

无线通信前沿技术丛书

该书由国家自然科学基金“网状智能光网络的生存性研究(60203010)”项目和中央高校基本科研业务费“灾后大规模毁坏下网络修复建模与优化研究(ZYGX2010J002)”项目联合资助。

核心承载网络 的生存性关键技术

● 虞红芳 罗洪斌 郭磊 ◎ 著

Key Technologies of Survivability
On Backbone Carrier Networks



国防工业出版社
National Defense Industry Press

无线通信前沿技术丛书

该书由国家自然科学基金“网状智能光网络的生存性研究(60203010)”项目和中央高校基本科研业务费“灾后大规模毁坏下网络修复建模与优化研究(ZYGX2010J002)”项目联合资助。

核心承载网络的生存性关键技术

Key Technologies of Survivability On Backbone Carrier Networks

虞红芳 罗洪斌 郭磊 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

全书共分7章。第1章介绍网络生存性的基本概念。第2章介绍网络生存性研究中常用的分离路由算法和优化建模技术。这两章可看做是本书的预备知识。第3章介绍支持区分可靠性的生存性技术,给出了单失效模型和独立失效模型下的多种区分可靠性路由算法。第4章介绍多播业务的生存性技术,包括多播保护树的计算以及保护树间的资源共享等,并提出了相应的有效方法。第5章介绍容忍多失效的生存性技术,提出了双失效100%恢复的保护路计算方式以及增强容忍多失效的生存性技术。第6章介绍大规模失效后的网络修复技术,解决了修复资源受限时修复部件的选择问题。第7章是全书的总结。

本书可供从事网络生存性技术与开发的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

核心承载网络的生存性关键技术/虞红芳,罗洪斌,郭磊著. —北京:

国防工业出版社, 2012.12

ISBN 978-7-118-08401-6

I. ①核… II. ①虞… ②罗… ③郭… III. ①网络通信—通信安全—安全技术—研究 IV. ①TN918.91

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第258658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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 10 1/4 字数 231 千字

2013年1月第1版第1次印刷 印数 1—2500册 定价 42.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

序 言

随着用户数量和宽带化业务类型的增加，核心承载网的首要问题是解决带宽增长的需求。基于 WDM（波分复用）的光传送网由于具有传输容量大、扩展性好和组网灵活等优点，已成为核心承载网的主流技术。同时，现代社会对网络的依赖性越来越大，故障所带来的影响也相应地愈加严重。大容量 WDM 网络中的光缆被切断会引起大量业务的中断。另外，网络的融合、规模和复杂性的持续增长，网络遭受破坏的可能性也日益增加。因此，网络的生存性问题成为核心承载网至关重要的设计考虑。

本书的三位作者对光传送网的生存性问题有着长期深入的研究。本书内容是基于作者的研究成果整理而成。第 1 章系统地介绍了基于光传送网的核心承载网的架构、网络生存性的定义以及网络生存性的通用方法，帮助读者理解什么是网络生存性，并对网络生存性的两种基本方法——保护与恢复，建立认识。第 2 章介绍了研究网络生存性问题中常用的路由算法和建模方法。第 3 章～第 5 章分别介绍了支持区分可靠性、多播业务和多链路失效下的网络保护机制和算法。第 6 章介绍了大规模失效下网络的渐进修复机制和算法。每一章内容都介绍了新的理论和研究成果。第 7 章对本书进行了总结并分析了网络生存性的趋势。

本书对于从事有关网络生存性工作的研究、开发和使用等人员有参考价值。

李乐民
2012 年 10 月

前 言

随着核心承载网向超高速、超大容量的方向发展,基于光传送的核心承载网在发生错误或遭受恶意攻击时的生存能力日益重要。近年来,核心承载网的生存性问题得到了广泛的关注,其研究有重要价值和意义。我们在网络生存性的研究中感觉到迫切需要一本系统介绍和总结最新涌现的核心承载网的生存性机制的书籍。

第1章简单介绍了核心承载网的发展,分层结构的生存性机制,网络生存性的度量 and 主要的网络生存性技术。

第2章首先介绍了分离机制中的链路分离、节点分离和 K 分离最短路由的算法思想,接着介绍了网络优化中常用的Link-Path和Node-Link模型以及具体网络生存性问题的数学模型。

第3章主要针对光传送网中支持区分可靠性的保护设计问题,首先介绍了两种在单链路失效模型下不允许资源共享的近似算法,在此基础上又提出了一种在单链路失效模型下允许资源共享的启发式保护设计算法和一种在独立失效模型下不允许资源共享的启发式保护设计算法,最后提出了一种在多粒度失效模型下支持区分可靠性的联合路由算法。

第4章首先研究了在工作树给定的情况下如何保护工作树的问题并提出了一种较好的算法,随后针对多播请求计算路由问题提出了一种有效减少冗余资源的算法,最后又研究了多播之间可以共享保护资源时的动态多播路由问题并提出了一种算法。计算机仿真结果表明,这些算法对光传送网中为多播请求计算保护路由具有较大的指导意义和实用价值。

