

江苏省邮电规划设计院有限责任公司专家团队

精品
力作

下一代互联网IPv6 过渡技术与部署实例

NEXT GENERATION INTERNET IPv6

TRANSITION TECHNOLOGY AND DEPLOYMENT WITH INSTANCES

■ 戴源 杨建袁 源李忠超 石启良 张家燕 编著



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

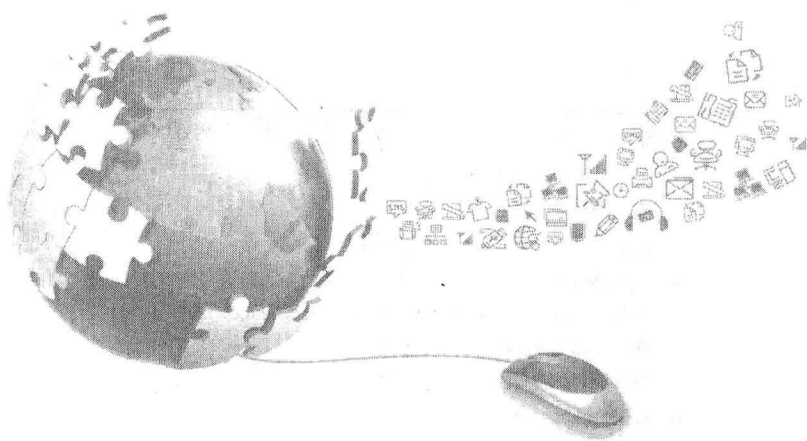
江苏省邮电规划设计院有限责任公司专家团队

精品
力作

下一代互联网IPv6 过渡技术与部署实例

**NEXT GENERATION INTERNET IPv6
TRANSITION TECHNOLOGY AND DEPLOYMENT WITH INSTANCES**

■ 戴源 杨建 袁源 李忠超 石启良 张家燕 编著



人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

下一代互联网IPv6过渡技术与部署实例 / 戴源等编
著. — 北京: 人民邮电出版社, 2014. 1
ISBN 978-7-115-33343-8

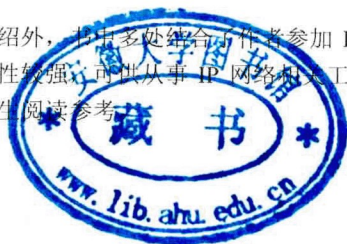
I. ①下… II. ①戴… III. ①计算机网络—通信协议—研究 IV. ①TN915.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第238670号

内 容 提 要

本书重点描述了IPv6过渡技术和方案,然后结合实际情况介绍了网络、应用、终端的部署方案和策略,最后给出了两个网络部署实例和一个IPTV业务系统IPv6改造实例。全书分为三部分:第一部分全面介绍了IPv6的基础知识;第二部分描述了IPv6过渡技术方案,对主流的转换技术双栈、DS-Lite、NAT64技术做了对比分析,然后结合运营商实际讲述了过渡技术的部署方案,最后介绍了应用和终端的具体过渡方案;第三部分给出了两个实验部署实例,这部分有助于加深对前面章节的理解,对准备参与IPv6建设的数据人员也是一个较好的实际参考。

本书内容全面,除理论介绍外,书中多处结合作者参加IPv6试点项目的实践经验,阐述了实验中需要解决各类问题,工程实践性较强,可供从事IP网络相关工作的工程技术人员使用,也可供高等院校计算机、通信、网络等专业的师生阅读参考。



◆ 编 著 戴 源 杨 建 袁 源 李忠超 石启良
张家燕

责任编辑 杨 凌

责任印制 彭志环 焦志炜

◆ 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>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 13.5

字数: 321千字

印数: 1—4000册

2014年1月第1版

2014年1月河北第1次印刷

定价: 45.00元

读者服务热线: (010) 81055410 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

序

在全球互联网快速发展的时期，中国的互联网市场也有了突飞猛进的发展，用户数和上网时长随着网络规模的扩大不断增加。互联网通信能力的快速提升也推动了各项网络应用的发展。随着物联网等新兴业务应用的发展，将会使所有的信息设备智能化联网，IP 地址的需求将越来越大。在过去的两年中，全球各大地址机构陆续宣布 IPv4 地址已经分配完毕，因 IP 地址不足制约互联网蓬勃发展的矛盾日益突出。

IPv6——这个被设计用来取代 IPv4 的下一代互联网协议，已不仅停留在技术研究和标准制定阶段，启动以 IPv6 为基础的下一代互联网部署已经刻不容缓。然而，下一代互联网部署涉及互联网技术、网络设备、用户终端、操作系统、内容及应用等众多产业链环节，向下一代互联网的过渡将是一个长期的系统工程，不能一蹴而就。

我国政府一直高度重视下一代互联网的发展和演进，早在 2004 年就启动了我国下一代互联网示范工程（CNGI）建设，2012 年下发的《下一代互联网“十二五”发展建设意见》，更是吹响了我国下一代互联网规模部署实施的号角。而要实现下一代互联网规模商用的整体目标，必然依赖于产业链各方的共同努力。对于运营商而言，向下一代互联网的部署不只是网络上 TCP/IP 协议栈的简单升级，关键还在于如何平稳实现当前规模庞大的互联网用户和应用的迁移，确保迁移过程中服务质量和用户体验不受影响，并满足各类新型业务发展的需求。

