



“十一五”国家重点图书·军事信息技术学术丛书

XINYIDAI
HULIANWANG JIAOHUAN
YU LUYOU JISHU

新一代 互联网交换与路由技术

龚正虎 孙志刚 等著

国防科技大学出版社

国家重点基础研究项目研究资助
国防科技大学学术专著专项经费

“十一五”国家重点图书·军事信息技术学术丛书

新一代互联网交换与路由技术

龚正虎 孙志刚 等著

国防科技大学出版社
长沙

内容简介

本书阐述了新一代互联网交换与路由技术。全书共分七章,分别讨论新一代互联网体系结构、路由器多维可扩展问题、路由器交换理论与技术、域间路由稳定性问题、域间路由优化技术、域间路由协议并行化技术和高性能路由器实现技术。

本书内容丰富、知识新颖,对信息领域内广大科研教学人员和研究生来说,是一本很好的学习和了解新一代互联网的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新一代互联网交换与路由技术/龚正虎,孙志刚著. —长沙:国防科技大学出版社,2009.12

ISBN 978-7-81099-726-3

I. 新… II. ①龚… ②孙… III. 因特网—路由选择
IV. TN915.05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 198562 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)84572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:唐卫藏 责任校对:文 慧

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

※

开本:787×1092 1/16 印张:32 字数:507 千
2009 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-1000 册

ISBN 978-7-81099-726-3

定价:60.00 元

前 言

互联网已取得了很大成功,但是,也存在很多缺陷和不足。为此,近 20 年来,互联网专家一直在研究改善和提高互联网性能的技术(包括 IPv6、防火墙、移动 IP、Ipsec 等)。然而,这种修修补补的做法未能从根本上解决互联网存在的问题。互联网专家意识到:人类需要新一代互联网 NGI(New Generation of Internet),因而进入 21 世纪后,网络界兴起了 NGI 研究热潮。本书第一章对现行互联网特点、成功与失败教训和 NGI 需求进行了分析,阐述了 NGI 体系结构组成元素和研究 NGI 体系结构的思路、方法、模型以及相关研究内容,介绍了 NGI 体系结构的国内外状况和具有代表性的 NGI 体系结构方案。

交换和路由是互联网的核心技术。交换决定网络报文从路由器一个端口输入而后从另一个端口输出的过程(校验、分类、查表、过滤、整形、调度、重组、转发等),路由决定网络报文从发送者经多个路由器达到接收者的路径品质(长度、流量、稳定性、安全性等)。交换技术和路由技术最终要在路由器中实现,因而高性能路由器研发能力就成为衡量国家信息技术水平的重要标志之一,成为 NGI 最重要研究内容。本书第二章和第三章讨论 NGI 交换技术,第四章、第五章和第六章讨论 NGI 路由技术。第二章对路由器多维可扩展问题、集群路由器协同机制等问题进行了系统阐述,第三章对路由器的交换

理论和交换结构进行了深入阐述,第四章系统讨论域间路由稳定性问题,第五章深入讨论域间路由优化技术,第六章研究域间路由协议并行化技术。

本书作者在高性能路由器研制方面做了艰苦的努力,积累了一定经验。第七章以其实际研究工作为基础,深入阐述了高性能路由器的关键实现技术和解决方案。

本书第一章由龚正虎编写,第七章由孙志刚编写,第二章由吕高峰、胡晓锋等编写,第三章由戴艺、管剑波等编写,第四章由何俊锋、朱柯等编写,第五章由赵锋、刘亚萍等编写,第六章由高蕾、张晓哲等编写。本书得到 973 项目“大规模流媒体的高速传输控制研究”的支持,所有作者是该项目的参加者。本书作者感谢 973 项目首席科学家吴建平教授对本书编写工作的指导。

本书既可作网络科研及技术开发人员的参考书,也可作大专院校本科生和研究生的参考教材。作者相信本书由于其系统性、先进性和可读性能吸引众多读者,相信本书有益于推动我国新一代互联网技术的发展。作者热情欢迎读者对本书提出批评意见,更正书中的错误。