第5章首先引入了双链路失效的保护问题,详细介绍了基于通路保护、基于链路保护和基于分段保护的生存性技术,并进一步讲解了光传送网中多链路失效的保护问题,详细介绍了共享度限制和多子通路保护方法。

第6章主要介绍大规模失效后的网络修复技术。随着核心承载网络规模和复杂度的持续增长,网络发生大规模失效的可能性也日益增加,而大规模失效所带来的后果也更为严重,所以大规模失效发生后的网络修复显得尤为重要。而有限的人力资源、设备资源都难以将大规模失效在短时间内完全修复,本章主要介绍在有限的资源下,如何选择性地修复网络中失效设备,使得修复后的网络最大限度地满足用户需求。

第7章对全书的内容和在基于光传送网的核心承载网生存性方面的主要贡献进行了一个简单的总结,并对这一领域未来的发展方向提出一些观点和期望。

本书第1章、2章、6章、7章由虞红芳编写,第3章、第4章由罗洪斌编写,第5章由郭磊编写。

作者

2012年10月

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 基于 WDM 光传送网的核心承载网络	1
1.1.1 WDM 光传送网	1
1.1.2 核心承载网的管理和控制	3
1.1.3 通用多协议标志交换协议对网络生存性的支持	4
1.2 核心承载网中故障以及影响	5
1.2.1 故障的原因	5
1.2.2 中断时间的影响	6
1.3 各层网络生存性设计理念	7
1.3.1 网络生存性的分层	8
1.3.2 物理层生存性机制	8
1.3.3 系统层生存性机制	10
1.3.4 逻辑层生存性机制	12
1.3.5 业务层生存性机制	14
1.3.6 不同层次生存性机制的性能比较	16
1.4 生存性的度量	17
1.4.1 可恢复性	17
1.4.2 可靠性	18
1.4.3 可用性	19
1.4.4 拓扑连通性	20
1.5 核心承载网的生存性机制	21
1.5.1 链路保护	21
1.5.2 通路保护	22
1.5.3 分段保护	22
1.6 章节安排	22
参考文献	23
第 2 章 网络生存性中的分离路由和优化建模	25
2.1 分离路由算法	25
2.1.1 链路分离路由算法	25
2.1.2 节点分离路由机制	27

2.1.3	SRLG 分离路由算法	29
2.2	网络生存性问题的优化建模方法	33
2.2.1	网络优化问题的两种建模方法	33
2.2.2	网络生存性优化问题建模实例	39
	参考文献	47
第 3 章	支持区分可靠性的生存性技术	48
3.1	研究背景	48
3.2	单链路失效模型下区分可靠性的生存性技术	49
3.2.1	资源不共享时的保护算法研究	49
3.2.2	资源共享时的保护算法研究	61
3.3	独立失效模型下区分可靠性的生存性技术	66
3.3.1	问题描述	66
3.3.2	AUGHT 算法描述	68
3.3.3	仿真结果与分析	69
3.4	SRLG 失效模型下区分可靠性的生存性技术	72
3.4.1	问题定义	72
3.4.2	部分 SRLG 分离的保护	72
3.4.3	JRA-DiR 算法描述	73
3.5	本章小结	77
	参考文献	77
第 4 章	多播业务的生存性技术	79
4.1	研究背景	79
4.2	工作树给定时备份树研究	81
4.2.1	问题描述	81
4.2.2	姊妹节点优先的分段保护算法描述	82
4.2.3	仿真结果与分析	85
4.3	减少冗余资源的备份树研究	89
4.3.1	问题描述	89
4.3.2	分段排斥算法描述	90
4.3.3	仿真结果与分析	91
4.4	多播业务间备份资源共享研究	93
4.4.1	问题描述	93
4.4.2	基于生成路径的多播保护算法描述	93
4.4.3	仿真结果与分析	96
4.5	本章小结	98
	参考文献	99

第 5 章 容忍多失效的生存性技术	100
5.1 容忍双链路失效的生存性技术	100
5.1.1 基于通路保护的方法	101
5.1.2 基于链路保护的方法	108
5.1.3 基于分段保护的方法	115
5.1.4 双链路失效的联合路由算法	119
5.2 增强容忍多链路失效的生存性技术	125
5.2.1 共享度约束保护方法	125
5.2.2 多子通路保护方法	129
5.3 本章小结	133
参考文献	134
第 6 章 大规模失效后的网络修复技术	135
6.1 单阶段网络修复技术	135
6.1.1 最大化网络流量的修复机制	136
6.1.2 考虑业务约束的修复机制	140
6.2 多阶段网络修复技术	145
6.2.1 模型建立	146
6.2.2 算法描述	148
6.2.3 仿真结果与分析	150
6.3 本章小结	152
参考文献	153
第 7 章 结束语和展望	154
7.1 本书总结	154
7.2 展望	155