中国电信作为国内最大的宽带运营商，多年来在下一代互联网领域进行了大量技术研究，并在江苏、湖南等省开展了现网试点，探索网络部署方案和业务运营模式。本书作者即为参与 IPv6 项目试点的核心成员，在运营商网络规划、设计过程中积累了大量的有益经验。

本书聚焦于运营商下一代互联网的网络部署和演进，特点是理论和实践相结合，有较强的实用性与前瞻性，既有 IPv6 基础知识和过渡技术的介绍，也有运营商网络部署的业务迁移方案；既有具体的设备配置实例，也有终端演进方面的思考。书中内容很多是作者的现网实践经验，相信会给广大读者加深对下一代互联网的理解提供帮助。



2013 年 11 月

前 言

在全球互联网快速发展的时期，中国的互联网市场也有了突飞猛进的发展，用户数和上网时长随着网络规模的扩大也不断增加。我国互联网通信能力的快速提升，带动了我国宽带互联网的发展，宽带的快速普及推动了各项网络应用的发展。互联网及其应用快速发展，随之而来的是 IPv4 地址的大量消耗，IANA 的 IPv4 地址在 2011 年 2 月 3 日已经分配完毕，5 个 RIR 管理的地址空间中，RIR 亚太地区已经分配完毕。而随着物联网的发展，所有的信息设备将会实现智能化联网，对 IP 地址的需求将越来越大。

业界早已认识到上述问题的严峻性，并且开展了一系列研究。在这种环境下，IPv6 应运而生。1992 年 IETF 成立工作组规划下一代互联网；1994 年 IETF 会议决定正式提议 IPv6 发展计划；1995 年 IETF 发布 IPv6 第一个正式 RFC——RFC 1883；1998 年 IETF 正式发布 IPv6 标准规范——RFC 2460；2000 年以后周边协议开始增加对 IPv6 的支持；2005 年以后运营商关注过渡问题，过渡技术研究日益增多。

对比国际上其他国家，中国由于获得 IPv4 地址数量本身较少，而用户数又不断增多，需求显得尤为迫切。然而，由于没有商业利益的推动，网络运营商、应用开发商和信息设备制造商都不愿意大力推动。内容源匮乏、终端支持力度较弱、国家安全监管存在漏洞等因素导致互联网业务全程 IPv6 承载进展缓慢，必须依靠政府的引导来加快推进。前国务院总理温家宝 2011 年 12 月 2 日主持召开国务院常务会议，研究部署加快发展我国下一代互联网产业；2012 年 2 月 16 日国家发改委办公厅发布“关于组织实施 2012 年下一代互联网技术研发、产业化和规模商用专项的通知”；2012 年 3 月 30 日国家七部委联合发布“关于印发下一代互联网（“十二五”）发展建设的意见”。

在政府的大力推动下，各大运营商都出台了一系列具体措施予以落实并积极参与下一代互联网发展工作，以促进产业链的发展。本书作者即为协助大型网络运营商设计、规划 IPv6 的网络演进，参与 IPv6 项目试点的成员。在此项工作过程中作者也积累了一定的理论和实践经验。在查阅文献书籍的过程中，作者发现现有关于 IPv6 技术的书籍分为两类：一类侧重于理论和实验，另一类侧重于向 IPv6 过渡过程中各部分的具体方案。但是，既结合了理论和方案，又给出了具体实验场景、具体设备配置参考的书籍还不是很多，因此编纂此书，希望在普及 IPv6 基础知识、过渡技术的基础上，加入这些年参加 IPv6 项目试点的经验总结，以期给广大从事下一代互联网发展的 IP 从业人员一个实施方案和具体细节的参考。同时也可以让广大高等院校相关专业学生和网络技术爱好者在学习 IPv6 基础知识、过渡技术的同时，

下一代互联网 IPv6 过渡技术与部署实例

结合实践方案以加深理解。

全书分为三部分，共 9 章，各个部分的内容介绍如下。

第一部分：包括第 1 章到第 3 章，这部分讲述 IPv6 基础知识。

第 1 章为 IPv6 简介，介绍了地址枯竭形势和应对手段，引出 IPv6 的发展历程和技术的新特点。第 2 章为 IPv6 技术基础，介绍了 IPv6 地址结构、ICMPv6 协议、ND 协议、DHCPv6 协议等基本协议以及 PPPoE 和 IPoE 这两种接入方式。第 3 章介绍 IPv6 多播技术，包括基础知识、多播地址、MLD 协议、IPv6 PIM 协议和部署策略。

第二部分：包括第 4 章到第 7 章，这部分首先介绍过渡方案，然后结合实际情况介绍网络、应用、终端的部署方案和策略。

第 4 章介绍 IPv6 过渡技术，主要有双栈、隧道、协议翻译技术等，然后对主流的转换技术双栈、DS-Lite、NAT64 技术做了对比分析，阐述了过渡技术部署的策略。第 5 章结合运营商实际讲述了过渡技术的部署方案，包括网络部署、业务部署、IPv6 地址规划、网络安全和业务溯源。第 6 章是内容和应用过渡的方案，从几个角度分类阐述，主要是 IDC、典型内容和应用（包括网页、FTP、邮件等常见应用）、大中型和小型 ICP、物联网等。第 7 章是终端演进的情况介绍，包括固网终端、无线终端、物联网终端等。

第三部分：包括第 8 章和第 9 章，第 8 章讲述了一个实验部署私网双栈和 DS-Lite 的实例，第 9 章讲述了一个实验部署 IPTV 业务系统 IPv6 过渡改造的实例。这部分有助于加深对前面章节的理解，对准备参与 IPv6 建设的数据人员也是一个较好的实际参考。

