

# 信息中心网络发展研究综述

吴 超<sup>1)</sup> 张尧学<sup>1)</sup> 周悦芝<sup>1)</sup> 傅晓明<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

<sup>2)</sup>(哥廷根大学计算机科学学院 哥廷根 德国 37077)

**摘 要** 信息中心网络(Information-Centric Networking, ICN)已经成为下一代网络体系结构研究的新热点. 从众多研究成果中及时地总结 ICN 的优势与不足是未来相关研究的重要基石. 尽管现有 ICN 综述文献已经对其体系结构做出较为详细的总结, 然而, 它们并没有充分地讨论 TCP/IP 网络体系结构中存在的问题与发展 ICN 必要性之间的关系, 而这影响到未来 ICN 的重点研究方向. 文中首先论述了应用 ICN 体系结构解决当前网络体系结构中已有问题的必要性, 将 ICN 的关键问题、结构构成、关键技术等进行了梳理, 从现有 ICN 方案中整理出信息命名、路由技术、试验平台等关键技术. 在这个基础上, 文中进一步讨论分析了 ICN 与现有的协同缓存系统等技术之间的关联与差异. 论文最后分析讨论了 ICN 的下一步发展方向以及有待研究的问题.

**关键词** 信息中心网络; 未来互联网; 网络体系结构

中图法分类号 TP393 DOI号 10.3724/SP.J.1016.2015.00455

## A Survey for the Development of Information-Centric Networking

WU Chao<sup>1)</sup> ZHANG Yao-Xue<sup>1)</sup> ZHOU Yue-Zhi<sup>1)</sup> FU Xiao-Ming<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

<sup>2)</sup>(Institute of Computer Science, University of Goettingen, Goettingen, Germany 37077)

**Abstract** Information-Centric Networking (ICN) has been a novel hotspot in the field of future Internet architecture. In the future, the foundation of correlational research is to find out the strengths and weaknesses of ICN from many study results in time. The existing literatures of ICN have made the detailed summary about its architecture. Meanwhile, the relationship between the existing problems of TCP/IP network architecture and the necessity of developing ICN hasn't been discussed completely. This paper discusses the necessity of using ICN to solve the current network problems firstly, and sorts out the key points of ICN, its structure, key technologies and so on. Through the existing programs of ICN, the key technologies of naming, routing and testbed have been finished. On this basis, this paper has further discussion on the relevance and difference among ICN, cooperative caching system and some other technologies. At last, it analyses and discusses the next developing direction of ICN and some problems to be studied in the future.

**Keywords** information-centric networking; future Internet; Internet architecture

收稿日期: 2013-12-23; 最终修改稿收到日期: 2014-09-28. 本课题得到 FP7/NICT EU-JAPAN GreenICN 项目、国家科技支撑计划(2012BAH13F04)、国家国际科技合作专项项目(2013DFB10070)资助. 吴 超, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要研究方向为未来网络体系结构. E-mail: cwu12@mails.tsinghua.edu.cn. 张尧学, 男, 1956 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要研究领域为主动服务、普适计算、智能终端. 周悦芝, 男, 1975 年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为普适计算架构、主动服务. 傅晓明, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 长江学者, 主要研究领域为云计算、社交网络、未来网络体系结构.

## 1 引 言

经过四十多年的不断发展,计算机网络已经成为支撑现代社会发展与技术进步的重要基础.近十年来,计算机网络在规模上呈现出惊人的扩张,无论在网络接入方式还是网络角色定位方面都出现了一系列极具意义的创新与改革.然而在整个计算机网络发展的过程中,TCP/IP 体系结构的核心地位却基本保持不变<sup>[1-2]</sup>.TCP/IP 体系结构的优势在于它能够十分简单地将子网络链接到当前骨干网络中,并且具有简洁的结构,能够有效地承载多样化的物理链路层与应用服务层的发展<sup>[3-6]</sup>.