第1章 引言

据《十二五中国电信宽带战略解析》报告预测,在未来5年内,我国互联网业务量年平均增长率将达到56%~80%。其中,网络视频业务占用很大的带宽。各种分享视频和高清视频已成为当今网民的一大需求,用户对通信网络带宽要求与日俱增。

同时,随着全IP的迅猛发展,信息化需求已从单纯的数据信息向交互式多媒体信息发展,从数据、话音和图像分别服务向三者统一服务和一网传输发展。传统IP网络已难以满足新业务需求,新型的基于IP的承载网不仅要有大的存储容量和交换转发能力,还必须能够为多媒体等多种业务提供高可靠和有质量保障的服务。由此对承载网的控制和路由交换以及管理功能提出了很高的要求。

随着光网络技术的发展和成熟,基于波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)的光传送网在网络传输速率和管理控制方面都具有显著的优势,其应用前景已得到广泛的认同。因此,本书以WDM光传送网作为核心承载网,开展对网络生存性技术的研究。

本章首先简单介绍基于WDM光传送网的核心承载网(1.1节)以及核心承载网中故障发生原因及其影响(1.2节),1.3节介绍了网络中各层的生存性设计理念,1.4节详细论述了生存性定量分析的度量方式,1.5节简述了核心承载网的生存性技术,1.6节给出了本书的主要研究方向和组织结构。

1.1 基于WDM光传送网的核心承载网络

IP流量剧增和网络多媒体业务的迅猛发展,使带宽的需求呈快速增长趋势。适用于半导体行业的摩尔定律(即:微处理器速度每18个月翻一番),已经不能描述Internet中业务量的增长趋势。在世界范围内,业务量正在以每6个月翻一番的速度增长。同时,随着全IP化的发展,新时代IP化承载网在满足指数型增长带宽需求的基础上,还要具备电信级的高可靠性和安全性。这对传统的核心承载网络提出了巨大挑战。

1.1.1 WDM光传送网

WDM技术能充分利用光纤的巨大带宽(可达几十Tb/s)资源,已成为核心承载网中最具吸引力的技术。在WDM上构建IP化承载网主要有3种可能的方案:IP over SONET/SDH over WDM、IP over ATM over SONET/SDH over WDM和IP over WDM。IP over SONET/SDH over WDM中引入SONET/SDH的优势在于当网络中出现光纤或者节点失效时,能够快速恢复。然而,随着数据业务对传输速率的要求不断提高,在SONET/

SDH 上运行 IP 要求 SONET/SDH 具有很好的保护和恢复能力，构建一个这样的网络价格非常昂贵。考虑到 IP 只提供尽力而为的服务，而 ATM 却能够支持多种业务类别，因而 IP over ATM over SONET/SDH over WDM 似乎是一种可能的方案。然而，ATM 本身技术和管理的复杂导致了该技术进展缓慢。因而，实现 IP 化核心承载网最有效最经济的方法就是直接在 WDM 上运行 IP，即 IP over WDM。IP over WDM 解决方案已逐渐被国内外的主流运营商所接受，成为目前主流的核心承载网方案。

图 1-1 显示了 IP over WDM 的分层结构。WDM 层由通过光纤相互连接的光交换机或者光路由器组成。一个 IP 路由器与一个光交换机或者光路由器相连，但是一个光交换机或者光路由器不一定与一个 IP 层的路由器相连。在“IP 加光”策略组合中，光网络的作用主要体现在两方面：一是为 IP 层提供高带宽容量和全透明的更低成本的光层穿通；二是为 IP 层业务提供最具成本效益的保护。直接在 WDM 上运行 IP 不但能够很好地利用 WDM 巨大的传输带宽，而且具有对数据及编码格式透明等优点。

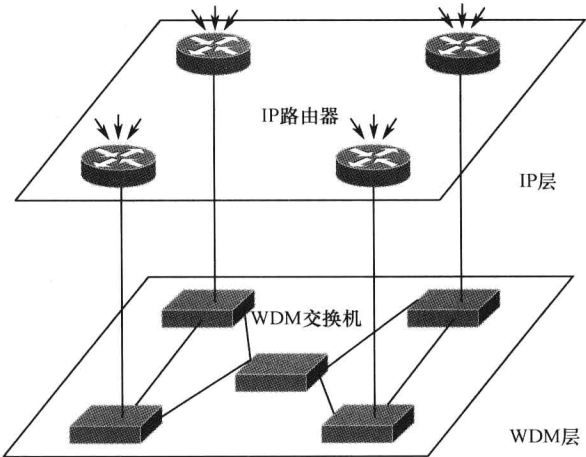


图 1-1 IP over WDM 的分层结构

为了将传统的点到点 WDM 网络所提供的巨大原始带宽转化为实际组网可以灵活应用的带宽，需要在传输节点处引入灵活的光网络节点实现光层联网以构筑光传送网（Optical Transport Network，OTN）。