这部分结合了作者参加 IPv6 试点项目的实践经验，说明了实验的细节、流程、配置及实验中解决各类问题，最后对实验方案做出小结。

本书由江苏电信下一代互联网推进办公室的主要成员执笔，主要由江苏电信资深专家杨建、李忠超以及江苏省邮电规划设计院戴源、袁源、石启良、张家燕、刘春林、王吉顺、胡波等多名专家和技术骨干联合编写。在书籍的编写过程中得到了华为技术有限公司和中兴通讯股份有限公司的大力支持，在此致以最衷心的感谢！由于编者水平所限，书中难免存在错误之处，欢迎各位读者批评指正！

编者

2013 年 8 月

目 录

第 1 章 IPv6 简介	1
1.1 IPv4 向 IPv6 过渡的必然性	1
1.1.1 国际国内 IPv4 地址枯竭 形势	2
1.1.2 应对 IPv4 地址枯竭的 手段	2
1.1.3 产业链各方向下一代 互联网演进策略	3
1.2 IPv6 的发展历程及现状	4
1.3 IPv6 技术的新特点	5
1.3.1 地址管理	5
1.3.2 改进报头	5
1.3.3 改进路由	6
1.3.4 安全机制	7
1.3.5 增强服务质量	7
第 2 章 IPv6 技术基础	9
2.1 IPv6 地址介绍	9
2.1.1 IPv6 地址结构	9
2.1.2 IPv6 寻址模型	10
2.1.3 IPv6 地址分类	10
2.2 IPv6 报文结构	15
2.2.1 IPv6 基本报头	16
2.2.2 扩展分组头	16
2.3 ICMPv6 协议	22
2.3.1 ICMPv6 报文结构	22
2.3.2 ICMPv6 报文类型	22

2.4 邻居发现技术	23
2.4.1 ND 概述	24
2.4.2 ND 功能	28
2.5 IPv6 路由协议	31
2.5.1 IPv6 单播路由协议	31
2.5.2 IPv6 多播路由协议	34
2.6 IPv6 接入技术	35
2.6.1 DHCPv6	35
2.6.2 PPPoE	38
2.6.3 Ipv6	40
第 3 章 IPv6 多播技术	42
3.1 IPv6 多播技术基础	42
3.1.1 多播的优点	42
3.1.2 多播分发树	43
3.1.3 反向路径转发	44
3.1.4 多播相关协议	44
3.2 IPv6 多播地址	44
3.2.1 IPv6 多播地址格式	45
3.2.2 IPv6 多播地址分配	45
3.2.3 永久分配的 IPv6 多播 地址	45
3.2.4 基于单播前缀的多播 地址	46
3.2.5 IPv6 SSM 多播地址	46
3.2.6 内嵌 RP 地址的多播 地址	46
3.2.7 IPv6 多播 MAC 地址	47

3.3	MLD 协议	48	4.3.3	6over4 隧道	71
3.3.1	MLD 版本	48	4.4	协议翻译技术	73
3.3.2	MLD 原理简介	48	4.4.1	NAT44 技术	73
3.3.3	MLDv2 原理简介	50	4.4.2	DS-Lite 技术	82
3.4	IPv6 PIM 协议	52	4.4.3	NAT64	86
3.4.1	PIM 消息格式	53	4.5	过渡技术分析、对比	87
3.4.2	PIM 邻居发现和 DR 选举 机制	53	4.6	过渡技术部署策略建议	87
3.4.3	PIM-SM 注册	56	4.6.1	部署双栈, 构建网络向 IPv6 迁移的基石	87
3.4.4	PIM-SM 加入/剪枝	57	4.6.2	部署 CGN, 解决地址短缺, 为业务平滑迁移提供 保障	88
3.4.5	PIM-SM 最短路径树 切换	59	4.6.3	向纯 IPv6 网络过渡	89
3.4.6	PIM-DM 加入和剪枝 过程	60	4.6.4	全球运营商 IPv6 演进 方案选择	90
3.4.7	PIM-DM 嫁接机制	62	第 5 章 运营商过渡技术部署		91
3.4.8	PIM 的断言机制	62	5.1	运营商网络演进策略总体分析	91
3.4.9	BSR 和 RP 选举	63	5.2	网络部署	92
3.4.10	多路访问网络的处理	64	5.2.1	网络架构和改造关键点 分析	92
3.4.11	PIM-SSM	64	5.2.2	骨干网	94
3.5	IPv6 多播协议的现网部署策略 建议	65	5.2.3	城域网	97
3.5.1	RP 部署	65	5.2.4	接入网	102
3.5.2	多播路由协议的部署	65	5.2.5	IPv6 网络规划	105
3.5.3	MLD 静态加入的部署	65	5.3	业务部署	108
3.5.4	二层设备开启 MLD snooping	66	5.3.1	业务地址需求分析	108
3.5.5	RP 备份	66	5.3.2	宽带接入业务	109
第 4 章 IPv6 过渡技术		67	5.3.3	无线宽带 (含 3G 和 WLAN) 业务	110
4.1	总体介绍	67	5.3.4	其他业务	111
4.2	双栈技术	68	5.4	IPv6 网络地址规划	112
4.2.1	IP 骨干网	69	5.4.1	设计思路	112
4.2.2	BNG	69	5.4.2	设计原则	116
4.2.3	CPE	69	5.4.3	设计要素	116
4.3	隧道技术	70	5.5	网络安全及业务溯源	121
4.3.1	6PE	70	5.5.1	IPv6 网络安全	121
4.3.2	6vPE	71			

