

MOBILE INTERNET
MULTI - PATH TRANSMISSION TECHNOLOGY

移动互联网 多路径传输技术

◎ 许长桥◎ 著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

MOBILE INTERNET
MULTI - PATH TRANSMISSION TECHNOLOGY

移动互联网 多路径传输技术

◎ 许长桥◎著



人民邮电出版社
北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

移动互联网多路径传输技术 / 许长桥著. -- 北京 :
人民邮电出版社, 2019.1
ISBN 978-7-115-49131-2

I. ①移… II. ①许… III. ①移动网—数据传输技术—研究 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第186994号

内 容 提 要

本书对现有多路径传输协议及其在移动异构网络环境中的应用与优化进行了介绍。其中,第1章对多路径传输协议的诞生背景及发展状况进行了概述。第2章详细介绍了当前典型的多路径传输协议及其存在的不足。第3章针对移动异构网络环境下路径质量动态变化的问题,介绍了路径感知的自适应多路径并行传输方案。第4章针对多路径传输中信息感知途径匮乏的问题,介绍了友好性驱动的跨层多路径并行传输方案。第5章和第6章针对多路径传输中的数据乱序问题,结合网络编码技术,介绍了两种不同的网络编码传输方案。第7章对多路径传输拥塞控制问题进行了细致描述,并介绍了基于路径感知与流体模型的两种拥塞控制方案。

本书既可作为计算机、网络、通信等方向研究生教材或相关专业本科生选修教材,也可作为相关IT从业人员的技术参考材料。

-
- ◆ 著 许长桥
责任编辑 陈娟
责任印制 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京市艺辉印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 11 2019年1月第1版
字数: 215千字 2019年1月北京第1次印刷
-

定价: 79.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前言

随着科学技术的发展,智能手机、平板电脑、可穿戴设备等越来越多的移动终端走进了我们的生活。人们可以随时随地进行照片分享、社交聊天、视频观看、在线游戏等活动,全天性、泛在接入的移动互联网成为未来网络发展的主题。但在移动网络环境下,传统单路径传输方案往往面临带宽资源受限、链路动态变化等问题。而多路径传输能够利用通信终端的多接口特性,在一个连接中建立多条子路径,实现多网络的带宽聚合,同时路径之间互为备份,相比单路径传输能有效提高传输效率与可靠性,是未来移动互联网的重要组成部分。因此,探讨移动网络环境下多路径传输技术具有重要意义,本书以多路径传输协议为基础,对多路径传输的技术知识及面临的挑战进行了阐述。

本书以作者自身科研项目为基础,针对现有多路径传输协议在移动异构网络环境下存在的问题,从拥塞控制、数据调度、友好性分析等多个角度,提出了高效的多路径传输协议原理与方案。同时,本书还对各种方案进行了实验与验证,注重基础理论与工程技术的相互结合,以及通过图表等信息直观地展现给读者,使内容具有易读性。本书既可作为计算机、网络、通信等方向研究生教材或相关专业本科生选修教材,也可作为相关IT从业人员的技术参考材料。

本书主要由许长桥撰写完成。在撰写过程中参考了课题组前期研究成果及相关博士生、硕士生论文。特别感谢为此书撰写做出贡献的秦久人、赵佳、黎卓锋、刘天娇、王鹏等研究生。本书由国家自然科学基金优秀青年基金资助项目(No.61522103)资助出版。

由于作者水平有限,加之撰写时间仓促,书中难免有错误与不足之处,恳请读者批评指正。

许长桥

2018年7月于北京邮电大学

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 传输协议概述	1
1.2 网络移动化趋势	3
1.3 传输大数据特性	3
1.4 未来网络发展方向	4
1.5 多路径传输的发展	5
1.6 本章小结	6
参考文献	7
第 2 章 典型多路径传输协议	8
2.1 SCTP 与 CMT-SCTP	8
2.1.1 协议栈	8
2.1.2 数据调度机制	9
2.1.3 拥塞控制机制	10
2.2 MPTCP	11
2.2.1 协议栈	11
2.2.2 MPTCP 数据调度机制	11
2.2.3 MPTCP 拥塞控制机制	12
2.3 多路径传输协议存在的问题	13
2.3.1 数据调度问题	13
2.3.2 拥塞控制问题	14
2.4 本章小结	14
参考文献	15
第 3 章 路径感知的自适应多路径并行传输	16
3.1 研究背景	16
3.1.1 现存问题	16