最常用的光传送网节点主要有用于网间交叉连接的光交叉连接器（Optical Cross-Connect，OXC）和能够提供本地业务上路和下路功能的光分插复用器（Optical Add-Drop Multiplexer，OADM），如图 1-2 所示。

OXC 的功能类似同步数字体系（Synchronous Digital Hierarchy，SDH）网络中的数字交叉连接器（Digital Cross Connect，DXC）。一个波长信道上的信号直接交换到出口光纤的相应波长，如果没有使用波长转换器，出口、入口波长必须相同；如果使用波长转换器，出口、入口波长可以不同。具体实现可以分为全光型 OXC（无需进行光电/电光转换和电信号处理，直接通过 OXC 中的光交叉矩阵交换）和非全光型 OXC（即需要进行光—电—光转换实现交换）。

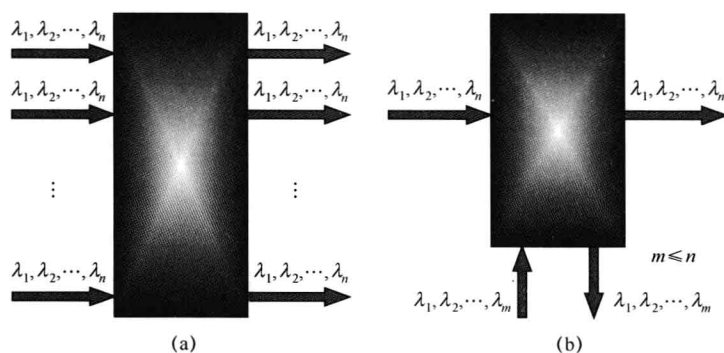


图 1-2 两个重要的网络设备

(a) OXC; (b) OADM。

OADM 节点的功能类似于 SDH 网络中的分插复用器 (Add-Drop Multiplexer, ADM), 但直接以光信号作为操作对象。OADM 节点只需选定具有本地业务的波长上下路, 而其他波长无阻塞地通过网络节点。由于具有灵活疏导能力的 OXC 和 OADM 可以将不在本地下路的大量业务从光层旁路掉, 因此不仅能够减少网络节点所要处理的业务量, 降低对网络节点规模的要求, 而且能够降低网络节点的成本。全光型 OXC、OADM 具有灵活的可重构特性, 使得网络具有波长路由能力, 在这种网络中就可以提供端到端的波长通路 (或称为光路, Lightpath) 的动态分配和恢复。OXC 和 OADM 等技术的不断进步和成熟, 使得光网络组网方式从点到点传输系统向 WDM 联网的光传送网络发展。

1.1.2 核心承载网的管理和控制

为使核心承载网的 IP 层与光层更好融合, 需要在两者之间建立一个控制平面。近年来, 互联网工程任务组 (Internet Engineering Task Force, IETF) 提出的通用多协议标志交换协议 (Generalized Multiprotocol Label Switching, GMPLS)^[1]就是采用这样的融合方式。GMPLS 采用对等模型, 为 IP 层和 WDM 层建立一个统一的控制面。这样不仅可以减少管理和维护复杂性, 有效地利用网络资源, 为使用信令实现对全网控制提供了可能, 还为网络运营者甚至 VPN 客户提供动态配置光传送层的能力, 以快速响应各种业务, 并在故障情况下自动调整网络资源达到快速保护与恢复, 从而实现分组技术与光子技术的结合, 同时具备 IP 层和光传送层的功能。

GMPLS 是 MPLS 向光网络的扩展, 它可以用统一的控制平面来管理多种不同技术组建的网络, 从而为简化网络结构、降低网络管理成本和优化网络性能提供重要保证。GMPLS 对 MPLS 标记进行了扩展, 不但仍然可以用来标记传统的数据包, 还可以标记时分复用 (Time Division Multiplex, TDM) 时隙、波长、波长组和光纤等; 为了充分利用 WDM 光网络的资源, 满足未来一些新业务的开展 (如 VPN 和光波长租用等), 实现光网络的智能化, GMPLS 还对信令和路由协议进行了修改和补充; 为解决光网络中各种链路的管理问题, GMPLS 设计了一个全新的链路管理协议 (Link Management

Protocol, LMP); 为了保障光网络运营的可靠, GMPLS 还对光网络的保护和恢复机制进行了改进。

GMPLS 定义了专门的链路管理协议 LMP 来管理两节点间的链路, 其内容包括控制信道管理、链路属性关联、链路连接性验证和故障隔离/定位。链路管理协议 LMP 不依赖于数据的编码方式, 因此可用来校验节点之间的连通性, 并在网络中隔离链路、光纤和信道错误。LMP 的功能之一是链路故障管理功能, 主要涉及故障定位。LMP 可通过链路中一个或多个数据通道的状态 (ChannelStatus) 通知管理故障。LMP 通过 ChannelStatus 消息进行故障通知, 这个消息可用来指示单个数据通道的故障、多个数据通道的故障或整个链路的故障。节点通过接收到的故障通知进行故障相关性分析。一旦故障定位成功, 信令协议就被用来开始链路或通路保护和恢复过程。

