

清华大学

计算机系列教材

崔勇 吴建平 著

下一代互联网与IPv6过渡



清华大学出版社

内容简介

清华大学

计算机系列教材

崔勇 吴建平 著

下一代互联网与IPv6过渡



TN915.04-43

15



北航

C1725423

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

基于 IPv6 技术的下一代互联网解决了全球 IPv4 地址空间耗尽的问题,使其成为业界关注的焦点,IPv4 向 IPv6 平滑过渡成为决定下一代互联网成功与否的关键。

本书作者经过多年研究和实践,深入探讨了 IPv4 向 IPv6 过渡的各类技术方案,全面介绍 IPv6 过渡技术近年来的发展情况,并重点讲述了国际首创的 4over6 隧道过渡技术。全书共分为 10 章,第 1 章~第 3 章讲述 IPv6 及过渡基础知识;第 4 章和第 5 章阐述各类过渡技术,包括双栈、翻译和隧道技术,并分析不同过渡技术特点、性能和安全等优劣势;第 6 章和第 7 章分别讲解主干网和接入网隧道技术,阐述了 4over6 隧道过渡技术的基本原理和重要作用;第 8 章和第 9 章分别讲述过渡技术关键问题和过渡应用场景;第 10 章讲述下一代互联网现状及未来发展趋势。

本书适合作为高等院校计算机专业、通信工程专业高年级本科生、研究生的教材,也可供对下一代互联网感兴趣的科研工作者和工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

下一代互联网与 IPv6 过渡/崔勇,吴建平著.--北京:清华大学出版社,2014

清华大学计算机系列教材

ISBN 978-7-302-35462-8

I. ①下… II. ①崔… ②吴… III. ①计算机网络—通信协议—高等学校—教材 IV. ①TN915.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 023038 号

责任编辑:白立军

封面设计:常雪影

责任校对:李建庄

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:16

字 数:399 千字

版 次:2014 年 4 月第 1 版

印 次:2014 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:34.50 元

序

随着互联网规模的急剧增长,IPv4 地址枯竭问题日益严重。IPv6 能够解决 IPv4 地址资源不足的问题,推进了下一代互联网的发展。由于 IPv6 协议与 IPv4 协议不兼容,IPv6 过渡面临着编址异构、语义迥异、路由隔离、规模巨大等诸多技术难题,同时还要保证过渡对用户和应用透明。IPv6 过渡成为全球公认的下一代互联网发展的重大技术难题。

目前世界主要国家积极推动 IPv6 的发展,以求在新一轮信息产业竞争中赢得主动,谋求更大经济效益和更高战略地位。面对信息产业发展的重要战略时机,我国发布下一代互联网“十二五”发展意见,并将 IPv6 下一代互联网列入“国家战略性新兴产业”。国务院部署发展下一代互联网产业时特别指出:要加快 IPv4 向 IPv6 的平滑演进。

清华大学下一代互联网 4over6 过渡技术研究组,很早就开始积极推进 IPv6 过渡技术的发展,承担国家下一代互联网示范工程 CNGI 相关科研项目,硕果累累。该研究小组于 2002 年首次提出 4over6 过渡思想,并在通用 4over6 过渡体系结构、路由映射、异构组播和动态接入等关键技术上取得了重要突破,成为“国际首创,总体技术达到国际领先水平”的 IPv6 过渡技术。该研究组主导制定多项 IETF 国际标准 RFC。所形成的 IPv6 过渡技术吸引了法国电信和德国电信等运营商积极参与制定后续 IPv6 标准,华为和 Juniper 等厂商也相继研发相应的 IPv6 过渡网关或 IPv6 路由器过渡功能部件,并应用于 CNGI-CERNET2 主干网、百所高校校园网、中国电信试验网等。该研究组的相关成果荣获了 2013 年度国家技术发明二等奖。

目前市面上有关 IPv6 的书籍很多,但多为 IPv6 具体协议的描述,或是繁多过渡技术的简要介绍,缺乏对过渡整体架构的分析。本书以 IPv6 具体协议为基础,从过渡关键技术要素出发,深入分析了 IPv6 过渡整体架构及其核心要素,全面阐述各类过渡技术,并重点探讨了 4over6 主干网及接入网技术,将成为引领过渡技术的重要信息和学术资源。本书内容深入浅出,知识层次清楚明了,适合广大与 IPv6 技术相关的科研工作者和工程技术人员阅读。

作者多年深入研究 IPv6 过渡技术,形成了先进的成果,积累了丰富的经验。本书是他们多年研究成果的结晶。以期帮助广大读者全面掌握 IPv6 过渡技术,深刻理解 IPv6 演进路线。相信本书会给广大读者带去收获!