3.1.2	研究现状	17
3.2	研究方案	19
3.2.1	总体框架	19
3.2.2	路径质量评估	21
3.2.3	数据分发算法	28
3.2.4	重传策略管理	30
3.3	仿真结果与性能分析	32
3.3.1	测试环境	32
3.3.2	仿真结果及分析	33
3.4	本章小结	39
	参考文献	39
第4章	友好性驱动的跨层多路径并行传输	42
4.1	研究背景	42
4.1.1	现存问题	42
4.1.2	研究现状	44
4.2	研究方案	45
4.2.1	系统概述	45
4.2.2	链路层有效信噪比计算	47
4.2.3	传输层参考往返时延测量	48
4.2.4	传输层传输速率估计	50
4.2.5	传输层传输带宽估计	50
4.2.6	友好性流量控制	52
4.2.7	路径质量跨层评估	55
4.2.8	多路径并行数据调度	56
4.2.9	分组丢失分析和重传调整	58
4.3	仿真结果和性能分析	59
4.3.1	数据传输吞吐量测试实验	59
4.3.2	TCP友好性的测试实验	65
4.4	本章小结	71
	参考文献	72
第5章	融合网络编码的多路径并行传输	75
5.1	研究背景	75
5.1.1	现存问题	75

5.1.2	研究现状	76
5.1.3	网络编码技术介绍	77
5.2	研究方案	85
5.2.1	系统概述	85
5.2.2	组长度的更新	87
5.2.3	网络编码过程	90
5.2.4	混合快速数据分发	92
5.2.5	基于组的传输管理	94
5.3	仿真结果与性能分析	97
5.3.1	参数控制的双路场景	97
5.3.2	实际网络场景	101
5.3.3	关于开销的讨论	106
5.4	本章小结	107
	参考文献	107
第 6 章	基于管道网络编码的多路径并行传输	112
6.1	研究背景	112
6.1.1	现存问题	112
6.1.2	研究现状	113
6.1.3	现有方案的缺陷	115
6.2	研究方案	116
6.2.1	整体框架	116
6.2.2	管道化编码的多路径传输机理	118
6.2.3	基于经济编码系数规则的编码和解码过程	119
6.2.4	组大小和冗余计算	122
6.2.5	基于路径质量的数据分发机制	124
6.2.6	拥塞控制和重传策略	128
6.3	仿真结果和性能分析	129
6.3.1	测试环境	130
6.3.2	仿真结果分析	131
6.4	本章小结	136
	参考文献	136
第 7 章	多路径传输中的拥塞控制	141
7.1	研究背景	141

- 7.1.1 拥塞问题141
 - 7.1.2 拥塞控制目标143
 - 7.1.3 研究现状143
- 7.2 基于路径感知的 AIMD 拥塞控制146
 - 7.2.1 算法简介146
 - 7.2.2 路径质量评估147
 - 7.2.3 拥塞控制算法设计149
 - 7.2.4 性能分析151
- 7.3 基于流体模型的拥塞控制154
 - 7.3.1 算法简介154
 - 7.3.2 公平性设计156
 - 7.3.3 拥塞平衡设计158
 - 7.3.4 性能分析159
- 7.4 本章小结165
- 参考文献165

第 1 章

概 述

随着科学技术的发展，以互联网为代表的信息网络已经逐渐渗透到当今社会的各个领域，成为国家发展和社会进步的重要支柱。而数据传输控制作为网络通信的基础，更是互联网发展的重中之重。在 TCP/IP 网络模型中，用户间端到端的通信控制由传输层负责。传输层向上为用户屏蔽网络核心细节，并提供一条端到端的逻辑信道；向下对不可控的网络环境进行探测与调节，通过相关传输协议，为用户提供更高质量的传输服务。本章对传输层协议进行了概述，并结合移动应用场景、大数据特性以及新型网络环境对多路径传输协议的发展进行了展望。