1.1.3 通用多协议标志交换协议对网络生存性的支持

为了支持 WDM 光传送网络的生存性, GMPLS 的路由协议需要广播与生存性相关的链路保护类型 (Link Protection Type, LPT) 和共享风险链路组 (Shared Risk Link Group, SRLG) 等信息。LPT 表示链路所具有的保护能力, 保护类型可以是 1+1、1:1、M:N、增强保护以及未保护等。利用 LPT 信息, 路径计算算法可以建立具有适合保护特性的标记交换路径 (Label Switching Path, LSP)。LPT 按等级组织, 在建立通道时指定最小可接受的保护方式, 然后利用路径选择算法寻找能够满足条件的路径。保护能力从低到高排列。对于未保护或 1+1 保护, 信息的发布提供了链路容量和未使用带宽的完整描述; 但对于 1:1 或 M:N 类型, 因保护带宽在主 LSP 运行良好时可用于传送低优先级的业务, 需要对链路 LPT 的额外业务指示进行发布。LPT 使得链路保护可被用于路由计算。

此外, 为了支持网络生存性, 在链路绑定时, 一般需要采用 SRLG 进行链路绑定, 以区分不同的链路生存性特性。一条捆绑链路的 SRLG 是所有成员链路 SRLG 的组合。需要特别指出的是, 捆绑链路中必须包括足够的信息, 使得远端 OXC 可以利用这些信息来决定资源的可用性, 获知捆绑链路中的每一个 SRLG 以及属于不同 SRLG 链路之间的关系。

为了实现快速处理故障和网络生存性的要求, GMPLS 的信令协议定义了一些与恢复相关的新的通知消息以及类型、长度和数值 (Type, Length and Value, TLV) 对象等。故障通知的机制采用通知消息来通知故障的邻近节点处理故障, 这样就可以防止一些中间节点处理这些通知消息, 避免故障点的状态被改变。通知消息已经被加入到基于流量工程扩展的资源预留协议 (Resource ReSerVation Protocol-Traffic Engineering, RSVP-TE) 中, 它不会替换 RSVP 中已存在的错误通知信息。通过故障通告的机制以及携带新的 TLV 对象的 GMPLS 消息, 实现了快速故障恢复。

由于 WDM 技术无论在传输速率方面还是管理控制方面都具有显著的优势, 其在核心承载网的应用前景已得到广泛的认同。因此, 本书以 WDM 光传送网作为核心承载网基础, 开展对生存性技术的各项研究。

1.2 核心承载网中故障以及影响

随着 WDM 光传输技术的飞速发展，单波长传输速率越来越高，单纤复用信道数越来越多，网络容量也越来越大，导致网络故障的影响也越来越严重。同时光传送网由点到点、环网逐步向网状网演变，这也增加了核心承载网络故障情况的复杂性。

据美国 FCC 报告，在城域网中每 1000mile (1mile=1609.31m) 光纤平均每年被切断 13 次，在长途网络中每 1000 英里光纤平均每年被切断 3 次；传输容量达 Tb/s 级的单根光纤的失效，将影响 1200 万对以上的电话业务。

大家可能会问，在光缆保护如此受到重视的今天，为什么光纤网络还会发生故障呢？是不是把光缆埋得足够深，或者把它们放在保护管道中就能避免故障了呢？这些问题在实践中看似简单，其实并非如此。我们必须面对这样的事实：不论光学技术多么先进，即使有完善的光缆保护措施，光纤网络仍然会以相当惊人的频率发生故障。

1.2.1 故障的原因

20 世纪 90 年代，在光纤网络发生多次严重故障后，美国监管机构发起了一个关于“光缆故障频率及原因”的全面调查^[2]。图 1-3 为报告中关于光缆故障原因的数据。由图 1-3 可见，近 60%的故障来自于外力挖掘造成的机械损伤；车辆导致的故障通常发生在架空光缆，包括车辆与电线杆冲撞造成的故障、车身较高的车辆挂断光缆或与公路立交桥光缆管道碰撞造成的故障；人为错误主要指技术人员在维修过程中错误切割了正在运行的光缆；电力线损耗指的是当光缆与电缆并排安装时，电缆散热融化光缆；另外，鼠类啃咬也会造成光缆局部故障；人为蓄意破坏造成的光缆阻断也是不容忽视的，特别是在恐怖袭击猖獗的今天。