中国工程院院士

中国下一代互联网示范工程 CNGI 专家委员会主任

2014 年 1 月

前言

互联网已成为人类通信史上的里程碑。作为互联网协议簇的核心,IPv4 取得了巨大成功。近些年来,随着互联网规模爆炸式地增长,互联网对 IP 地址的需求越来越迫切,而 IPv4 地址全部耗尽已经成为不争的事实,这严重制约了互联网的发展。IPv6 适时而生,它具有几乎无限的地址空间,迅速成为亿万用户、广大网络运营商、设备供应商和内容服务商的聚焦点。而 IPv6 协议与 IPv4 协议不兼容,做好基于 IPv6 下一代互联网的平稳过渡,具有重要的社会价值和现实意义。IPv6 过渡场景繁多复杂,技术方案缺乏总体架构,各类 IPv6 过渡单元技术优劣势并存,使得 IPv6 过渡技术面临着各方面巨大的挑战。为此,许多互联网研究院所及相关专家学者积极开展对 IPv6 过渡技术研究。

由于 IPv6 过渡技术难度较大,现有相关书籍大部分是对 IPv6 具体协议或传统 IPv6 过渡技术的描述,无法满足业界对 IPv6 过渡技术的实际需求。作者依托国家下一代互联网示范工程 CNGI,参与了 IPv6 过渡技术的研究与应用,对各类过渡技术有着较为深刻的理解。本书内容涉及对整体过渡框架的分析,梳理各类过渡技术之间的相互依存关系,阐述前沿过渡技术 4over6,具有丰富的研究成果,并可从参考文献中获取最新技术进展。本书是作者多年来对 IPv6 过渡研究经验的凝练和总结,力图提供给业界准确、全面、权威的 IPv6 过渡技术知识,为推进我国 IPv6 商用步伐提供支持。

全书共分为 10 章,是以 IPv6 具体协议为基础,通过对过渡技术整体框架的理解,细致分析了双栈过渡技术、翻译过渡技术和隧道过渡技术。本书详细介绍首创的 4over6 隧道过渡技术,该技术已经成为 IETF 重点推荐的 IPv6 过渡技术,得到了众多国内外网络运营商、设备商的广泛支持。通过介绍过渡技术关键算法,加强读者对 IPv6 过渡技术的理解。最后分析了 IP 过渡场景,并对下一代互联网的研究做了总结和展望。

第 1 章主要介绍下一代互联网与 IPv6 技术。该章首先介绍互联网的发展历史,从历史中体会互联网发展给人类带来的巨大进步。接下来介绍 IPv4 的发展现状及出现的问题,如何解决 IPv4 地址耗竭问题成了互联网发展的关键因素之一。本章说明发展以 IPv6 为核心的下一代互联网是解决 IPv4 问题重要的,同时也是相对成熟的手段之一。通过阅读本章,使读者了解发展 IPv6 下一代互联网的重要意义。

第 2 章主要介绍 IPv6 基础知识。作为全新的协议,IPv6 与 IPv4 相比,在地址及报文格式、地址配置方式上有了较大改进,针对 IPv6 对路由协议及组播协议也进行了一些调整。本章首先介绍上述内容,并深入讲述了移动 IPv6 技术、IPv6 安全技术和 IPv6 支撑系统,进一步加深读者对 IPv6 协议的全面认识。

第 3 章主要介绍 IPv6 过渡基本原理。本章首先概述 IPv6 过渡的相互依存关系及平滑过渡原则这两个方面,并分析了过渡技术的关键要素。本章对目前主流的 3 类过渡技术做了讲述,包括双栈技术、翻译技术和隧道技术。最后分析了过渡技术的其他问题,包括分片重组问题、DNS 选择问题和应用层翻译问题等,以便读者整体认识 IPv6 过渡技术。

第 4 章主要介绍 IPv4-IPv6 翻译技术。翻译技术是实现 IPv4 与 IPv6 网络互通的重要

技术基础,对 IPv6 过渡发展有重要作用。本章首先对无状态翻译、有状态翻译和应用层翻译技术进行介绍。在此基础上,本章对主机侧翻译和两次翻译等特殊场景下的翻译技术进行阐述。本章从适用场景、基本原理、技术要点和优劣势等角度进行简要介绍,可使读者能对各类翻译技术方案有较为全面的了解。