作 者

2009 年 6 月

目 录

第一章 新一代互联网体系结构研究

1.1 概 述	(1)
1.1.1 新一代互联网(NGI)的含义	(1)
1.1.2 互联网体系结构的含义	(3)
1.1.3 研究体系结构的意义	(4)
1.2 现行互联网回顾与评说	(5)
1.2.1 互联网的发展史	(5)
1.2.2 互联网的成功经验	(7)
1.2.3 互联网存在的问题	(12)
1.3 NGI 及其体系结构初探	(13)
1.3.1 NGI 体系结构问题领域	(13)
1.3.2 NGI 体系结构关联领域	(14)
1.3.3 NGI 体系结构研究思路	(20)
1.4 GENI/FIND 计划	(24)
1.4.1 GENI 研究议题	(25)
1.4.2 FIND 研究内容	(33)
1.5 NGI 体系结构典型方案	(34)
1.5.1 基于端到端路径的体系结构	(34)
1.5.2 基于会聚点的体系结构	(48)
1.5.3 其他思想的体系结构	(50)
1.6 小 结	(53)
参考文献	(54)

第二章 新一代可扩展路由器体系结构

2.1 概 述	(56)
---------------	--------

2.1.1	路由器可扩展	(56)
2.1.2	扩展方法	(58)
2.1.3	研究进展	(60)
2.2	可扩展路由器	(61)
2.2.1	面向控制的扩展	(61)
2.2.2	面向应用的扩展	(80)
2.3	可扩展集群路由器	(86)
2.3.1	面向控制的扩展	(86)
2.3.2	面向应用的扩展	(103)
2.4	可扩展网络	(107)
2.4.1	面向控制的扩展	(107)
2.4.2	面向应用的扩展	(124)
2.5	小 结	(132)
	参考文献	(133)

第三章 高性能交换理论与技术

3.1	概 述	(141)
3.2	单级交换结构及其调度算法	(143)
3.2.1	Crossbar 体系结构	(146)
3.2.2	输出排队与输入排队	(146)
3.2.3	输入排队调度算法	(148)
3.3	带缓冲的 Crossbar 交换	(161)
3.3.1	交换变长报文的带缓冲的 Crossbar	(163)
3.3.2	交换定长信元的带缓冲的 Crossbar	(171)
3.3.3	带缓冲的 Crossbar 的 QoS 特性	(173)
3.4	负载均衡交换结构	(174)
3.4.1	基于两级 Crossbar 的负载均衡交换结构	(174)
3.4.2	基于两级 Mesh 网络的负载均衡交换结构	(176)
3.5	并行报文交换结构	(180)
3.5.1	定义	(182)

3.5.2 PPS 体系结构	(184)
3.5.3 PPS 的 QoS 特性	(189)
3.5.4 分布式信元分派算法	(193)
3.5.5 PPS 的维序调度算法	(197)
3.6 多级交换结构	(198)
3.6.1 多级交换网络拥塞控制机制	(200)
3.6.2 3D Torus 交换网络中的报文路由算法	(202)
3.7 可扩展路由器体系结构——MPFS	(215)
3.7.1 MPFS 体系结构	(216)
3.7.2 MPFS 中 FIB 查找的实现	(218)
3.8 小 结	(222)
参考文献	(224)

第四章 BGP 协议稳定性问题

4.1 BGP 协议稳定性问题概况	(233)
4.1.1 BGP 协议基本概念	(233)
4.1.2 BGP 协议稳定性问题概况	(235)
4.2 BGP 路由振荡问题	(238)
4.2.1 路由振荡问题描述	(238)
4.2.2 路由振荡问题的解决方案	(239)
4.2.3 路由振荡抑制(Route Flap Damping)	(245)
4.2.4 关于路由振荡问题的建议解决方案	(250)
4.3 BGP 收敛延迟问题	(255)
4.3.1 BGP 路由收敛问题	(255)
4.3.2 BGP 路由收敛延迟问题	(260)
4.4 BGP 路径增长问题	(266)
4.4.1 BGP 路径增长问题描述	(268)
4.4.2 一种简单的价格机制	(269)
4.4.3 离散型门限价格机制	(274)
4.5 BGP 域内路由稳定性研究	(277)

4.5.1	路由振荡	(278)
4.5.2	动态稳定路径问题(Dynamic Stable Path Problem, D-SPP)	(284)
4.5.3	消除秩函数时变性算法	(291)
4.6	结束语	(292)
4.6.1	本章小结	(292)
4.6.2	下一步的工作	(293)
	参考文献	(295)