5.5.2	IPv6 业务溯源	124	7.6	IPTV 机顶盒	166
5.5.3	运营级协议转换技术		7.7	物联网终端	167
	网络安全	124	7.7.1	物联网终端的分类	167
5.5.4	运营级协议转换技术		7.7.2	物联网网关	168
	业务溯源	127	7.7.3	短距离无线通信技术	170
5.6	总体演进策略建议	129	7.8	终端演进策略建议	176
			7.8.1	固网终端演进策略	176
			7.8.2	移动终端演进策略	177
第 6 章	内容和应用过渡技术部署	132	第 8 章	IPv6 过渡技术部署实例	178
6.1	IDC 的双栈升级改造方案	132	8.1	分布式 NAT444	178
6.2	典型内容和应用迁移方案分析	133	8.1.1	实验内容与目标	178
6.2.1	网页浏览类应用迁移		8.1.2	网络结构	178
	方案	133	8.1.3	业务流程	179
6.2.2	FTP 应用迁移	140	8.1.4	地址分配	180
6.2.3	电子邮件应用迁移	141	8.1.5	NAT 及其穿越	180
6.2.4	即时通信应用迁移	145	8.1.6	用户溯源	181
6.2.5	流媒体应用迁移	147	8.1.7	设备具体配置	181
6.3	IPv6 与物联网应用	150	8.2	集中式 NAT444	184
6.3.1	物联网概念与架构	150	8.2.1	实验内容与目标	184
6.3.2	物联业务驱动的 IPv6		8.2.2	网络结构	185
	演进	153	8.2.3	业务流程	186
6.4	内容和应用迁移策略建议	157	8.2.4	地址分配	186
6.4.1	大中型 ICP 的升级双栈		8.2.5	NAT 及其穿越	186
	改造	157	8.2.6	用户溯源	186
6.4.2	小型 ICP 双栈的升级		8.2.7	设备配置	186
	改造	157	8.3	分布式 DS-Lite	186
第 7 章	终端演进	158	8.3.1	实验内容与目标	186
7.1	当前各种终端支持 IPv6 能力		8.3.2	网络结构	187
	现状	158	8.3.3	业务流程	188
7.2	固网终端	158	8.3.4	地址分配	188
7.2.1	IPv6 对固网终端的技术		8.3.5	NAT 及其穿越	189
	要求	159	8.3.6	用户溯源	189
7.2.2	IPv4/IPv6 过渡技术的		8.3.7	DNS 解析	189
	演进策略	161	8.3.8	设备具体配置	189
7.3	PC 操作系统和客户端	164	8.4	集中式 DS-Lite	191
7.4	手机终端	165			
7.5	3G 上网卡	166			

下一代互联网 IPv6 过渡技术与部署实例

8.4.1 实验内容与目标·····	191	9.1.2 实验目标·····	194
8.4.2 网络结构·····	191	9.2 过渡部署方案及流程·····	194
8.4.3 其他·····	192	9.2.1 现有系统改造方案·····	194
8.5 IPv6 过渡技术实验小结·····	192	9.2.2 改造后的点播业务流程·····	196
第 9 章 IPTV 业务 IPv6 过渡		9.2.3 改造后的直播业务流程·····	197
部署实例 ·····	193	9.2.4 改造后的增值业务流程·····	198
9.1 实验概况·····	193	9.2.5 改造后的上网业务流程·····	199
9.1.1 IPTV 现有业务系统		缩略语 ·····	201
介绍·····	193		

第 1 章

IPv6 简介

1.1 IPv4 向 IPv6 过渡的必然性

IP 地址即互联网地址，是用来标志互联网终端的逻辑地址，具有唯一性。我们现在正在应用的网络互联协议是瑟夫 20 世纪 70 年代创立的一种名为 IPv4 (Internet Protocol version 4) 的 32 位地址，也是世界上被广泛使用的网络互联协议的最重要组成部分。该机制通过编码的方式用 32 位二进制数来区分识别不同的主机，理论上最多有 $2^{32}-1$ 个地址，最多可以容纳 $2^{32}-1$ 台主机（不包括虚拟子网）连入互联网，总地址数为 42 亿多。在当时，谁也没有想到这么大的容量也会用完。

早在 18 年前，有互联网专家就指出，由于 IPv4 技术本身存在着网络地址资源浪费的问题，加上网络的迅猛发展，IP 地址将很快耗尽。专家指出，在采用 A、B、C 3 类编址方式后，虽然方便了 IP 地址的管理，但浪费了上千万的地址，特别是 B 类地址。例如，一个需要 300 部电脑连上互联网的公司，使用一个 C 类地址（254 个地址）是不够的；使用两个 C 类地址会使路由选择表暴涨，从而影响了外部路由协议的性能；另外的选择是使用一个 B 类地址（65534 个地址），但却浪费了 65234 个地址。

而且，美国一些大学和公司占用了大量的 IP 地址。国际电信联盟副秘书长赵厚麟日前表示，美国人口只有 3 亿，但掌握的 IP 地址接近全球总数的 40%，其中大部分一直被闲置。

另一方面，在互联网快速发展的国家，如欧洲很多国家，以及日本和中国由于得不到足够的 IP 地址，最后导致互联网地址耗尽和路由表暴涨。到目前为止，A 类和 B 类地址已经用完，只有 C 类地址还有余量。