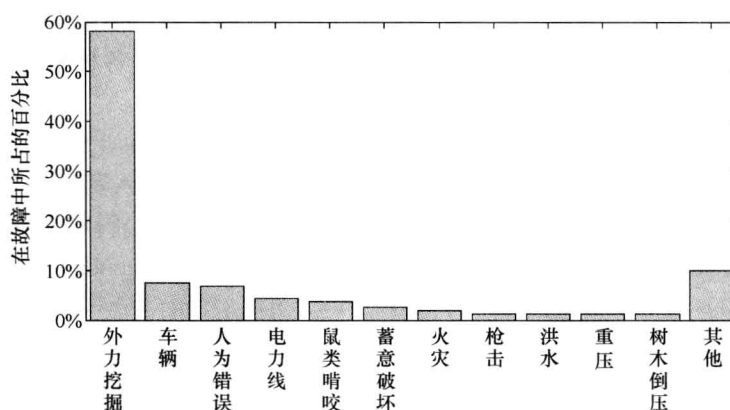


图 1-3 光缆故障的直接原因（调查^[2]中数据）

注：“光缆故障频率及原因”的调查报告^[2]在后文中还会提到，虽然这份报告已经历史悠久，但其中关于故障规模度量的思想沿用至今，本文因为研究方向原因没有做进一步的介绍，有兴趣的读者可以自行查阅。

图 1-4 统计了相关服务中断及光缆修复时间的分布情况。由图可见，一次光缆故障的平均修复时间为 14h；但方差较高，个别修复时间达到了 100h，服务平均中断时间为 5.2h。

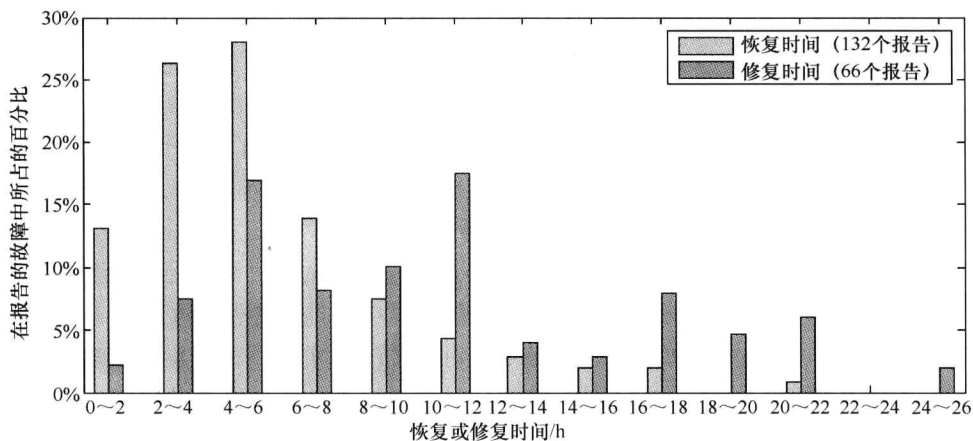


图 1-4 光缆修复及服务恢复时间的柱状图

1.2.2 中断时间的影响

光缆故障会给用户带来各种各样的影响，其中经济损失和业务中断需要首先考虑。调查结果指出在 2004 年由于网络故障直接造成的商业损失高达 500 亿美元，语音呼叫的直接损失为每分钟十万美元甚至更多，其他经济损失可能是专有线路或虚拟服务网络无法达到服务等级协议，甚至会导致一些完全依赖“1-800”服务接收订单或基于 Web 交易系统的企业破产。在电子商务不断发展的今天，我们很容易想象即使只是几分钟的故障也会对网络营销企业的收入和声誉带来直接影响^[2]。

当中断时间在几秒或者以下时，并不会对经济收入和业务产生很大影响，首先需要关注由于网络动态变化产生的影响。Sosnosky 的研究详细分析了各种服务和信号类型下常见的几种影响^[3]，如表 1-1 所列。

一个可接受时间值是保持任何载波信号流中断时间小于 50ms。50ms 是专用 1+1 自动保护倒换（Automatic Protection Switching, APS）系统的业务恢复时间。

(1) 50ms 或者更小的中断时间对一个传输信号来说只是一个瞬时干扰（Hit），在高层表现为一个传输错误。最多只有 1 个或 2 个错误秒（Error-Seconds）会被性能监测设备记录下来，大多数 TCP/IP 会话并不会受到影响。更高层没有报警被激活。对声音来说影响表现为一个“咔嚓声”，对传真机表现为一次快速移动，对视频可能是几帧数据的丢失，对数据服务可能引起一个数据包重传。

(2) 当中断时间为 50ms~200ms 时，由于 1 阶数字信号（Digital Signaling 1, DS-1）的重构时间增加，有小于 5% 的概率可能会超过一些旧式信道处理单元（Channel Bank）的载波群报警（Carrier Group Alarm, CGA）时间，相关交换机会中断正在进行中的交换业务。对于具有 DS-1 接口的现代数据交换机，直到 $2.5s \pm 0.5s$ 才会发生上述情形^[3]。