第五章 域间路由优化理论与技术

5.1	路由的发布与选择	(302)
5.1.1	域间路由信息的发布	(303)
5.1.2	路由决策	(304)
5.2	典型问题	(306)
5.2.1	IBGP 拓扑的可视性问题	(306)
5.2.2	IBGP 拓扑的健壮性问题	(307)
5.2.3	热土豆算法的缺陷	(308)
5.3	IBGP 拓扑优化	(310)
5.3.1	构建完全可视的 IBGP 拓扑	(310)
5.3.2	构建健壮的 IBGP 拓扑	(319)
5.4	BGP 出口选择优化	(337)
5.4.1	域间流量工程简介	(337)
5.4.2	域间路由优化结构	(343)
5.4.3	BGP 出口选择优化算法与机制	(356)
5.5	路由优化辅助工具	(365)
	参考文献	(367)

第六章 BGP 协议并行化理论与技术

6.1	概 述	(373)
6.2	网络协议并行研究方法	(377)

6.2.1 功能并行	(378)
6.2.2 数据并行	(382)
6.3 分布式 BGP 协议软件体系结构	(385)
6.3.1 问题描述	(385)
6.3.2 分布式 BGP 体系结构	(385)
6.3.3 分布式 BGP 实现流程	(387)
6.3.4 优势与不足	(387)
6.4 面向集群路由器的 BGP 协议并行处理技术研究	(389)
6.4.1 集群路由器控制平面软件系统	(389)
6.4.2 BGP 协议功能卸载技术	(393)
6.4.3 BGP 协议的并行路由计算技术	(395)
6.5 基于邻居会话划分的 BGP 协议并行处理技术	(398)
6.5.1 基于随机回报 Petri 网的 BGP 协议性能模型与评价	(398)
6.5.2 BGP 协议并行处理模型及关键算法	(403)
6.5.3 多路由协议并行中的转发表同步机制	(409)
6.5.4 基于抖动优化的转发表同步算法	(411)
6.6 面向多核结构的 BGP 协议并行处理技术	(414)
6.6.1 多核处理器研究概述	(415)
6.6.2 面向多核处理器的 BGP 协议处理技术	(422)
6.6.3 并行编程模型与并行编译技术	(429)
6.7 XORP 中 BGP 协议实现研究	(432)
6.7.1 XORP 概述	(432)
6.7.2 XORP 中的 BGP 协议实现	(434)
6.8 小 结	(434)
参考文献	(437)

第七章 路由器实现新方法和技术

7.1 商用高性能路由器体系结构	(443)
7.1.1 Cisco CRS - 1	(443)

7.1.2	Juniper T640	(446)
7.1.3	银河风云 GF8516	(451)
7.1.4	面临的挑战	(456)
7.2	网络处理器设计中的存储问题	(458)
7.2.1	网络处理器模型	(458)
7.2.2	存储器技术现状	(461)
7.2.3	分组转发对存储器的要求	(461)
7.2.4	现有解决思路	(465)
7.3	路由器节能	(468)
7.3.1	互联网的节能	(468)
7.3.2	核心路由器的能量消耗	(474)
7.3.3	路由器节能的思路	(474)
7.4	虚拟化网络中的路由器	(478)
7.4.1	虚拟化互联网体系结构	(478)
7.4.2	虚拟化技术在路由器中的应用	(480)
7.4.3	虚拟化的路由交换平台	(483)
7.5	一种新型的路由器体系结构	(485)
7.5.1	FIS 处理机制	(485)
7.5.2	FIB 查找的实现	(489)
7.5.3	性能评测	(493)
7.5.4	160T 路由器的实现方案	(495)
7.6	小 结	(498)
	参考文献	(498)

第一章 新一代互联网体系结构研究

1.1 概 述

1.1.1 新一代互联网(NGI)的含义

新一代互联网(New Generation of Internet)与下一代互联网(Next Generation of Internet)的英文缩写名相同,都是 NGI。后者专指 IPv6 网络,而前者涵义更广一些。现在,人们还经常提到未来一代互联网 FGI(Future Generation of Internet)这个名词。或许,FGI 的涵义更广,所讨论的互联网是人类未来 15 年或更远的互联网。因此,我们可以说,所有关于解决现行互联网存在问题以及寻求更好网络的研究(理论、体系结构、方法、技术)都属新一代互联网的范畴。除此之外,电信领域也有新一代网络 NGN(New Generation of Networks)与下一代网络 NGN(Next Generation of Networks)的说法。一般地说,NGN 指的是怎样在 IP 网络上开展电信业务的技术总称。