另外，目前占有互联网地址的主要设备早已由 20 年前的大型机变为 PC，宽带业务正在飞速发展，访问 Internet 的终端类型越来越丰富，除了传统的 PC，越来越多的其他设备也要连接到互联网上，包括 PDA、手机、汽车、各种家用电器等。特别是手机，为了向第三代移动通信标准靠拢，几乎所有的手机厂商都在向国际因特网地址管理机构 IANA 申请地址。IANA 的 IPv4 地址在 2011 年 2 月 3 日已经分配完毕，5 个 RIR 管理的地址空间中，RIR 亚太地区已经分配完毕。而随着物联网的发展，将会使所有的信息设备智能化联网，如传感器、RFID 读卡器、智能楼宇设施等要接入互联网，都需要有 IP 地址的支持，物联网的发展将需要更多的地址空间，IPv4 显然已经无法满足这些要求。

下一代互联网 IPv6 过渡技术与部署实例

为解决 IPv4 地址枯竭的现象，IPv6 (Internet Protocol version 6) 应运而生。

IPv6 是 IETF 设计的用于替代 IPv4 的下一代互联网协议。其最主要的特点就是地址空间几乎无限。与 IPv4 不同的是，该协议规定的地址长度为 128bit，地址空间比 IPv4 增大了 2^{96} 倍，可以很好地解决 IP 地址分配不足的问题。目前 IPv4 正在向 IPv6 过渡。

1.1.1 国际国内 IPv4 地址枯竭形势

2011 年 2 月 3 日，国际互联网名称和编号分配公司 (ICANN) 公布了一条“可以载入史册的”新闻：“最后一批 IPv4 地址今天分配完毕，IP 地址总库已经枯竭。”该消息一经传出，立即引起全球网民的高度关注。

谷歌副总裁兼首席互联网顾问文顿·瑟夫有“互联网之父”之称，他曾预言“IP 地址即将在几周内用完”，没想到在他发表此言论的两周后，这句话就得到了印证。

我们从中国互联网络信息中心 (CNNIC) 了解到，截至 2010 年年底，我国持有的 IPv4 地址数量为 2.77 亿，还不到全球 IP 地址总数的 10%，而中国互联网用户达 4 亿多，远远超过了中国 IP 地址的容量。如今，IP 地址耗尽，中国网民会不会面临无网可上的困境？

CNNIC 的 IP 地址业务负责人赵巍在 2011 年年初曾经认为：“IP 地址用完的影响不会马上显现。”在我国拥有的 IPv4 地址中，运营商手中掌握了部分 IPv4 地址可以供使用，但随着运营业务的发展，如果不采取措施，运营商手中的 IPv4 地址仅仅能够支撑 1~2 年。

专家预计，IP 地址资源的紧缺与各国的加速争抢会形成恶性循环，未来企业获得 IP 地址的成本会越来越高。DCCI (中国互联网数据中心) 总经理胡延平曾对媒体表示：“IPv4 地址枯竭对于提供互联网数据 (IDC) 服务的企业会造成困扰。”比如某企业要在 IDC 上托管服务器，IDC 会分配一个 IP 地址。现在 IPv4 地址枯竭了，企业可能就要共享一个 IP 地址，IDC 的服务就会大打折扣。绝大多数 IDC 厂商由于其 IP 资源需要通过电信运营商购买，价格已经从原来的几十元升至几百元，到达最终用户的手中的价格自然更贵。

IPv4 地址短缺虽然短期内影响不大，不过专家提醒，如果长期 IP 地址耗尽的问题得不到解决，对于普通网民来说，IP 地址资源的紧缺可能导致上网费用上升。对于新入网用户来说，如果分不到 IPv4 地址，那么访问现有的互联网资源和服务将受到很大限制；对于运营商和内容提供商来说，没有足够的 IPv4 地址会制约其提供新的服务。

1.1.2 应对 IPv4 地址枯竭的手段

为了应对地址枯竭的严峻形势，人们早就开始研究应对的手段，概括来说主要有存量地址的挖潜、私网地址的引入、引入 IPv6 地址 3 种。

(1) 存量地址的挖潜

对存量地址的挖潜就是利用管理手段和技术手段重新梳理已经使用的 IPv4 地址，通过回收、合并、调剂、复用等方法使 IPv4 地址的分配更加合理，使用的效率更高。原有的地址规划一般是通过需求预测来分配的，但后来的使用情况与事先的预测不完全一致，多少不均。因此需要运用管理手段来重新进行地址规划。但这种方式在一个运营商或企业之内可以根据情况采用，不同运营商或企业之间很难实行。目前运营商内部的地址挖潜主要是：零散地址回收、合并，控制专线互联网业务每个用户地址的使用数量，推动萎缩型业务退网，同类型业务地址之间的调剂、复用，等等。

通过技术手段进行存量地址的挖潜主要是通过动态地址分配和无域间路由（CIDR）来实现。很多业务都采用了动态地址分配的技术，即在用户需要公网地址的时候，从地址池中临时分配一个地址，用户下线时释放该地址。采用这种方法，公网地址数量的配置需要根据用户上网行为合理配置，以达到提高地址利用率的目的。另外一种方法，无域间路由技术则已经为大家熟知，并广泛运用于地址分配领域。它支持任意长度的子网掩码，可以按需一级一级地分配地址。