1.1 传输协议概述

在现有的 TCP/IP 体系结构中，传输协议工作在传输层 (Transport Layer)，并且只存在于主机的协议栈，其主要作用是规范进程间的通信规则。由于底层网络只提供尽力的传输服务，且对于用户来说是不可控的，因此，需要利用传输协议对端到端的通信过程进行整体控制，解决底层网络传输过程中存在的乱序、分组丢失等问题，以保证传输的服务质量。目前，两大最主要的传输协议为 TCP (Transmission Control Protocol) 和 UDP (User Datagram Protocol)。下面，对这两种协议进行介绍。

1. TCP

TCP 即传输控制协议，是目前互联网中应用范围最广的传输协议，由 IETF 的 RFC 793^[1]进行标准化，它具有以下几个特点。

① TCP 是面向连接的传输层协议。在应用程序使用 TCP 进行通信之前必须通过三步握手来建立连接。在数据传输结束之后，也要进行握手，释放 TCP 连接。

② 一个 TCP 连接只能有两个通信端点，提供一对一的传输控制服务。

③ TCP 提供完全可靠的传输服务。通过分组编号和确认、重传机制, TCP 传输的数据能够无差错、不丢失、不重复并且按序到达接收方。

④ TCP 提供全双工通信。TCP 的通信双方都设置有发送缓存和接收缓存, 用来临时存放双方的通信数据, 能够在任何时候发送或接收数据。

⑤ TCP 是一种面向字节流的传输协议。其中, “流”指的是从进程流入或流出的字节序列。“面向字节流”是指虽然应用程序以数据块的形式与 TCP 进行交互, TCP 将所有的应用数据看成无结构的字节流。TCP 不能保证接收方应用程序收到的数据块和发送方应用程序发出的数据块具有对应的关系, 但能保证接收方收到的字节流与发送方发出的字节流完全相同。

TCP 通过一个四元组来标识每一个传输连接, 该四元组包括通信双方主机的 IP 地址及通信进程的端口号。TCP 将所有数据分组编号后按顺序发出, 利用确认与分组丢失重传机制保证数据的可靠传输。同时, TCP 的拥塞控制机制使其不会无休止地向网络发送数据, 保证了其对网络环境的友好性。因此, TCP 被广泛地应用到对传输可靠性及质量要求高的场合。

2. UDP

UDP 即用户数据报协议, 能够为实时性要求高但可靠性要求相对较低的应用提供传输服务, 由 IETF 的 RFC 768^[2] 标准化。它具有以下几个特点。

① UDP 是无连接的, 在发送数据之前不需要建立连接, 因此, 减少了连接维护开销和发送数据之前的时延。

② UDP 提供尽最大努力的交付, 并不保证数据的可靠交付, 因此, 主机不需要维护复杂的数据传输状态。

③ UDP 是面向分组的传输协议。UDP 对应用层交付的数据块既不合并也不拆分, 而是保留这些数据块的边界, 在添加首部形成传输层分组后就交付给 IP 层。因此, 应用程序在使用 UDP 进行数据传输时, 必须选择合适的数据块。数据块过大, 传输层分组会在 IP 层进行分片, 数据块过小, 会使首部开销与有效载荷的比率增大, 两者都会降低传输效率。

④ UDP 没有拥塞控制, 因此, 即使网络出现拥塞, 发送方的数据发送速率也不会降低。该特性能够很好地满足某些实时应用的传输需求, 能够以恒定速率发送数据, 却降低了 UDP 对网络环境的友好性, 容易加重网络的拥塞。

⑤ UDP 支持一对一、一对多、多对一和多对多的交互通信方式。

⑥ UDP 的首部开销小。由于 UDP 只提供尽最大努力的交付, 没有相关控制机制, 因此, 首部只有 8 B, 比标准 TCP 首部的 20 B 要短。

UDP 开销小, 数据发送速率稳定, 很适合用来传输对实时性要求高的数据, 如实时视频数据。但是, UDP 缺乏可靠性控制机制, 因此, 不适合传输对可靠性要求高的数据, 如办公文件。此外, 由于 UDP 缺少相关的拥塞控制机制, 一旦网

络发生拥塞，UDP 的使用往往会加重拥塞，最终导致整个网络瘫痪。

TCP 和 UDP 是 TCP/IP 体系建立之初被标准化的协议，至今已有几十年的历史。随着信息技术的快速发展，如今的互联网相比于诞生之初的互联网已经发生了很大的变化，在规模、组成以及用户需求方面都展现出了众多新特性。因此，传输协议的发展只有适应网络的新特性，才能为用户提供更好的服务，并推动互联网的进一步发展。