本书所说的新一代互联网包括 FGI,但不包括 NGN。

什么是新一代互联网?我们并未见到权威的定义。

美国国家科学基金会 NSF(National Science Foundation)的 NeTS(Networking Technology and Systems)项目有一个关于 FGI 的子项目 FIND(Future INternet Design)^[3]。FIND 认为新一代互联网应是一个适应 15 年后人类需求的网络,是一个支持人类普适计算和可信计算、容纳人类未来创新活动、为人类创造数字生活的网络,是一个物理世界和虚拟世界的桥梁。

我国科技部 973 项目“新一代互联网体系结构理论研究”认为^[3], 新一代互联网应具有“更大、更快、更及时、更方便、更安全、更可管理和更有效”的标志。“更大”指的是新一代互联网络将采用 IPv6 为基本网络层协议,从而彻底解决目前的 Internet 地址空间缺乏的问题,为新一代互联网络的进一步发展奠定基础;“更快”指的是和目前的 Internet 相比,新一代互联网络中用户的端到端性能必须得到很大的提高,至少达到 100Mbps 以上;“更及时”指的是新一代互联网络必须支持组播和面向服务质量的传输控制等功能,从而可以更及时地为用户提供各种实时多媒体信息;“更方便”指的是新一代互联网络必须能够支持更加方便快捷的接入方式,支持终端的无线接入和移动通信(比如和 3G 移动通信的结合)等;“更安全”指的是新一代互联网络必须提供可信任的网络服务,包括网络对象识别和网络攻击防范等等;“更可管理”指的是新一代互联网络必须提供更方便灵活的管理手段,对网络运行的各个方面实施全面高效的管理;“更有效”指的是新一代互联网络必须提供合理的盈利模型,提供方便的计费手段,使网络更加有效地运行。

NGI 可能会是一个重新建造的网络。例如,NeTS 的 FIND 项目的思路就是这样。既然 NGI 体系结构不同于今天的互联网,那么,它应该是一个重新建造的网络。如果是这样,现行互联网怎样过渡到 NGI 就成为一个关键问题,甚至是 NGI 体系结构本身的一个关键问题。这不仅是一个技术问题,更重要的是一个商业与经济问题,还可能是一个社会问题。现行互联网有数亿用户,积累了大量信息资源,运行着成千上万的软件。如果将这些用户、资源和软件迁移到 NGI 需要过多的费用、人力和时间,不管多么好的 NGI 都会失败。技术上,仅仅试图用网关和双协议栈将 NGI 和现行互联网连接起来是不能解决问题的,必须将现行互联网的资源 and 软件迁移到 NGI 中,否则,NGI 就只会成为现行互联网的接入网。当前的 IPv6 就面临着这个严重问题。

新一代互联网可能会在现行互联网上逐步演化而成。实际上,IETF 一直在对现行互联网进行改造,有些是修修补补,但有些研究工作是关于互联网体系结构的。有些原本认为是现行互联网严重的缺陷和问题,经过“修修补补”之后得到有效改进、缓解,甚至是根本解决。例如,NAT 缓解了 IPv4 地址即将耗尽问题;各个协议全面引入加密、认证等一系列措施后,改进了互联网的安全性;今天的互联网增加了移动

IP、IP 电话信令、分布计算等协议。也许,现行互联网经不断演化,NGI 不知不觉地就来到我们身边。当然,现行互联网向新一代互联网演化需要一个好的 NGI 体系结构的指导,纯粹的修修补补可能会使今天的互联网变得更糟糕。

1.1.2 互联网体系结构的含义

互联网最基本的功能是将信息从发信者传送到收信者。为了完成这项功能,需要解决许多基本问题。第一,怎样在网络中标识发信者和收信者?即怎样标识网络中所有硬件和软件实体或资源(命名与地址问题);第二,信息怎样从发信者有效传送到收信者(路由问题);第三,网络包含系统许多硬件和软件实体或资源,怎样将它们组织成一个有效系统;第四,需要为每层设计合适的协议机制与算法和层间接口方法。针对这些问题所提出的解决方案或框架,称之为互联网体系结构(Internet Architecture)。