第 5 章主要介绍 IPv6-over-IPv4 隧道机制。IPv4 向 IPv6 过渡的早期阶段,IPv4 网络占有绝对优势,因此本章主要对 IPv6 穿越 IPv4 网络的隧道过渡技术进行介绍。主要内容包括 6to4 协议、6rd 协议、6PE 协议、6over4 协议、ISATAP 协议和 Teredo 协议等。通过了解早期隧道过渡技术,有助于读者理解目前隧道过渡技术的实质及隧道技术的未来发展趋势。

第 6 章主要介绍主干网 4over6 隧道技术。本章首先分析了主干网上 IPv6 过渡难点。然后详细介绍了解决主干网过渡问题的网状软线框架,以及基于该框架的主干网 4over6 隧道技术,并分析了主干网 4over6 组播过渡技术。针对主干网 4over6 过渡技术部署,本章最后给出相应的管理信息库设计方案,为网络管理提供支持。使读者对主干网 4over6 技术从机制原理到规模应用有一个全面的认识。

第 7 章主要介绍接入网 IPv4-over-IPv6 隧道技术。本章首先讲述目前较为流行的 DS-Lite 协议,并重点分析了 Public 4over6 协议及轻量级 4over6 协议,阐述了两种隧道过渡技术的联系和区别,可使读者深刻理解有状态 4over6 隧道配置与数据传输的不同实现方式。本章最后介绍了 MAP-E 协议技术。

第 8 章主要介绍过渡技术,关键算法研究。本章针对过渡过程中出现的典型问题进行讨论、建模与分析,包括主机端口消耗量、端口复用的公平性、基于端口集的复用优化、过渡网关负载均衡以及过渡设备置放等问题。通过阅读本章,读者将深入理解过渡过程中所面对的具体技术问题,学会分析解决过渡问题的方法。

第 9 章主要介绍 IPv6 过渡场景分析。本章首先介绍了 IPv6 部署现状。接下来分别从主干网、接入网和互联网内容提供商 3 个方面对过渡时期可能出现的场景作了分析,以使读者充分理解种类繁多的 IPv6 过渡场景。另外,不同的过渡场景有其适用的过渡技术,本章还对过渡场景适用的过渡技术进行描述。

第 10 章主要介绍下一代互联网研究现状与发展趋势。本章首先介绍了世界各国对下一代互联网研究项目计划。接下来分析了发展下一代互联网的关键要素。SDN 作为目前最热门的下一代互联网被重点讲述,也是可管可控的未来新型网络典型代表之一。FIA 计划项目当前同样备受关注,其所属的 5 个项目分别从 5 个不同的角度提出了互联网发展架构。本章使读者对 IPv6 下一代互联网有了更准确的定位与认识,是 IPv6 过渡技术书籍的重要补充。

在本书编写过程中,得到了中科院网络中心钱华林研究员和清华大学李星教授等专家的悉心指导,在此致以最衷心的感谢。清华大学下一代互联网 4over6 过渡技术研究组的张朝昆、孙琪、陈煜驰、刘聪、唐嵩祎、孙静文、张彬等研究生为本书的编写花了大量精力,整理材料,在此一并感谢。由于水平有限,不足之处敬请各位专家、读者批评指正!

崔勇, 吴建平

2014 年 1 月

目 录

第 1 章 下一代互联网与 IPv6 技术	1
1.1 互联网概述	1
1.1.1 互联网基本概念	1
1.1.2 互联网发展历史	2
1.2 IPv4 技术发展现状	4
1.2.1 国内外 IPv4 地址现状	4
1.2.2 CIDR 与 NAT 带来的问题	6
1.3 下一代互联网及其发展契机	7
1.4 IPv6 技术简介	9
1.4.1 IPv6 技术发展历史及现状	10
1.4.2 IPv6 技术发展的优劣势	12
1.4.3 IPv6 技术标准化进程	14
1.5 小结	16
参考文献	16
第 2 章 IPv6 基础知识	19
2.1 IPv6 地址格式与分类	19
2.1.1 IPv6 地址格式	19
2.1.2 IPv6 前缀格式	19
2.1.3 IPv6 地址分类	20
2.2 IPv6 基础协议	22
2.2.1 IPv6 报文格式	22
2.2.2 IPv6 报文头部	22
2.2.3 IPv6 扩展头部	23
2.2.4 IPv6 协议细节	24
2.2.5 IPv6 上层协议校验和	25
2.3 IPv6 地址配置协议	26
2.3.1 无状态地址自动配置协议	26
2.3.2 IPv6 动态主机配置协议	28
2.4 IPv6 路由协议	31
2.4.1 下一代路由信息协议	31
2.4.2 开放最短路径优先协议第三版	32
2.4.3 IPv6 中间系统到中间系统协议	32
2.4.4 多协议扩展边界网关协议	33
2.5 IPv6 组播协议	34