表 1-1 中断时间影响分类

等 级	持 续 时 间	主要影响/特征
保护切换	<50ms	没有中断发生；服务瞬时干扰，1 个或 2 个错误秒，TCP 在一个错误帧后恢复，大多数 TCP 会话不受影响
1	50ms~200ms	小于 5% 声音频带中断，信令系统（SS7）切换，帧中继和 ATM 信元重路由可能开始
2	200ms~2s	TCP/IP 协议退避
3	2s~10s	所有电路交换服务中断，专线中断，潜在数据会话/X.25 中断，TCP 会话开始超时，网页不可用错误，路由器之间的 Hello 协议受影响
4	10s~5min	所有呼叫和数据会话终止，TCP/IP 应用层程序超时，大量用户开始尝试重拨/重新连接，路由器为失效链路分配 LSA，拓扑更新，整个网络范围开始再同步
不合需求	5min~30min	数字交换机背负沉重的“重新尝试”负担，对社会/经济有较小影响，显著的 Internet 掉线
不可接受	>30min	需向监管机构报告，社会影响较大，引发服务水平协议条款，社会风险：旅游预订、教育服务、金融服务、股市均受影响

在帧中继中，信元重路由过程会在 200ms 时开始，但是任何丢失数据的恢复，仍是通过更高层的数据协议处理。对 SONET 等级 7 号信令系统（SS7）会在中断 100ms 后对中断进行处理。

（3）当中断时间为 200ms~2s 时，对交换式话音服务来说没有新的影响出现。当中断达到 2s~10s 时，影响会更加严重，所有语音连接和数据会话都会断开。在 $2.5s \pm 0.5s$ 时，数字交换机会对故障状态进行响应，此时所有任意阶数字信号、专线、2Mb/s 拨号都将丢失连接。

（4）当中断时间达到几十秒时，网络性能会逐步恶化：IP 网络发现“Hello”协议失效后会尝试通过 LSA 洪泛重收敛它们的路由表。在电路交换层，大量的连接和会话开始中断并持续数分钟。即使恢复在 10s 后发生，也会有数以百万计的用户试图重新建立他们的连接，这会导致半同步过程的开始，该过程会导致许多大型数字交换系统在光缆切断后要面临 10s 到几分钟的软件崩溃和冷启动。中断本身可能并未影响交换机的稳定性，但大量的重新连接会使交换机崩溃。

（5）当中断时间超过 30min 时，对社会和经济的影响是十分严重的，应该呈报相关监管机构。如果中断发生在诸如警察、医疗、飞行控制和工业过程控制通信中，就会上升为健康和安全问题。

1.3 各层网络生存性设计理念

就像许多鲁棒系统一样，“纵深防御（Defence in Depth）”也是通信网络生存性的重要设计思路。将网络在逻辑上抽象为相对独立的若干个层次，对于我们讨论和研究针对其各层不同特征的生存性技术都具有极大的便利。

总的来说，生存性技术分为保护和恢复两大类。保护是指事先为业务分配好预留的保护资源，当故障发生时，业务可以由预留的保护资源承载。恢复是指并不事先为业务

分配预留的保护资源，当故障发生后，再动态地寻找网络中富余资源来承载受故障影响的业务。两者不仅是生存性技术的基本类型，也是各层生存性机制设计的指导思想。

1.3.1 网络生存性的分层

本节将介绍从物理层开始的一系列能有效抵抗网络损毁及其后续负面影响的基础技术。表 1-2 依据网络生存性工作小组的报告^[4]罗列了业务层、逻辑层、系统层和物理层分别可以采用的生存性技术。每层都有特定类型的业务单元提供给邻接上层。抽象分层模型的基本思想是每一层都向其相邻上层提供特定的服务，而无需知道下层如何实现其所提供的服务。在本例中每一层都向上层提供各种不同类型的容量单元，用来承担上一层中形成的流量或信号聚合。需要注意的是，虽然采用了分层的概念，但并不意味着每一层都必须使用生存技术并进行叠加。例如，系统层选择了环结构，逻辑层可以不采用任何生存性机制（这里的生存性机制不包括系统内部电路组件级所自带的元器件保护），反之亦然。此外，某些业务层网络会选择直接运行在物理层上，通过自适应路由来获得生存性。相比之下，某些物理层的措施必须随时就绪，以便为上层提供有效的生存性机制。通常所说的“传输网络”指的是将系统层和逻辑层看做一个整体。

表 1-2 基于生存性的网络分层架构视图

层次	组 件	服务和功能	生成的业务单元	提供的容量单位	一般的生存性技术
业务层	IP 路由器, LSRS 交换机, ATM 交换机, 智能复用/解复用器	电话和数据的电路交换, Internet, B-ISDN, 专用网络, 多媒体	OC-3, OC-12, STS-1s, DS-1s, DS-3s GbE 等	N/A	自适应路由, 业务分割, 程序重试
逻辑层	OXC, DCS, ATM VP X-连接	业务疏导, 逻辑传输配置, 带宽分配和管理	OC-48, OC-192, 波长信道, 波带	OC-3, OC-12, STS-1s, DS-1s, DS-3s GbE 等	网状网保护和恢复 DCS 环, P-cycles
系统层	SONET OC-n TM, ADMs, OADM s WDM 传输系统	10Gb/s~40Gb/s 的点 到点比特传输, P2P 光纤或波长	光纤, 光缆	OC-48, OC-192, 波长信道, 波段	1:N APS, 1+1 DP APS, 环
物理层	路权, 架空线, 光缆, 光缆管道等	物理传输连接介质	N/A	光纤, 光缆	物理封装, 物理多样性