我们还可以说,所有涉及全局性的问题,以及对网络硬软件设计和互联网组网与运行有指导和约束的问题都属于网络体系结构范畴。除此而外,互联网体系结构的设计原则也是互联网体系结构本身的一部分。按照 MIT 的 David D. Clark 等人的诠释^[1],网络体系结构是指导网络具体技术实现(如协议、算法等)的一组高层面的发展与设计原理。网络体系结构的核心任务是研究怎样将一个复杂目标系统分割成模块,以及怎样将这些模块组织成一个理想复杂系统(模块化艺术)。它所涉及的工作主要包括:

- 模块化和层次化:将系统分割成模块,定义合理层次,选择并清晰描述层间边界;
- 功能分片:某些系统功能(如安全、性能等)需要多层共同来实现,将这些功能进行合理垂直分片;
- 物理系统抽象:实际物理系统是一个由许多物理节点组成的网络,首先要描述物理网络的拓扑结构,而后要描述物理节点逻辑结构(运行那些模块和功能片);
- 可扩展性:考虑用户需求、计算机技术和通信技术发展,制定网

络扩展与进化策略等等。

互联网体系结构的高层面的发展与设计原理是:开放、自由、全社会参与的发展理念,简单、实用的协议与接口,核心简单、边缘复杂和“高脚酒杯”结构的可扩展策略。关于这些设计原理,后面有例说明。

今天的互联网采用四层以 TCP/IP 协议为核心的体系结构(或称 TCP/IP 体系结构)。这四层是:通信接口层、网络互联层、端端传输层和网络应用层。通信接口层可将各种各样的广域网、城域网和局域网接入到 IP 网络中。IP 协议是网络互联层协议,一种无连接的分组交换协议。运行 IP 协议的路由器仅仅负责将 IP 分组转发至目的网络,而将其他处理交给边缘设备。这样,今天的互联网具有“核心简单、边缘复杂”的特点。TCP 协议是端端传输层核心协议,与 UDP 一起,向网络应用层提供端端通信服务。目前,网络应用层运行数百种应用协议,而且还在增加。四层的 TCP/IP 体系结构呈现两头大、中间小的形态,因而人们将它叫做“高脚酒杯”结构。“高脚酒杯”结构允许异种网络接入,便于各种应用系统的开发,具有很好的可扩展性。

1.1.3 研究体系结构的意义

随着互联网的技术发展和应用的扩大,网络规模变大了,网络物理结构变复杂了,甚至网络协议也增加了许多,但是,互联网体系结构没发生变化(上述三个问题的解决方案基本没有改变)。人们发现互联网存在许多问题和缺陷,因此,20 多年来互联网专家一直在从两个方面努力研究解决这些问题以及克服这些缺陷的方法。第一方面研究是不改变互联网体系结构,通过增加新的协议或在原有协议中增加新的功能使互联网更安全、更快、更实用。第二方面研究是寻求新的互联网体系结构,或对原体系结构进行局部改造,使之适应互联网新需求。

第一方面研究的好处是互联网得到平稳发展,其缺点是修修补补后的互联网变得越来越复杂,越来越难于管理和控制,甚至产生许多比原来问题更难解决的新问题。例如,地址转换设备 NAT(Network Address Translator)的引入不但提高了用户接入网络的安全性,而且是解决 IPv4 地址枯竭问题的有效方法。但是,NAT 使许多端到端应用无法

运行(如 IP 电话)。为此,人们又来研究“跨 NAT”技术,提出了 UPnP(Universal Plug and Play)、STUN(Simple Traversal of UDP Through NAT)、TURN(Traversal Using Relay NAT)等。