2.5.1	IPv6 组播概述	34
2.5.2	IPv6 组播地址机制	34
2.5.3	IPv6 组成员管理机制	36
2.5.4	IPv6 组播路由机制	37
2.6	IPv6 任意播协议	38
2.6.1	任意播概述	38
2.6.2	任意播地址	38
2.6.3	任意播使用事项	39
2.7	移动 IPv6	40
2.7.1	概述	40
2.7.2	基本原理	40
2.7.3	协议关键流程	41
2.7.4	代理移动 IP	43
2.8	IPv6 安全	45
2.8.1	IPv6 安全概述	45
2.8.2	IPv6 网络层安全	46
2.8.3	IPv6 其他安全保障	48
2.9	IPv6 支撑系统	49
2.9.1	网管系统	49
2.9.2	DNS 系统	49
2.10	小结	51
	参考文献	52
第 3 章	IPv6 过渡基本原理	54
3.1	IPv6 过渡概述	54
3.1.1	IPv6 过渡的相互依存关系	54
3.1.2	IPv6 平滑过渡的原则	56
3.2	IPv6 过渡关键技术要素	56
3.2.1	端到端透明性	57
3.2.2	编址及地址规划	57
3.2.3	路由可扩展性	58
3.2.4	状态维护	59
3.2.5	IPv4 地址资源复用	60
3.3	双栈技术	61
3.3.1	IPv4 单栈和 IPv6 单栈	61
3.3.2	双栈技术原理	61
3.3.3	公网双栈和私网双栈	62
3.3.4	双栈技术面临的挑战	62
3.3.5	双栈技术小结	63
3.4	翻译技术	63

3.4.1	翻译技术原理	63
3.4.2	翻译技术的主要组成元素	64
3.4.3	翻译技术的两种模型	65
3.4.4	翻译技术的优势与缺陷	66
3.4.5	翻译技术小结	66
3.5	隧道技术	67
3.5.1	隧道技术原理	67
3.5.2	隧道技术的两种模型	68
3.5.3	隧道技术的优势与缺陷	69
3.5.4	隧道技术小结	69
3.6	过渡技术的其他问题	70
3.6.1	分片与重组问题	70
3.6.2	DNS 选择问题	71
3.6.3	应用层翻译问题	72
3.7	本章小结	73
	参考文献	73
第 4 章	IPv4-IPv6 翻译技术	75
4.1	无状态翻译	75
4.1.1	无状态翻译原理	75
4.1.2	SIIT 技术	76
4.1.3	IVI 技术	79
4.2	有状态翻译	81
4.2.1	有状态翻译原理	81
4.2.2	NAT-PT 技术	82
4.2.3	NAT64、DNS64 和 Smart6	85
4.3	应用层翻译	88
4.3.1	应用层网关概述	88
4.3.2	FTP-ALG	89
4.3.3	SIP-ALG	90
4.4	主机侧翻译	92
4.4.1	主机侧翻译概述	92
4.4.2	BIH 技术	93
4.5	两次翻译	95
4.5.1	464XLAT 技术	95
4.5.2	dIVI 技术	96
4.5.3	MAP-T 技术	98
4.5.4	4RD 技术	100
4.6	小结	102
	参考文献	102

第 5 章 IPv6-over-IPv4 隧道机制	105
5.1 IPv6-over-IPv4 技术简介	105
5.2 6to4 协议	106
5.2.1 协议概述	106
5.2.2 组件介绍	107
5.2.3 地址格式	108
5.2.4 协议原理	108
5.2.5 协议总结	109
5.3 6rd 协议	109
5.3.1 协议概述	109
5.3.2 组件介绍	110
5.3.3 地址配置	111
5.3.4 协议原理	111
5.3.5 协议总结	113
5.4 6PE 协议	113
5.4.1 协议概述	113
5.4.2 6PE 原理	114
5.4.3 6PE 总结	115
5.5 6over4 协议	116
5.5.1 协议概述	116
5.5.2 组件介绍	116
5.5.3 地址格式	116
5.5.4 协议原理	117
5.5.5 协议总结	118
5.6 ISATAP 协议	118
5.6.1 协议概述	118
5.6.2 组件介绍	119
5.6.3 地址格式	119
5.6.4 协议原理	120
5.6.5 协议总结	121
5.7 Teredo 协议	121
5.7.1 协议概述	121
5.7.2 组件介绍	122
5.7.3 协议支持的 NAT 类型	123
5.7.4 地址格式	123
5.7.5 协议原理	124
5.7.6 协议总结	126
5.8 小结	127
参考文献	127