（2）私网地址的引入

私网地址是应对地址枯竭的一种非常快速和有效的手段。私网地址在 IPv4 地址中定义了 10/172/192 3 段，不同网络的私网地址可以重复，因此不能在公网上路由。私有地址用户访问公网时必须使用 NAT 技术转换为公网地址。NAT 技术可以将一个地址加上端口号后分给多个用户使用，大大节约了 IPv4 地址的使用。根据现网统计，1 个公网地址可转换 60 个私网地址，即满足 60 个在线宽带用户的地址需求。这种方法大大节约了公网 IPv4 地址，解决了私网地址之间冲突的问题，并且隐藏了私网的拓扑结构，相对安全和易管控。但是 NAT 也带来了一系列的问题：增加了报文的延迟；增加了维护和配置的复杂性；破坏了互联网端到端的特性，导致某些应用无法使用（如 FTP、即时通信等）；用户溯源困难；大容量的 NAT 设备易成为网络瓶颈，等等。

（3）引入 IPv6 地址

IPv6 是针对 IPv4 地址的不足而设计出来的一套协议，对网络架构、应用等基本无影响。IPv6 地址有 128 位， 2^{128} 个地址的数量远远大于 32 位的 IPv4 地址数。海量的地址空间不仅可以支持人之间、人物间的通信，也可以支持物物间的通信，极大地支持了物联网业务的发展。它在安全性和扩展性上也较 IPv4 地址做了改进，但是它在协议标准、设备及终端支持、产业链等方面尚未完善。

1.1.3 产业链各方向下一代互联网演进策略

2011 年，IPv6 产业链整体处在规模试点阶段。从总体发展来看，呈“纺锤形”不均衡发展，即：网络准备度好，应用匮乏，终端改造成本高。

（1）固网终端

终端改造有难度，改造成本高。主流的 PC 操作系统 Windows XP 不支持 IPoEv6/PPPoEv6，需开发软终端才能完成 IPv6 认证和接入，Windows 7、Windows Vista 支持 IPv6，但非主流；桥接型网关可透传双栈业务，不需要改造，现网路由型家庭网关（HG）不支持 IPv6，路由型家庭网关改造成本高。

（2）移动终端

业界智能手机主流操作系统（如 Symbian、Android、iOS）均支持 IPv6 协议栈，但手机能否实现 IPv6 接入，还取决于手机芯片和软件平台是否适配 IPv6 操作系统。目前只有个别手机支持 IPv6，C 网和 TD 手机很少支持 IPv6。数据卡桥接模式支持 IPv6 接入，WCDMA、cdma2000、TD-SCDMA 及 LTE 的主流芯片厂商高通、威盛、联芯等也有计划后续支持 IPv6。

（3）承载网络

网络双栈改造支持度高。经过中国电信、中国移动、中国联通两年多的测试和现网试点验证，现网 70% 左右的路由器和 BRAS 支持双栈升级，城域核心、骨干网双栈改造技术成熟，

下一代互联网 IPv6 过渡技术与部署实例

接入网设备类型复杂, IPv6 试点初期可二层透传双栈业务, 后期 IPv6 双栈改造成本高。核心网主流 GGSN/PDSN 设备支持双栈改造, RAN 只需 IPv4 透传 IPv6 即可, 支撑网平台支持双栈改造。

(4) 业务和应用

当前, IPv6 的应用整体较少, 整体占比小于 0.5%, 业务和应用匮乏, 阻碍 IPv6 产业链均衡发展。与 3G、4G 不同, IPv6 只是网络层基础协议, 目前还没有带来巨大商业价值的具体业务, ICP 和运营商向 IPv6 迁移还存在成本和投入风险, 导致 ICP 对发展 IPv6 不积极, 运营商对 ICP 开通 IPv6 业务影响有限。国内当前开通 IPv6 服务的网站主要集中在教育、科研和校园网, 未见主流 ICP 开通 IPv6 的明确计划。

1.2 IPv6 的发展历程及现状

作为 IPv4 的“接班人”, IPv6 地址由原来的 32 位扩充到 128 位。也就是说, IPv6 理论上可以产生近乎无数个 IP 地址, 确切地说, 是 34 后面带 36 个零。这个天文数字意味着, 如果全球有 1800 亿亿网民, 每人拥有 1800 亿亿互联网终端, 所有这些终端同时上网, IP 地址仍有富余, 可以“让地球上的每一粒沙子都具有一个 IP 地址”。

但是从 1995 年准备到现在, IPv6 推广情况并不理想。虽然随着全球 IPv4 地址告急, 越来越多的国家启动 IPv6 发展计划, 欧、美、韩、日、澳及人口大国(如中国、巴西、俄罗斯)发展最快, 均有或正在实施 IPv6 实验网, 但全球当前 IPv6 用户渗透率仍低于 1%。

目前, 全球仅有几家运营商启动 IPv6 试商用, 主要是 NTT、Verizon 和 AT&T, 西欧和中国处于第二梯队, IPv6 已经开始从实验网走向现网试点, 今年还有可能实现小规模试商用。

我国于 2003 年在国家发改委的牵头下, 启动 CNGI 实验网建设。中国移动、中国电信、中国联通等运营商已经在国内逐步部署了具有一定规模的 IPv6 骨干网络。其作为国家级 IPv6 实验网骨干, 已经实现与国际 IPv6 互联网对接。目前, 下一代互联网已列入我国“十二五”发展纲要中, 工业和信息化部在向运营商征询“十二五”互联网的规划意见, IPv6 是下一代互联网规划的重点。