第二方面研究的好处是可以从根本上解决某些互联网问题,其缺点是可能要重构互联网,将原有互联网的资源迁移到新网络中需要付出巨大费用。例如,针对 IPv4 地址枯竭等问题,人们提出了地址长度为 128 位的 IPv6 互联网。应该说,IPv6 是对 IPv4 进行局部改造而提出的新的互联网体系结构(体系结构中的地址问题),它不但较好地解决了地址枯竭、IP 安全、IP 移动等问题,而且有利于提高 IP 软件和路由软件的效率。但是,由于网络资源几乎都在 IPv4 网络上,因而 IPv6 网络的发展遇到很大阻力。

本章不讨论哪方面研究将取得最终胜利,仅仅讨论第二方面研究(新一代互联网体系结构)应该怎样进行。互联网体系结构的研究不但能够从总体上(甚至从理论上)去解决存在的和将要出现的问题,而且也能够为第一方面研究提供指导。无论如何,互联网体系结构的研究是一项不容忽视的工作。

本章第 2 节对现行互联网的发展以及成功经验和存在的问题进行认真的总结;随后,第 3 节对 NGI 体系结构问题领域、相关研究领域和研究模型进行讨论;然后,第 4 节介绍 GENI 和 FND 计划,从中探讨 GENI/FIND 的研究思路;最后,第 5 节介绍互联网体系结构方案。

1.2 现行互联网回顾与评说

1.2.1 互联网的发展史

1969 年,DARPA(Defense Advanced Research Project Agency)就建立了世界上第一个计算机网络 ARPAnet,并以 ARPAnet 为基础大力资助有关大学和研究机构进行异种网互连互通技术的研究,并于上世纪 70 年代推出了经典 TCP/IP 体系结构和协议规范,这就形成了互联网体系结

构。UNIX 操作系统的流行推动互联网第二次大发展。1983 年,加州大学伯克利分校推出 BSD 版本的 UNIX 操作系统,TCP/IP 软件捆绑在 BSD 中。随着 BSD 源代码的流行,捆绑在 BSD 中 TCP/IP 软件开始风行全世界,迫使几乎所有的计算机厂商和网络厂商不得不把 TCP/IP 软件植入他们封闭的操作系统和网络产品中,这样,TCP/IP 协议就成为事实上的工业标准。80 年代,互联网从军用走向民用(原 ARPAnet 分为 Milnet 和 Internet)。90 年代,由于信息服务技术(特别是 WWW 技术)的发展,互联网从学术界走向平民百姓,并开始商业化运行。

互联网的规模和性能发生了巨大变化。1969 年的 ARPAnet 只有四个节点。今天的互联网有 4 万多个自治系统 AS(Autonomous Sytem)、1 百万台路由器、1 千万多个网络、5 千万多个活跃网站、10 亿多用户、约 2 千万亿网页。互联网每年创造 10 万多亿美元的产值。互联网的骨干网速度由当年 9.6Kbps 的专线提高到今天的 160Gbps 光纤链路,无线局域网速度也接近 100Mbps。

互联网的物理结构发生了巨大变化。早期的 ARPAnet 是平面结构,今天的互联网是层次结构的复杂网络。今天的互联网由骨干层、汇聚层和接入层组成。骨干层由数千个 ISP(Internet Service Provider)营运的高速 IP 网络(骨干网)组成。地区的汇聚网(一般是城域网)将本地区的社区网、校园网、企业网等局域网以及无线网络汇聚起来连接到骨干网上。除路由器之外,骨干网与汇聚网之间和汇聚网与接入网之间还插入了许多的防火墙、NAT、VPN(Virtual Private Network)网关等设备,人们称这些设备为中间盒(middlebox)。另外,人们还在这些网络中部署了大量认证、加密、接入等网络服务器。

互联网的逻辑结构发生了较大变化。首先,上述由骨干层、汇聚层和接入层组成的 IP 网上运行了许多逻辑网络或虚拟网络,如各种 P2P(Peer to Peer)网络和各种网格网(grid)。P2P 和网格网由独立于 IP 之外的寻址、标识、路由、资源组织等技术构成。另外,人们还通过 IP 隧道技术在互联网上构成各种各样的虚拟专用网(VPN),形成跨互联网的部门网络。可以这样说,今天的互联网是一个由三层网络叠加而成的网络:最底层是各种各样的通信网络;中间层是由骨干层、汇聚层和接入层组成 IP 网;最上层是面向应用的虚拟网(也称之为层叠网)。

互联网组网技术发生了巨大变化。今天的互联网在最底层成功地