第 6 章 主干网 4over6 隧道技术 128

6.1 主干网 IPv6 过渡难点分析 128

6.1.1 主干网概述 128

6.1.2 主干网过渡问题陈述及难点分析 129

6.2 主干网软线过渡技术框架 131

6.2.1 网状软线框架概述 131

6.2.2 路由信息分发 132

6.2.3 数据转发 133

6.2.4 软线安全性分析 135

6.3 基于路由协议扩展的 4over6 隧道过渡技术 137

6.3.1 机制概述 137

6.3.2 控制平面处理 138

6.3.3 数据平面处理 139

6.3.4 协议机制示例 140

6.4 主干网 4over6 组播过渡技术 141

6.4.1 4over6 组播机制概述 141

6.4.2 控制层面处理 142

6.4.3 数据层面处理 143

6.5 网状软线管理信息库 144

6.5.1 网络管理系统结构 144

6.5.2 网状软线管理信息库结构 145

6.5.3 网状软线管理信息库关键对象 146

6.5.4 其他相关 MIB 147

6.6 小结 148

参考文献 148

第 7 章 接入网 IPv4-over-IPv6 隧道技术 150

7.1 接入网 IPv4-over-IPv6 技术简介 150

7.2 DS-Lite 协议 151

7.2.1 协议概述 151

7.2.2 组件介绍 152

7.2.3 协议原理 152

7.2.4 协议总结 154

7.3 Public 4over6 协议 154

7.3.1 协议概述 154

7.3.2 组件介绍 155

7.3.3 地址分配技术 155

7.3.4 协议原理 156

7.3.5 协议总结 157

7.4	Lightweight 4over6 协议	158
7.4.1	协议概述	158
7.4.2	组件介绍	159
7.4.3	地址复用技术	159
7.4.4	地址分配技术	160
7.4.5	协议原理	161
7.4.6	系统实现	162
7.4.7	故障恢复	163
7.4.8	协议总结	164
7.5	MAP-E 协议	165
7.5.1	协议概述	165
7.5.2	组件介绍	165
7.5.3	协议原理	166
7.5.4	协议总结	167
7.6	小结	167
	参考文献	167
第 8 章	过渡技术关键算法研究	169
8.1	端口使用量研究	169
8.1.1	用户主机端口消耗问题	169
8.1.2	端口消耗测量实验及分析	170
8.2	地址复用利用率及公平性优化研究	172
8.2.1	CGN 地址复用模型	173
8.2.2	RAS 地址复用优化算法	174
8.2.3	RAS 算法利用率及公平性评价	176
8.3	基于端口集的地址共享研究	177
8.3.1	基于端口集的地址共享模型	177
8.3.2	LMB 地址共享利用率优化算法	179
8.3.3	LMB 优化算法共享效果评价	182
8.4	过渡网关负载均衡研究	184
8.4.1	过渡网关负载均衡模型	184
8.4.2	负载均衡器设计	186
8.4.3	ARA 自适应重分配算法	188
8.4.4	ARA 算法性能评价	189
8.5	过渡设备置放与路由规划研究	191
8.5.1	设备置放与路由规划模型	192
8.5.2	MIG 近似求解算法	193
8.5.3	MIG 算法性能评价	195
8.6	小结	197
	参考文献	197

第 9 章 IPv6 过渡场景分析	199
9.1 IPv6 部署现状	199
9.2 主干网过渡场景分析及过渡技术应用	202
9.2.1 过渡场景分析	202
9.2.2 主干网 4over6 过渡技术应用示例	204
9.3 接入网过渡场景分析及过渡技术应用	209
9.3.1 IPv6 接入网过渡场景分析	210
9.3.2 IPv4 接入网过渡场景分析	213
9.3.3 接入网过渡技术应用示例	215
9.4 ICP 过渡场景分析及过渡技术应用	217
9.4.1 ICP 过渡场景分析	217
9.4.2 ICP 过渡技术应用示例	218
9.5 小结	220
参考文献	220
第 10 章 下一代互联网研究现状与发展趋势	222
10.1 下一代互联网研究项目计划	222
10.2 下一代互联网体系结构要素分析	224
10.3 软件定义网络	226
10.3.1 概述	226
10.3.2 OpenFlow 控制协议	228
10.3.3 研究方向	229
10.3.4 小结	230
10.4 FIA 计划项目	231
10.4.1 NDN	231
10.4.2 MobilityFirst	232
10.4.3 NEBULA	233
10.4.4 XIA	234
10.4.5 ChoiceNet	234
10.5 其他新型体系结构	235
10.5.1 定位/标识分离协议	236
10.5.2 内容分发网	237
10.5.3 信息中心网	238
10.6 小结	239
参考文献	239