1.2 网络移动化趋势

在早期的互联网中，终端多以固定的计算机为主，不同的终端之间通过连接的网线进行数据交换与文件传输。然而，近年来，随着移动通信技术的发展以及智能设备在世界范围内的普及，用户可以随时随地地接入网络，分享和获取自己感兴趣的内容与服务，移动互联网正逐渐取代固定以太网成为人们上网的最主要方式。

中国互联网络信息中心（CNNIC）2017 年 1 月发布的第 39 次《中国互联网络发展状况统计报告》^[3]显示，截至 2016 年 12 月，中国网民规模达到 7.31 亿人，其中，手机网民规模达 6.95 亿人，占整体网民规模的 95.1%，只使用手机上网的网民达到 1.27 亿人，占整体网民规模的 24.5%。思科公司 2017 年 2 月发布的《2016–2021 年全球移动互联网发展趋势报告》^[4]中指出 2016 年全球移动设备及连接达到 80 亿，并预测到 2020 年该数字将达到 116 亿，平均年增长率达 8%。海量的移动用户与移动传输需求，给传统的网络传输设计带来巨大的挑战。

以目前网络中应用最广泛的 TCP 为例，其最初的设计面向的是固定以太网，基于固定的 IP 地址，将所有的分组丢失都当作拥塞分组丢失。因此，在节点移动性强、随机分组丢失严重的移动网络环境中 TCP 表现不佳。面对愈加明朗的通信终端移动化趋势，传输协议应当主动适应网络的移动新特性，在复杂环境中为用户提供可靠、高速的服务。

1.3 传输大数据特性

自 1969 年全球第一个分组交换网络 ARPANET 诞生以来，互联网发展十分迅速，网络规模不断扩大，用户规模激增。特别是近年来，随着社交媒体以及移动视频业务的发展，用户平均网络使用流量呈现爆炸式增长。互联网正进入大数据时代。

据统计, Facebook 管理了超过 400 亿张图片, 数据总量超过 100 PB^{注1}, 每天发布的新消息达 60 亿条, 所需处理信息总量超过 10 TB; Twitter 一天产生 1.9 亿条微博; Facebook 有 40 亿的信息扩散, Google 一天处理的数据量超过 25 PB; YouTube 一天上传的视频总时长为 50 000 h... 思科公司统计的可视网络指数(VNI, Visual Networking Index)显示全球互联网总流量在 2016 年跨过 1 ZB 大关, 并将在 2019 年再翻一番。

海量的数据传输需求给当前的数据传输体系带来了巨大的挑战。为了满足用户日益增长的带宽需求, 除了对底层网络的基础设施进行升级换代, 提高系统固有承载能力之外, 对传输协议的更新与改进也是一种重要的解决方案。在现有基础设施上, 改进的数据调度与拥塞控制算法, 甚至设计新的传输协议来提高系统的可用带宽。

1.4 未来网络发展方向

随着通信技术的发展、用户规模的增加以及网络业务种类的多样化, 以 TCP/IP 为基础的传统分层网络架构越来越难满足人们的需求。因此, 各国的专家学者正在积极探索新型的网络结构, 其中比较典型的有以下 3 个。

1. 信息中心网络 (ICN, Information Centric Networking)

随着互联网承载内容的飞速发展, 用户访问网络的主要目的已经从通信逐渐转化为海量的内容获取。例如, 在网络在线视频观看过程中, 受用户的兴趣度影响, 热点视频往往被反复传输, 这既浪费了资源, 也影响了服务质量。为了解决这个问题, 学术界提出未来网络应该从当前以“位置”为中心的体系架构向以“内容”为中心的架构演进, 即网络的基本行为模式应该是对特定内容的请求和获取, 而非实现端到端通信, 这类网络体系架构统称为 ICN^[5]。ICN 的研究主要起源于美国和欧盟。其中, 美国的主要研究项目包括 CCN、NDN、DONA 等。欧盟的主要研究项目包括 NetInf、PURSUIT/PSIRP 等。