在 IPv6 标准的制定上, 通过各标准化组织的协作和联合, IPv6 协议标准已逐步完善, 过渡技术还需要探索验证。

与 IPv6 相关的标准化组织包括 IETF (因特网工程任务组)、ITU-T (国际电信联盟标准化部门)、3GPP (第三代合作伙伴计划) 等, 各个组织有不同的着眼点和侧重点。IETF 主要致力于 IPv6 在因特网中的应用, ITU-T 主要致力于 IPv6 在电信网中的应用, 3GPP 主要致力于 IPv6 在核心网中的应用。作为下一代网络中的核心协议, IPv6 标准的制定需要多个相关组织的协作与联合。

IPv6 标准体系主要包括资源(编址和域名等)、网络、应用、安全和过渡技术几方面。

① 资源类和网络类协议标准主要由 IETF 负责。核心标准已完善, 可以满足 IPv6 组网需要。

② 应用类标准由 IETF、3GPP、ITU 等多个组织负责。移动宽带和固定宽带应用基本完善, 但 NGN 类没有完成。

③ 安全类标准还不完善, 特别是网络可信度方面。

④ 过渡技术类标准中 IPv6 迁移的过渡技术标准，如双栈和隧道已完善，但完善的电信级网络地址转换（NAT）技术标准尚未完成。

1.3 IPv6 技术的新特点

制定 IPv6 的专家们充分总结了早期制定 IPv4 的经验以及互联网的发展和市场需求，认为下一代互联网协议应侧重于网络的容量和网络的性能。IPv6 继承了 IPv4 的优点，摒弃了它的缺点。IPv6 与 IPv4 是不兼容的，但它同所有其他的 TCP/IP 协议簇中的协议兼容，即 IPv6 完全可以取代 IPv4。同 IPv4 相比较，IPv6 在地址容量、安全性、网络管理、移动性以及服务质量等方面有明显的改进，是下一代互联网可采用的比较合理的协议。IPv6 协议的技术优势主要体现在以下几方面。

1.3.1 地址管理

(1) 地址空间扩大

极大的地址空间是 IPv6 最令人瞩目的特征。IPv6 采用 128bit 地址长度，地球表面平均每平方米可以分配到超过 1mol (6.02×10^{23}) 地址，即使 H （地址分配效率系数， $H = \log$ 地址数/位数）保持在 0.22~0.26 的水平，也足够在可以预见的未来几十年内使用。地址长度的增加，并不仅仅是地址数量的增加，还给地址分配、自动配置等方面带来质的提高。

(2) 地址分配合理

IPv6 不必受地址资源限制而捉襟见肘，所以在地址格式设计、地址分配等方面尽可能做到合理，同时为不可预见的问题留有足够的余地。

IPv6 地址分为单播、多播、任播 3 类，并为将来保留了 85% 的地址。根据 IPv6 单播地址作用范围的不同，又分为可聚合全球单播地址、链路本地地址和站点本地地址。此外，还有一些特殊地址也属于单播地址，如内嵌 IPv4 的 IPv6 单播地址，为 NSAP 和 IPX 保留的地址等。

IPv6 取消了 IPv4 地址类的概念，64 位作为网络号，64 位作为主机号。网络号根据需要进一步划分，对地址格式做了详细定义，方便了聚类 and 路由，预留了一定地址位数以应付未能预见的问题。IPv6 地址为 ISP 所有，避免了 IPv4 地址用户所有带来的地址浪费和 ISP 路由聚类困难。

(3) 自动配置和移动支持

自动配置是 IPv6 的重要进步，分为无状态自动配置和有状态自动配置两种方式。一个节点只需要将自己链路层的 IEEE EUI-64 地址作为主机号，结合 ISP 提供的本地网络号，就能够通过 IPv6 的自动配置得到唯一的 IPv6 地址，实现“即插即用”。

“即插即用”简化了网络管理和控制，使得移动 IPv6 比 IPv4 更容易实现和管理，同时移动 IPv6 还对代理联络和安全策略做了大量改进，邻居发现等新技术也给移动 IPv6 以强有力的支持。

1.3.2 改进报头

IPv6 是对 IPv4 彻底改革而不是修补的重要体现，是对数据报报头的改进，这也是 IPv6 在其他方面重大改进的基础。IPv4 报头不定长且结构复杂，主机和路由器都难以提高处理效

率。IPv6 简化了基本报头，降低了处理复杂度，并使用扩展报头提高适应性和扩展性。

(1) 简化报头

IPv6 省去了 IPv4 报头中的部分字段以简化结构，IPv6 地址长度是 IPv4 的 4 倍，但报头长度只有 IPv4 的 2 倍。IPv6 的基本头部为固定长（40Bytes），无需头标长度标识。IPv6 只支持端点对端点分段，不再需要标识符、标志和偏移量字段。IPv6 取消了头标校验和字段，以简化对数据报报头的处理。

IPv6 对 3 个字段重新命名，并赋予新的含义。IPv4 数据报总长度由 IPv6 的有效载荷长度代替。IPv6 把协议类型字段重新命名为“下一报头”，指明在 IPv6 基本报头后面报头的类型，它可能是一个扩展报头或数据净荷。IPv6 中用跳数限制表示取代了 IPv4 的生存期概念。

(2) 扩展报头

IPv6 的扩展报头模式借鉴了 IPv4 任选项，将报头中不是每个节点都用到的字段改为可选项处理，附加在基本报头后构成扩展报头。大多数 IPv6 扩展报头不受路由器的检查，从而提高了路由器的转发效率。目前 IPv6 已定义的可选扩展报头有：逐跳可选报头、接收端可选报头、选路可选报头、分段可选报头、验证可选报头、封装安全净载荷可选报头和上层协议可选报头。一个 IPv6 数据报可以根据需要携带零个、一个或多个扩展报头，提供了最大的灵活性。IPv6 扩展报头的结构类似于数据结构中的指针链表，基本报头和每一个扩展报头都包含下一个报头（Next Header）字段，每一个扩展报头都由特定的下一个报头值（Next Header Value）来确定。

