP 路由信息的发送	327
6.7.5	DVMRP 路由信息的接收	328
6.7.6	DVMRP 本地组成员	329
6.7.7	DVMRP 转发算法	330
6.8	协议无关组播路由协议 PIM	333
6.8.1	协议无关组播协议 —— 密集模式	333
6.8.2	协议无关组播协议 —— 稀疏模式	337
6.9	下一跳地址解析协议	342
6.9.1	NHRP 工作原理简述	343
6.9.2	NHRP 应用	346
6.9.3	NHRP 配置	347
6.9.4	NHRP 分组格式	347
6.9.5	NHRP 协议操作的一些考虑	352
6.9.6	讨论	354
6.10	资源预留协议	356
6.10.1	RSVP 数据流	359