第 1 章 下一代互联网与 IPv6 技术

互联网的出现是人类通信史上的里程碑。它已渗透现代人类生活的各个方面,深刻影响着人们的工作和学习方式。20 世纪 80 年代初出现的以 IP 为核心的互联网面临着越来越严重的技术挑战,主要表现在 IP 地址匮乏,互联网难以大规模扩展;安全性、实时性、高性能、移动性和可控性等方面都难以实现。为了应对这些技术挑战,以 IPv6 为核心的下一代互联网适时而生,需求愈加强烈。本章以互联网的发展历史为线索,介绍了 IPv4、下一代互联网和 IPv6 等技术。

1.1 互联网概述

1.1.1 互联网基本概念

自从“互联网之父”Vinton Cerf 在 1974 年提出 Internet 基本蓝图^[1]之后,互联网走过了 30 多年的历史,至今仍在飞速发展。毋庸置疑,互联网是当代高科技的产物。当试图去了解互联网本质的时候,我们就有必要先去理解一个最基本的问题,即什么是互联网,从而可以更好地理解什么是 IPv4、IPv6 技术,如何实现 IPv4 过渡到 IPv6,如何在下一代互联网中应用。

互联网的概念,并没有完全统一,不同的组织、专家和学者给出的定义各不相同。早在 1995 年 10 月 24 日,联合网络委员会 FNC(The Federal Networking Council)就通过了一项关于“互联网定义”的决议^[2]。他们指出,互联网是指全球性的信息系统,具体包含以下 3 个含义。

(1) 通过全球唯一的地址按逻辑连接在一起,这个地址是建立在互联网协议(IP)或者今后其他协议基础之上的。

(2) 可以通过传输控制协议和互联网协议(即 TCP/IP),或者今后其他接替的协议或与互联网协议(IP)兼容的协议来进行通信。

(3) 可以让公共用户或者私人用户使用高水平的服务,而这种服务是建立在上述通信及相关基础设施之上的。

Vinton Cerf 教授认为,作为全球最大的计算机网络,互联网将各种运行着不同通信协议的网络利用 TCP/IP 互联在一起,从而实现了计算机网络的互通互访^[1]。

在 Tanenbaum 教授编著的《Computer Networks》一书中,也给出了互联网的定义。他认为,互联网是一种相互连接起来的网络,这些网络互不相同,彼此之间并不兼容^[3]。并指出,通常人们所说的因特网(Internet)表示特定的、全球性的互联网。因此,互联网更具有广泛的含义。

维基百科上给出互联网的定义,认为 Internet 是一个计算机网络的全球系统,它使用 TCP/IP,为全球亿万用户提供服务^[4]。

虽然不同的组织和专家给出的互联网概念各不相同,但是从中不难发现,除了 Tanenbaum 教授给出的广泛互联网定义之外,都具有一个关键词,即 IP(TCP/IP),这足以表明 IP 在互联网中的重要作用。

1.1.2 互联网发展历史

1969 年 10 月 29 日 22 点 30 分,互联网的先驱阿帕网(ARPANET)在美国国防部研究计划署(ARPA)的推动下诞生了。它首先是将加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)和斯坦福大学研究学院(SRI)连接起来,然后在 1969 年 12 月 5 日,又把犹他大学(Utah)和加州大学圣塔芭芭拉分校(UCSB)这两所大学成功连接起来,形成一个 4 节点的网络。当时手绘的 ARPANET 示意图底稿如图 1.1 所示,这幅珍贵的图片所示框架开创了互联网崭新的时代。此后,ARPANET 迅速地发展起来,并变成了互联网的技术核心。到 1981 年,主机的数量已经达到了 213 个,且当时以每 20 天新增 1 个主机的速度快速增长着^[5]。

随着网络的不断发展,出现了很多不同类型的网络。为了能够实现这些异构网络的互通互访,美国国防部先进研究项目局(DARPA)的 Robert Kahn 与斯坦福大学的 Vinton Cerf 一起研究解决这个问题,并于 1973 年通过“网间协议(Internetwork Protocol)”实现了异构网络互联^[1]。

1974 年,Vinton Cerf 等人在国际标准 RFC 675^[7]中首次使用了 internet 这个术语来取代 internetwork。随后,在国际标准 RFC 和各类论文中,越来越多的地方都使用这个术语。