1.3.3 改进路由

(1) ICMPv6

ICMP 并不是 IP 层路由功能的一部分，但 IPv6 很多路由方面的新特征都依赖于 ICMP。IPv6 对 ICMP 做了大量改进，升级为 ICMPv6。ICMPv6 具备目前 ICMP 的基本功能，并综合了原 IPv4 中分属不同协议完成的功能。多播收听者发现（MLD）用 ICMPv6 消息取代了 IPv4 所用的因特网组管理协议（IGMP），管理多播成员资格，使得效率和安全性有了明显提高。

ICMPv6 实现的更重要的新功能是邻居发现协议（NDP）。NDP 是 IPv6 协议的一个基本的组成部分，用来管理同一链路上节点间的通信。NDP 取代了数据链路层的 ARP，抑制了广播风暴，提高了安全性。NDP 能够完成邻居发现和路径 MTU，为 IPv6 的源主机分段提供信息。路由器通过 NDP 宣告邻接路由器转发数据报，通知发送端重定向，实现最佳路由。此外，NDP 还为自动配置提供网络前缀等参数，检测地址可达性和重复地址。

(2) 从 BGP-4 到 IDRP

IPv6 域间路由最大的改进在于 IDRP 替代了 BGP-4。由于 BGP（Border Gateway Protocol，边界网关协议）对 32 位的 IPv4 优化程度相当高，很难为 IPv6 升级，因此 IPv6 所使用的外部网关协议以 IDRP（Inter Domain Routing Protocol，域间路由选择协议）为基础。

IDRP 和 BGP-4 的主要区别有：

- ① BGP 报文通过 TCP 交换，IDRP 协议单元直接通过数据报服务来传递；
- ② BGP 是一个单地址族协议，IDRP 可以使用多种类型的地址；
- ③ BGP 使用 16 位的自治系统编号，IDRP 使用变长的前缀来标识一个域。BGP 描述的

是路径所通过的自治系统编号的完整列表，而 IDRP 能对这个信息进行聚集。

(3) 源主机分段

实践证明 IPv4 逐跳分段并不理想，增加了路由器负担，一个分段的丢失会导致所有分段重传。IPv6 分段只发生在源节点，简化了报头并减少了路由器的分段开销。IPv6 要求各节点间 MTU 的最小值为 1280Bytes，兼顾了网络效率和旧设备投资，并要求所有节点支持路径 MTU 发现，根据链路状况选择最佳分段大小。

通过以上路由方面的改进，再加上地址格式的变化和报头的简化，大大降低了主机和路由器的复杂性和负荷。据 Cisco 资料表明，在 Cisco 2600 系列路由器中配置的 IPv4 内核为 2.17MB，如计算存放路由表的工作区则升至 3.2MB，而配置 IPv6 的内核时，其内核仅为 1.69MB，加上工作区也不过 2.7MB，而且路由效率有明显提高。

1.3.4 安全机制

(1) IPSec

IP 层最初没有安全性方面的考虑，认证和保密都是由上层协议来完成的，很多黑客攻击就是利用了 IP 层这方面的不足。IPSec 协议族就是为在 IP 层实现安全性而设计的，IPv4 和 IPv6 都可以使用，所不同的是 IPSec 必须加以修改或改进才能应用在 IPv4 中，而 IPSec 是 IPv6 的重要组成部分，IPv6 所有应用从一开始就具有这些安全特性。

(2) AH 和 ESP

安全性一般认为有 3 个要求：身份认证、保密性和完整性，IPSec 的目标是实现前两个要求。RFC 1826 定义了认证头部 (AH, Authentication Header)，RFC 1827 定义了加密安全净载荷 (ESP, Encrypted Security Payload)。前者提供认证机制，通过认证过程保证接收者得到的数据报来源是可靠的，而且在传输过程中没有被偷换。后者使用密钥技术，保证只有合法的接收者才能读取数据报的内容。IPv6 使用扩展报头实现 AH 和 ESP。

(3) 安全关联

认证和加密要求发送者和接收者就密钥、认证和加密算法以及一些附属细节达成一致。这套约定机制组成了发送者和接收者之间的一种安全关联。接收者在接收到数据报后，只有在能将其与一种安全关联的内容相关联时，才能对其进行验证和解密。所有的 IPv6 验证和加密数据报都带有安全参数索引 (SPI, Security Parameter Index)。

1.3.5 增强服务质量

IPv4 对不同的用户和不同的应用都不加区分，采取尽力而为的传输方式，服务质量 (QoS, Quality of Service) 难以保证。而 IPv6 通过设置优先级、数据流标签等方式，对 QoS 特别是 VoIP 等实时数据流的传输提供了很好的支持。

(1) 优先级

IPv6 报头的通信流类型 (Traffic Class) 可理解为优先级标识，数值越大优先级越高。

IPv6 将业务分为两大类，阻塞控制业务和非阻塞控制业务，前者在网络阻塞时流量会降低，而后者不会变化，用于声音和视频传输。IPv6 为阻塞控制业务分配编号 0~7 的优先级，推荐电子邮件为 2，大量数据传输 (如 FTP) 为 4，交互式 (如 Telnet) 为 6。对于非阻塞控制业务，根据媒体质量的不同分配编号 8~15 的优先级。