2. 软件定义网络 (SDN, Software Defined Network)

当前的互联网采用了分布式的架构, 在这样的框架下, 任何网元增加一种新协议时, 该协议管理域中的其他网元也要做出相应的结构调整, 这极大限制了网络协议的可扩展性。因此, 更加灵活的 SDN 架构应运而生^[6]。在 SDN 中, 控制功能不再局限于路由器中, 只有设备的生产厂商才能编程和定义, 用户可以通过控制器, 对网络协议进行扩展与编程。SDN 的本质是一种数据平面与控制平面分

注 1 数据的衡量单位由小到依次依次为 KB、MB、GB、TB、PB、EB、ZB, 它们之间的转换关系为 1 024 KB=1 MB; 1 024 MB=1 GB; 1 024 GB=1 TB; 1 024 TB=1 PB; 1 024 PB=1 EB; 1 024 EB=1 ZB。

离, 并可直接对控制平面编程的新型网络架构。数控分离将有助于底层网络设施资源的抽象和管理视图的集中, 从而以虚拟资源的形式支持上层应用与服务, 实现更好的灵活性与可控性。

3. 数据中心网络 (DCN, Data Center Network)

为了更好地在网络中传输、计算和存储数据信息, 人们将众多计算机系统和其他配套设备 (如通信和存储系统) 组成数据中心。数据中心内的流量呈现出典型的交换数据集中、传输流量增多等特征, 传统网络结构难以满足数据中心的众多要求, 数据中心网络在这样的背景下诞生。在数据中心网络中, 计算机设备之间通过 Fat-Tree 和 VL2 等拓扑结构进行组织, 以满足网络的大规模、高扩展、高健壮、低配置开销、服务器间高带宽的要求。

新型网络较传统网络在网络结构以及功能需求上都有很大变化, 传统的传输协议往往无法直接移植到新的网络协议中。因此, 在未来传输协议演化中, 除了对协议本身功能进行改进之外, 还应充分考虑新型网络的体系结构特点, 以适应未来的网络环境。

1.5 多路径传输的发展

随着新型网络结构的出现以及移动互联网大数据特性的明朗化, 传统以 TCP/UDP 为主的单路径传输协议难以满足网络环境与用户需求的改变, 于是新型的多路径传输协议被提出。多路径传输协议能够利用通信终端的多个网络接口 (如以太网、4G/5G 网络、WLAN 和卫星通信等), 建立一个拥有多条子路径的端到端传输连接。相比于单路径传输协议, 多路径传输协议在传输速率、可靠性和安全性等方面具有很大优势。

多路径传输能够同时利用多个网络中的空闲带宽, 有效提高传输的吞吐量, 适应网络的大数据需求。同时, 各条路径之间互为冗余备份, 有效提高了数据传输的可靠性与安全性。此外, 多路径传输还可以在网络拥塞时实现多网络间的负载均衡, 有效地应对移动通信中的随机分组丢失及路径质量动态变化的问题。目前, 典型的多路径传输协议主要包括: 流控制传输协议 (SCTP, Stream Control Transmission Protocol)^[7]、多路并行流传输控制协议 (CMT-SCTP, Concurrent Multipath Transmission Using SCTP)^[8]以及多路传输控制协议 (MPTCP, Multipath Transmission Control Protocol)^[9]。

1. SCTP

SCTP 是由 IETF SIGTRAN 工作组在 RFC 4960^[7]中定义的, 最初的目的是在 IP 网络上传输 SS7 信令。与 TCP 类似, SCTP 也是面向连接的, 它在对等的 SCTP

用户之间提供可靠的面向用户消息的传输服务。在 SCTP 中, TCP 的连接被引申为偶联 (association), 但其概念要比 TCP 中的连接概念含义更广。SCTP 利用通信双方的多接口特性, 能够在一个偶联中建立多条子路径。但是, 当前 SCTP 只允许使用其中一条路径来传输数据, 这条路径称为主路径 (Primary Path), 其他路径称为备选路径 (Secondary Path)。默认情况下, 数据发送端总是使用主路径发送数据; 只有在主路径失效的情况下, 才会使用备选路径传输数据。