尽管 TCP/IP 结构的优势加速了计算机网络的发展,然而它也给网络体系结构带来了新的问题.Akhshabi 等人<sup>[7]</sup>指出网络内部协议之间的竞争关系使得计算机网络协议栈呈现两端粗、中间细的沙漏结构.通过对影响协议栈沙漏模型的因素进行分析,他们认为当前网络结构的细腰出现在 IP 网络层.Jacobson 等人<sup>[8]</sup>的研究验证了 Akhshabi 的结论并进一步指出因 IP 网络结构而出现的网络细腰已经成为阻碍当前网络应用层发展的重要因素.IP 网络细腰的出现限制了计算机网络性能的进一步提升,随着移动接入、普适计算、分布式信息处理、海量流媒体等新的应用的发展,当前 TCP/IP 结构的计算机网络性能开始趋于极限<sup>[9]</sup>.TCP/IP 网络细腰对计算机网络的性能限制已经成为当前一个不可忽视的紧急问题.

人们在解决 TCP/IP 网络细腰带来的问题上进行了大量的研究<sup>[10-27]</sup>,并提出能够从演进式发展(Evolution)与革命式发展(Clean-Slate)两个方向研究未来网络的体系结构<sup>[28]</sup>.一方面以 IPv6 等<sup>[22-27]</sup>为代表的演进式发展提倡在现有的 TCP/IP 协议的基础上,对现有的协议内容不断改良,对现存的问题进行优化,通过打补丁的方式令网络能够满足人们日益增长的需求.另一方面,以命名数据网络(Named Data Networking, NDN)<sup>①</sup>等<sup>[17-21]</sup>为代表的革命式发展提倡不再遵循现有网络的设计原则,重新设计网络体系结构并综合考虑可扩展性、动态性、实时性、可靠性、高性能以及易管理等需求.过去的研究主要将目光放在了演进式发展上,希望能够在现有基础设施中不断完善当前网络体系结构.

尽管演进式发展直接解决了计算机网络中的大部分问题,并极大地提升了计算机网络的综合性能.然而,演进式发展的本质特点却带来了一种打补丁

式的循环,计算机网络体系结构开始变得越来越复杂.不仅如此,演进式发展在解决当前紧急问题的同时还往往会带来新的问题<sup>[27]</sup>.在这样的情况下,人们开始重新审视革命式发展的可行性,试图通过推翻现有网络体系结构的方法构建全新的未来互联网<sup>[28]</sup>.近年来,人们提出了许多革命式网络体系结构方案<sup>[6,12-16,17-21]</sup>.在这些方案中,信息中心网络(ICN)被认为是一个能够较好地满足用户对信息传递需求的新型网络体系结构<sup>[8,29-35]</sup>.

ICN 采用以信息为中心(Information-Centric)的通信方式替代现有的以端为中心(Host-Centric)的通信方式.在现有的网络使用模式中,信息传递变得越来越重要,通讯方式中数据位置的重要性被逐渐淡化,相对于信息数据物理或逻辑位置而言,用户更加关心的是信息数据内容本身.网络的使用模式已经由传统的 Host-Centric 逐渐演变为 Information-Centric.因此,ICN 的出现能够较好地满足人们对以信息为中心的通讯方式的需求.如图 1 所示,ICN 摒弃了传统以 IP 为细腰的网络协议栈,采用以信息名称为核心的全新网络协议栈.ICN 采用信息名称作为网络传输的标识.因此,IP 地址失去了原有的作用,部分情况下仅能够作为一种底层的、本地化的传输标识.尽管 ICN 结构中信息名称成为新的网络细腰,但是全新的网络协议栈能够实现网络层解析信息名称、路由缓存信息数据、多播传递信息等功能<sup>[36-37]</sup>,从而较好的解决计算机网络中存在的扩展性、实时性以及动态性等问题.ICN 能够更好地满足用户在这些方面日益增加的需求,进而填充了未来