Vinton Cerf 等人提出的网间协议,当时并没有把 TCP (Transmission Control Protocol)和 IP(Internet Protocol)分开。直到 1981 年 9 月,Jon Postel 分别在 RFC 791^[8]、RFC 792^[9]和 RFC 793^[10]中对 TCP 和 IP 进行论述,标志着 TCP/IP 开始正式使用。图 1.2 左半部分所示的为该协议所涉及的参考模型。TCP/IP 模型包括 4 个层次,分别是链路层(Link Layer)、网络层(Internet Layer)、传输层(Transport Layer)和应用层(Application Layer),各层向上提供服务,向下获取服务。

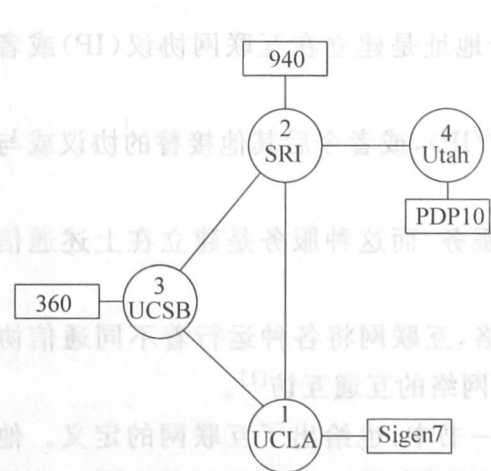


图 1.1 4 节点的 ARPANET 手绘图^[6]



图 1.2 TCP/IP 体系结构模型与 ISO/OSI 体系结构模型

网络的互通,使得基于网络的新技术层出不穷。1971 年,世界上出现了第一封电子邮件,并使用“@”符号将用户名和计算机名称(后来演变成域名)分开表示。1978 年,电子公告栏系统(BBS)诞生。

1983 年,域名系统(Domain Name Space,DNS)与第一个域名服务器一起创建出来。与之前数字地址相比,域名系统使得互联网上的地址具有人性化。DNS 服务器允许互联网用户输入一个容易记住的域名,当终端用户使用该域名进行通信时,DNS 服务器会通知终端应用将它转换成对应的 IP 地址。1985 年 3 月 15 日,出现 DNS 不久,就产生了第一个商业 Internet 域名“symbolics.com”^[11]。

著名的 ISO/OSI 模型(Open Systems Interconnection model, ISO/IEC 7498-1)由 Zimmermann 在 1980 年提出^[12],并于 1984 年正式颁布^[13]。ISO/OSI 体系结构模型由图 1.2 右半部分所示。这是一个概念模型,与 TCP/IP 模型相比,层次划分得更细,共包括 7 层,由下向上分别是物理层(Physical Layer)、数据链路层(Data Link Layer)、网络层(Network Layer)、传输层(Transport Layer)、会话层(Session Layer)、表示层(Presentation Layer)和应用层(Application Layer)。该层次结构易于扩展,可以满足不同设备厂商、不同网络设备之间互通互访的需求。不过由于该参考模型按通信思想进行设计,并不符合软件编程的方式,因此,严格按照参考模型进行编程会使得软件效率低下。

1986 年,互联网工程工作小组(Internet Engineering Task Force,IETF)正式成立^[14],为互联网的发展注入了新的活力。该组织积极推动 Internet 标准的进展,并与万维网联盟(World Wide Web Consortium,W3C)和国际电工委员会(International Electrotechnical Commission,IEC)等在互联网领域有着密切合作。该组织是一个开放的标准化组织,它没有正式的会员和会员的具体要求。当前大部分国际标准都出自该组织,与过渡相关的许多技术标准同样在 IETF 中讨论形成。

1990 年,Robert Cailliau 建立了一个名叫 World Wide Web(简称 W3)的“超文本工程”^[15],这是首次采用超文本文档的网站,它通过基于客户/服务器(C/S)结构的浏览器来查看信息^[16]。第二年,他发表了一个 World Wide Web 工程摘要,这标志着 Web 正式成为互联网的一种公共使用的服务。

1998 年,David Clark 提出了互联网的设计原则^[17],分析了 Internet 传输尽力而为(best effort)的原因,从理论角度解释了 Internet 设计的基本依据。他认为 Internet 网络体系结构包括最基本目标和二级目标。最基本的目标是,在异构网络中利用分组交换通信设施连接起来,并利用网关实现分组交换的存储转发算法;在二级目标中,又分成 7 个子目标,分别为:①Internet 在部分网络或网关失效的时候还能保持连接;②Internet 必须支持多种类型的通信服务;③Internet 体系结构必须能够适应不同网络的接入;④Internet 体系结构必须能够允许资源的分布式管理;⑤Internet 体系结构必须是具有成本效益的;⑥Internet 体系结构必须允许主机便捷地互联;⑦Internet 体系结构使用的资源必须是可以计费的。