2. CMT-SCTP

CMT-SCTP 是在 SCTP 基础上设计的支持多路径并行传输的协议, 由 Iyengar 等^[8]提出。CMT-SCTP 利用 SCTP 多接口特性将数据在端到端的多条路径进行分发传输, 实现了负载均衡与带宽聚合。但是, 当路径间的性能差异较大时, CMT-SCTP 也会带来数据分组的乱序问题。乱序问题不仅会引起发送方不必要的快速重传, 还会导致发送方拥塞窗口的增长过度保守, 严重影响传输吞吐量。此外, 传统 SCTP 采用延迟确认机制, 每隔两个分组才发送一个 SACK, 这可以有效减少网络上 ACK 流量, 但必须是在接收端 TSN 连续的情况下才有效。当 CMT 中的接收方出现大量不连续的 TSN 时, 延迟确认算法很少得到触发, 对不连续的 TSN 每次都要立即确认, 这增大了 ACK 数据量, 降低了传输效率。

3. MPTCP

MPTCP 是标准 TCP 的一种多路径扩展。由于 MPTCP 以 TCP 为基础, 其实现不需要对当前网络设施和编程接口做出太大改动, 对当前网络表现出良好的兼容性。2013 年 6 月, IETF 在 RFC 6824 中将 MPTCP 作为了试验的标准, 并成立了专门的工作组对 MPTCP 开展研究^[9]。2013 年 7 月, IETF 的 MPTCP 工作组给出了 MPTCP 的 5 种实现: 比利时鲁汶大学的 Linux 内核实现和 Android 内核实现, 斯威本科技大学的 FreeBSD 实现, 苹果公司在 iOS 7 及以上版本和 mac OS X 10.10 以上版本的操作系统中的实现。2014 年 7 月, 甲骨文公司宣布在 Solaris 操作系统上实现了 MPTCP。与 SCTP 和 CMT-SCTP 相比, MPTCP 虽然较晚被提出, 但因其具有良好的可实施性, 应用前景十分广阔。

1.6 本章小结

随着新型网络架构的出现与移动智能终端设备的普及, 高效、便捷、稳定的移动互联网成为未来互联网的发展方向。随时随地的泛在用户接入, 导致了网络业务类型的多样化与网络流量的指数级增长, 也随之给传统 TCP/IP 体系下的单路径传输协议带来巨大挑战。因此, 借助终端多接口特性实现端到端多路耦合的多路径传输协议应运而生。

本章从传输的基本概念入手,介绍了其在互联网通信过程中的重要作用及地位,还结合网络的移动性、大数据特性以及新型网络架构对传输协议的多路径趋势进行了阐述。总体而言,多路径传输协议能够利用网络中的空闲带宽,有效提高传输的吞吐量,满足用户日益增长的带宽需求。此外,多路径之间互为备份,能够在实现负载均衡的同时提高传输的顽健性,因而可以更好地适应异构移动网络的通信场景。在可以预见的未来,多路径传输协议必将得到更加广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] POSTEL J. Transmission control protocol[Z]. IEEE RFC 793, 1981.
- [2] POSTEL J. User datagram protocol[Z]. IETF RFC 768, 1980.
- [3] 中国互联网信息中心. 第 39 次中国互联网络发展状况统计报告[R].北京: CNNIC, 2016.
- [4] Cisco. VNI Mobile Forecast (2015 – 2020) [R]. Cisco, 2016.
- [5] JACOBSON V, SMETTERS D K, THORNTON J D, et al. Networking named content[C]//ACM CoNEXT. 2009: 1-12.
- [6] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 69-74.
- [7] STEWART R R. Stream control transmission protocol[Z]. IETF RFC 4960, 2007.
- [8] IYENGAR J R, AMER P D, STEWART R. Concurrent multipath transfer using SCTP multihoming over independent end-to-end paths[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(5): 951-964.
- [9] FORD A, RAICIU C, HANDLEY M, et al. TCP extensions for multipath operation with multiple addresses[Z]. IETF RFC 6824, 2013.