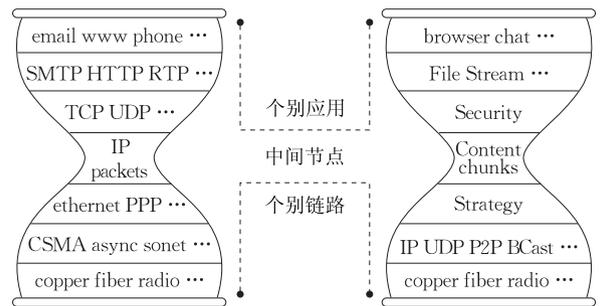


图 1 传统协议栈结构与 ICN 协议栈结构<sup>[10]</sup>

① NSF Named Data Networking project. <http://www.named-data.net/>  
NSF Future Internet Architecture Project. <http://www.nets-fia.net>  
NSF NeTS FIND Initiative. <http://www.nets-find.net>  
NSF NEBULA: Future Internet Architecture. <http://nebula-fia.org>  
GENI-global project. <http://www.geni.net>  
GEANT2 Project. <http://geant2.archive.geant.net>  
Japan-EU Symposium on New-Generation Network and Future Internet. <http://www.prime-pco.com/nict-nwgn/events/2ndEUJsymposium/>

互联网体系结构研究的目标蓝图。

尽管 ICN 为网络发展带来新的契机,但是现有的大部分 ICN 方案通常严格地要求所有终端主机和网络路由器支持 ICN 网络协议、添加内容存储路由器以及支持内容名称路由。这就需要改变大部分已经存在的网络基础设施,造成不可忽视的成本开销。为了提高网络性能而将现有基础设施推翻重建并不具有较大的可行性。目前已经有相关工作试图在尽可能减小开销的前提下增量部署 ICN 体系结构<sup>[37-38]</sup>。发展兼容现有网络基础设施的 ICN 变得十分有意义。

从众多研究成果中及时地总结 ICN 的优势与不足是未来相关研究的重要基石,并能够为接下来 ICN 的发展指明方向。尽管综述文献<sup>[1, 30-35, 39-41]</sup>阐述了 ICN 的发展现状与机遇。其中, Xylomenos 等人<sup>[33]</sup>详细地总结了 ICN 的关键技术以及现有欧美 ICN 方案的研究进展。夏春梅等人<sup>[40]</sup>从国内 ICN 研究的角度出发,对现有 ICN 关键技术与方案进行了总结。然而他们主要从 ICN 具体实现方面进行归纳对比,在 TCP/IP 网络体系结构存在的问题与发展 ICN 的必要性方面总结的不够完善。他们没有在解析技术、路由技术、数据技术以及试验技术四个方面对 ICN 相关理论进行梳理,也没有详细地对下一步 ICN 发展方向进行讨论。同时,目前大部分 ICN 研究需要重新建设网络基础设施,只有少量相关工作开始研究在现有网络基础设施基础上兼容实现 ICN,相关综述文章在这方面总结也不够完善。在这样的背景环境下,本文首先对现有计算机网络体系结构中存在的问题进行分类归纳,在这个基础上进一步概括并完善先驱综述文献中已经涉及的内容,并对它们留有的不足之处做出补充。本文还对 ICN 体系结构的组成部分进行归类,并从解析技术、路由技术、数据技术与试验技术四个核心技术层面着重比较现有 ICN 方案的异同点。最后,本文分析了当前 ICN 方案与相关技术之间的关联与差异,并对 ICN 未来可能存在的研究问题做出讨论。

本文第 2 节对现有网络体系结构中 ICN 需要解决的关键问题进行讨论;在第 3 节中重点分析 ICN 体系结构所依托的理论模型并归纳了 ICN 模型的理论衡量标准;第 4 节从 ICN 核心技术要点层面上对现有 ICN 方案进行比较并总结了它们的异同点;第 5 节讨论了 ICN 下一步发展方向以及相关技术之间有待研究的问题;在最后一节对全文进行总结。

## 2 ICN 面对的关键问题

新型网络体系结构诞生之初的根本任务是解决当前网络体系结构所面临的棘手问题。尽管经过数十年的飞速发展, TCP/IP 网络体系结构仍旧在路由可扩展性、数据动态性以及信息安全可控性三个方面存在难以克服的问题<sup>[1]</sup>。本节通过这三个关键问题进行简要地总结归纳,进而明确 ICN 体系结构研究需要解决在 IP 网络中难以克服的关键问题。