互联网也促进了移动互联网的快速发展。第一款与 Internet 相连的智能手机是诺基亚 9000,它于 1996 年在芬兰研制成功,成为移动互联网的一个重要时刻。1999 年,日本的 NTT DoCoMo 公司提供了第一个手机互联网服务 i-mode。在 2001 年,黑莓在美国生产出的手机支持了手机邮件系统。2012 年 6 月,据报道,我国手机作为互联网通信设备,其数量首次超过了个人电脑的数量^[18]。

随着 Internet 快速地发展,IP 地址紧缺的矛盾凸显出来。为了能够改善 IP 地址紧缺的现状,IP 新版本 IPv6(Internet Protocol version 6)在 1995 年被提出^[19],并于 1998 年由 IETF 组织正式颁布^[20],成为 Internet 发展中一个重要的里程碑。

用户更加强烈的需求促使 IPv4 向 IPv6 过渡技术快速发展起来,迄今也已经有十几年的时间了。在隧道过渡技术方面,1996 年,业界出现了第一个标准化的 IPv6 隧道过渡技术标准 RFC 1933^[21],即 IPv6-in-IPv4 手工配置隧道方案。该方案对 IPv4 和 IPv6 地址没有任何要求,由于其简单性,成为目前各个运营商仍在使用的隧道技术。两年后,即 1998 年,业界出现了第二个隧道过渡技术的国际标准 RFC 2473^[22],它对 IPv4 和 IPv6 地址同样没有任何要求,成为 2008 年出现的接入网过渡方案 DS-Lite^[23]的思想来源。之后几年,IPv6 过渡技术如雨后春笋般出现,如 6over4 协议^[24]、ISATAP 协议^[25]和 Teredo 协议^[26]等,2009 年通过的 RFC 5565^[27],奠定了隧道技术的发展方向,4over6 隧道过渡技术也是在这个标准的基础上不断完善发展起来的^[28]。过渡技术除了隧道技术之外,还有双栈技术和翻译技术等,也在这十几年间不断地探索发展。

1.2 IPv4 技术发展现状

IPv4(Internet Protocol version 4)是 IP 的第 4 个版本^[8],当然也是第一个被广泛应用的版本。它作为 Internet 网络的核心协议,已经成为互联网中必不可少的一部分,目前所使用的互联网基本上是基于 IPv4 创建起来的。IPv4 是一个无状态协议,它使用了分组交换网。该协议采用了尽力而为的传输模式,也就是说,它是一种无保证传输模式,它不能确保传输数据包到达的时间和顺序,且无可避免地随时进行重传。由于上层的 TCP 确保了端到端的传输,使网络层无须关心这些问题,确保了数据转发的效率。

1.2.1 国内外 IPv4 地址现状

IPv4 地址由 32b 二进制数组成,其地址空间共有 4 294 967 296(即 2^{32})个,约 43 亿个。IPv4 地址是由互联网数字分配机构(Internet Assigned Numbers Authority,IANA)进行统一分配。该分配机构下属 5 个地区性互联网注册机构(Regional Internet Registries,RIR),这 5 个 RIR 分别是欧洲 IP 地址注册中心、拉丁美洲和加勒比海互联网地址注册中心(Lation American and Caribbean Internet Address Registry,LACNIC)、美国互联网编号注册中心(American Registry for Internet Numbers,ARIN)、非洲网络信息中心(Africa Network Information Centre,AFRINIC)以及亚太地址网络信息中心(Asia Pacific Network Information Centre,APNIC)。我国的 IPv4 地址分配由 APNIC 监管。

在互联网初期,IPv4 地址是可以应对互联网上的各种应用。但是,随着互联网地址的快速消耗,未分配的地址急剧减少。2011 年 1 月 31 日,IANA 宣布 IPv4 地址全部耗尽^[29],而 5 个 RIR 也即将消耗完自己手中的 IPv4 地址。图 1.3 所示的是 IANA 分配的地址数情况^[30],各个 RIR 地址消耗趋势^[31]如表 1.1 所示。

从图 1.3 和表 1.1 中可以看出,IANA 目前已经耗尽了所有的 IPv4 地址,APNIC 和 RIPE 所拥有的 IPv4 地址已经分配完毕,而其他 3 个地区分配机构也将在未来几年耗尽所拥有的 IPv4 地址。

在我国,中国互联网络信息中心(China Internet Network Information Center,CNNIC)于 2013 年 6 月颁布了《第 32 次中国互联网络发展状况统计报告》。该报告显示,截止到