1.3.2 物理层生存性机制

物理层有时也被称为 0 层，是构架网络的基础物理资源，如建筑、路权、光缆管道、缆线、计算机地宫等。在这一层，对生存性的考虑主要针对信号承载设备的物理保护，并确保物理层拓扑具有基本空间多样性以便上层生存性技术的应用。

1. 物理拓扑设计

当光缆被切断后，上层只能通过对载波信号进行重路由来恢复信号，因此，物理层必须存在物理分离路径，这是网络生存性最基本的条件，无法由其他层提供或者模拟。在光纤广泛应用之前，骨干网的传输大多是依靠点对点的模拟和数字微波无线电传输，

其物理拓扑并不需要分离路径。自包容 1:N APS 系统可以有效防止多径传播效应引起的信号衰减和单信道设备故障问题，但是对一个完全失效的系统来说，考虑恢复是没有意义的。微波信号塔本身就具有高度鲁棒性，普通故障很难“切断”两塔之间的自由空间信道。国家级规模的骨干网络往往有许多单独的连接节点，大致可以近似为一棵覆盖所有节点的最小生成树。但是，基于光纤的网络促使我们采用 Mesh 结构的物理拓扑，以保证任何光缆的切断不会导致某个节点被孤立。其演进过程如图 1-5 所示。

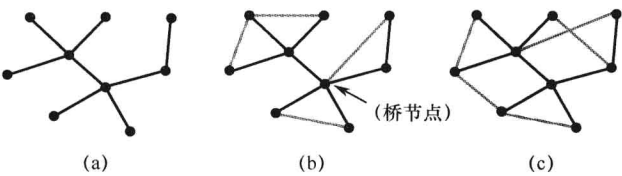


图 1-5 网络拓扑

(a) 树形主干网；(b) 双向连通拓扑；(c) 双连通拓扑。

从技术上讲，节点间的物理线路必须是双向连通或双连通的。在双连通网络中，每个节点对间都必须存在至少两条完全分离的路径（路径分离的相关知识见第 2 章）。双向连通是指所有节点对之间都存在线路分离路径，但在某些情况下两条路径可能存在公共节点。必须注意的是，这些拓扑演进到某种形式的封闭图的过程本身，并没有考虑恢复策略的速度和类型。但在拓扑上每个节点对之间必须至少存在两条物理分离路径，才可能实现基于多路由保护的自动恢复。

但在实践中，通过增加冗余光缆来增强物理层多样性是非常昂贵的。一个生成树只需要 $N-1$ 条边覆盖 N 个节点，而一个双连通图至少需要 N 条边（更普遍的情况是将边数提高到 $1.5N$ 以便基于环或者网状结构的抗毁传输网络具有合理的连通性和最短距离拓扑）。因此，向 Mesh 网络演进的主要资金花费集中在物理层，以确保更高层可以进行生存性机制的操作。由此可见，物理拓扑的优化是现代网络运营商所面临的根本问题之一。

2. 物理层的完整多样性

与物理层多样性研究相关的是物理结构能否构成逻辑保护/恢复路径，以确保从物理层映射到逻辑层的多样性。例如，怎样知道 SONET 环的双向链路和街道两旁的光缆是如何对应的？或许它们位于一条街上但是在两个街区后才共享同一个光缆管道。这就是所谓的 SRLG。SRLG 指共享相同的物理资源（也就是具有共同失效风险）的一组链路。物理资源可以包括光纤、光缆、管道甚至某个区域。每个 SRLG 都有唯一的标识，称为 SRLG 标识。网络管理者通过指定光纤链路属于不同的 SRLG 标识来满足不同用户对可靠性的要求。对物理网络来说，把逻辑路径映射到物理结构是一项艰巨的工程。但我们必须把 SRLG 纳入考虑范围，因为它涉及到逻辑层服务或者系统层实现最终能否在底层物理结构上得到支持。

对于运营商而言，考虑 SRLG 是一个巨大的挑战。因为光缆是在过去几十年间陆陆续续铺设完成的，也许我们能知道光缆的终端位置，但如何分辨哪根光缆对应哪根管道或电线杆却是个难题。因此，许多电信公司在地理信息系统和地面实况监测上投入巨资，以确保所有物理设备细节都被实时记录。没有物理层多样性的保证，任何基于冗余路径的主动保护或恢复的机制都是不堪一击的。