### 2.1 路由可扩展性

TCP/IP 网络消息传递是基于 Host-Centric 转发的消息通信模型。在 IP 网络中,通信链路因路由器能够转发数据包而能被复用。这样通信模型却导致网络中产生的数据流量都将最终汇聚到骨干网络与数据中心接入链路上。近年来,无论是网络流量还是网络规模都呈现爆炸式增加。另一方面,由于路由表难以实现高效率聚合而导致骨干路由表急剧膨胀、网路拥塞等问题日益严重。路由条目的快速增长大大降低了路由的查找性能,增加了路由器的实现开销。网络各方面需求增长速度已经超过摩尔定律与路由器性能提升速度,路由的可拓展性已经难以满足当前网络流量的需求<sup>[42]</sup>。另外,骨干路由器还需要进一步维护到达任意子网络的路由。这些问题的根源在于 TCP/IP 体系结构将所有通信流量汇聚到骨干网络上。

尽管内容分发网络(Content Distribution Network, CDN)的出现在一定程度上缓解了问题。但是,通过在互联网上部署新的大规模基础设施来缓存数据、缓解激增的方法不仅昂贵,而且在大部分情况下服务只面向签约用户的特定应用数据<sup>[43]</sup>。因此,CDN 并不能从根源上解决流量激增带来的路由可扩展问题。因此,从根源上改变传统基于端到端的消息通信模型是解决计算机网络路由可扩展性问题的一个关键因素。

### 2.2 数据动态性

便携终端的普及与物联网的发展令网络终端形态发生了巨大的变化。突出表现在网络终端的动态性显著增加,而不再像早期主要为固定终端提供数据交换服务。然而,网络终端动态性的增强却导致网络数据流量传输路径频繁变化,网络中应用服务在路径不断变化的过程中不能够保持连续,甚至遭到严重的破坏,进而降低网络服务质量<sup>[1, 35]</sup>。由于 TCP/IP 网络体系结构的本质属性,这个问题至今

难以从根本上得到解决. 例如, IP 地址的二重表达性(既表达身份又表征位置)限制了现有网络对终端移动的支持, 移动 IP 的思想令协议栈冗余, 处理效率较低. 另一方面, 端到端的通信模型依赖终端对服务连接维护管理. 这种通信模型对性能低下的物联网终端提出了苛刻的要求.

数据动态性效率低下是目前网络面临的另一个关键问题. 而造成这个问题的根本原因在于 TCP/IP 的自身结构特性. 因此, 减少终端负担开销, 令终端节点在移动过程中具有唯一、稳定的标识, 并能够适应数据传输路径的频繁变换, 是解决当前计算机网络问题的第二个关键因素.

### 2.3 信息安全可控性

TCP/IP 网络在最初并没有将信息安全隐考虑纳入在系统架构考虑范围内. 而是简单地将网络规模限制在一个相对封闭、可控的范围内, 由此屏蔽网络中可能出现的恶意行为. 然而, 随着网络技术和应用的发展, 计算机网络最终变为当下这样一个开放、不可控的复杂系统, 网络安全威胁因素给计算机网络的开放性与可扩展性带来了极大的限制. 在线社会网络(Online Social Network, OSN)的出现对网络应用的安全和隐私保护提出了更高的要求. 尽管通过扩展网络协议(如 IPSec、SSL/TLS)或采用加密/认证技术方法能够在一定程度上加强数据通信的安全, 但是这些策略却使网络协议栈臃肿不堪,

降低了通信效率<sup>[1]</sup>. 另一方面, 随着网络中安全设备(如防火墙、入侵检测设备等)种类与数量的增加, 网络开始频繁地检测或抵御安全攻击行为, 进一步造成了网络交通拥塞. 被动的安全应对策略注定端到端的通信模型无法匹配当前网络对信息安全可控性的需求.

缺乏信息安全可控性是目前互联网面临的第三个关键问题. 而这个问题的源头在于 TCP/IP 网络体系结构制约了安全应对策略的主动性. 因此, 需要从源头上限制网络攻击行为的发生, 确保信息安全.

综上所述, 当前 TCP/IP 网络体系结构在路由可扩展性, 数据动态性以及信息安全可控性上存在的关键问题限制了计算机网络的进一步发展. ICN 的发展过程中需要从源头上解决当前网络体系结构面临的这三个关键问题.