第 2 章

典型多路径传输协议

近年来，随着移动智能设备的发展，越来越多的终端配备了多个网络接口，使通信节点间通过多接口同时建立多条路径成为可能，多路径传输协议也应运而生。SCTP 是最早的多路径传输协议，在一个 SCTP 偶联中可以存在多条路径，但同一时刻只有一条路径被用来传输数据，其他路径都作为备份路径。其后的 CMT-SCTP 对 SCTP 进行了优化，允许使用多条路径并行传输数据。SCTP 是一种全新设计的网络协议，虽然能够很好地提高传输效率，但在工程实现中需要对现有网络结构进行较大规模的调整，因此，其主要应用于多路径传输理论研究中，为后续多路径传输协议的设计奠定了理论基础。近年来，以 TCP 为基础的 MPTCP 被提出，其对当前 TCP/IP 网络具有良好的兼容性，易于大规模部署，具有重要的工程价值，因此，得到了越来越多专家学者的关注。本章对典型的多路径传输协议进行介绍，并分析当前多路径传输中存在的主要问题。

2.1 SCTP 与 CMT-SCTP

2.1.1 协议栈

在 2000 年，互联网工程任务组（IETF, Internet Engineering Task Force）成立的工作组 SIGTRAN 提出了 RFC 2960^[1]，规定了 SCTP 的数据格式和处理流程，实现了在 IP 网络中传输公用开关电话网络的信令消息，后来人们发现 SCTP 也可以使用在 IP 网络中传输其他信息。鉴于这个原因，在 2007 年，IETF 的工作组 TSVWG 提出了 RFC 4960^[1]，使 SCTP 成为与 TCP 和 UDP 处在相同协议栈位置的传输层协议。由于 CMT-SCTP 是 SCTP 的多路并行扩展协议，所以两者拥有相同的协议栈，如图 2-1 所示。

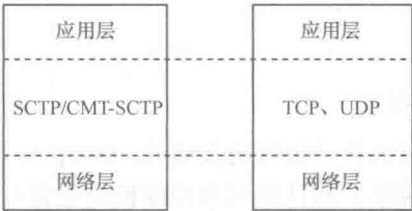


图 2-1 SCTP 与 CMT-SCTP 在协议栈中的位置

2.1.2 数据调度机制

由于 SCTP 默认只在主路径上发送数据，其他路径只是作为备份路径，所以，不存在子路径间的数据调度与平衡。CMT-SCTP 允许多条子路径并行传输数据，其默认的数据调度算法是轮询（Round Robin）算法^[2]。

设一个具有 n 条子路径 CMT-SCTP 偶联，轮询调度算法执行过程如图 2-2 所示。轮询调度算法依次向缓存有空余的子路径发送数据，直至数据全部发送完毕。轮询算法虽然实现简单，但并没有考虑子路径之间带宽、时延、分组丢失等特性差异，容易造成接收方缓存阻塞、传输拥塞等问题，影响系统整体的传输效率。

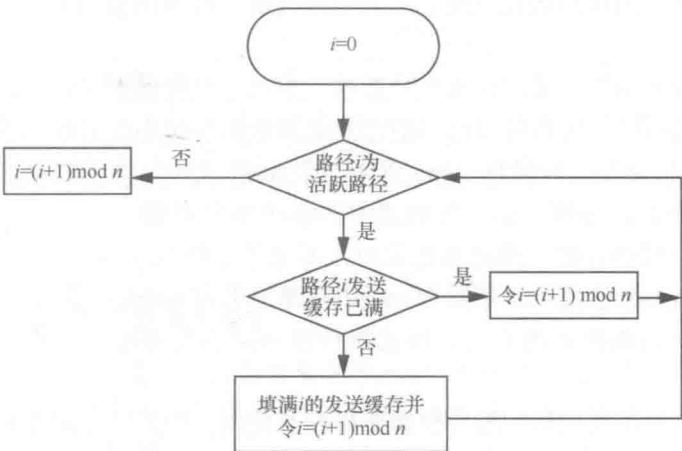


图 2-2 轮询调度算法

此外，一些专家学者还提出了基于带宽估计的数据调度算法^[3-4]。该类算法一般会对每条子路径的可用带宽进行估计，并为其赋予相应的权值，最终根据不同路径的承载能力对数据分组进行加权分配。基于带宽估计的数据调度算法相比轮询调度算法能够实现路径间负载的均衡，且在一定程度上缓解传输过程中的拥塞问题。但是，由于其仍然缺乏对子路径传输时延与分组丢失的考量，无法解决接