## 3 ICN 体系结构组成部分

根据 ICN 需要解决 TCP/IP 体系结构所存在的问题的功能需求, 本节从消息会话模型、内容文件命名、信息数据路由、数据转发策略以及信息数据缓存等 ICN 结构组成部分重点讨论了 ICN 体系结构对于未来网络的意义与重要性. 表 1 对这些组成部分的关键点的变化进行了归纳. 同时, 可以通过分析这些关键组成部分划分 ICN 理论归类标准.

表 1 TCP/IP 体系结构与 ICN 体系结构组成部分对比

TCP/IP 体系结构		ICN 体系结构
消息会话模型	基于 Host-Centric 通信方式; Where 会话模型	基于 Information-Centric 通信方式; What 会话模型
内容文件命名	嵌入信息源地址与目标地址	层次命名、平面命名、属性命名
信息数据路由	无层次路由	无层次路由 或 层次化路由
数据转发策略	根据 IP 地址的二重表达性转发	根据 ICN 路由中新型数据结构(PIT、FIB、CS)转发
信息数据缓存	缓存在服务器	采用 On-path 存储方式或 Off-path 存储方式缓存在中间节点

### 3.1 消息会话模型

电话(Telephony)效率高、覆盖广的特点使得其早在 20 世纪 60 年代就成为全球范围信息通讯技术的标杆. 而那时的计算机网络还处在萌芽阶段, 核心技术发展并不完善. Telephony 以主机为中心(Host-Centric)的会话方式成功引导了计算机网络中 TCP/IP 技术的发展. 网络的数据传递问题通过相同会话模型得到解决. 从此, 计算机网络由最初单纯的学术研究网络迅速变为全球通讯基础设施. 无论是用户数量, 接入设备数量, 还是信息流量都出现了惊人的增长. 2012~2017 年期间, 全球互联网用户将由 23 亿增长至 36 亿, 网络接入设备在相同时间段内将由 120 亿台增长至 190 亿台, 而全球 IP 流

量将由每年产生 523 艾字(Exabytes)增长至每年产生 1.4 泽字(Zettabytes)<sup>①</sup>. 大数据时代的到来使得对信息敏感的商务活动开始变得网络化并逐渐成熟. 摩尔定律(Moore's Law)在驱动硬件行业发展的同时, 也使得一切设备连接互联网变得更加简单<sup>[44]</sup>. 互联网的接入条件由最初仅允许超级计算机或工作站接入逐渐发展成为市政设施、移动设备、汽车、电气工具、甚至照明开关都能够与之相连通信. 网络已经变成了一个全新的世界门户. 人们开始对信息内容(What)越来越感兴趣, 而不再关心从哪台

① Cisco VNI Global IP Traffic Forecast. <http://www.cisco.com/go/vni> 2013, 5

终端或服务器(Where)可以获取信息数据. 互联网正在向以信息为中心(Information-Centric)的会话方式演变<sup>①</sup>.

尽管 RFC 791 规范<sup>[45]</sup>定义了 Where 会话模型为 IP 网络的本质属性. 然而, 这种 Host-centric 会话方式却依旧被使用来满足当下 Information-centric 的需求. 这就要求用户不仅需对数据内容敏感, 还需要对数据位置敏感. 但是, 用户并不具有数据位置敏感性, 只能依赖路由表大范围的查找数据资源, 而后才能获得数据. 难以令人满意的查找效率<sup>[36]</sup>使得 IP 网络中 Where 模型已经难以满足当前用户对互联网服务质量日益增长的需求. 人们开始思考如何屏蔽 Where 模型带来的不便捷. Gritter 和 Cheriton<sup>[11]</sup>与 Carzaniga 等人<sup>[13, 46-47]</sup>在十年前抛出了采用 What 模型替代 Where 模型建立信息中心网络的思想火种. 如何采用 What 模型来替换现有的 Where 模型引导了近十多年来新型网络体系结构的研究思想浪潮. 接下来的研究成果进一步在现有 IP 网络设施与分布式 Hash 表(DHTs)<sup>[48]</sup>的基础上实现并证明了 What 模型的可行性<sup>[12, 14]</sup>.

与 Where 模型不同的是, 在 What 模型中信息内容的名称具有结构化层次性, 信息内容被剥离出原有 Where 模型数据包, 信息传递不再依赖位置敏感性. What 模型将这种特性直接用于对会话数据块进行命名, 从而进一步实现对数据块进行定位, 因此任何数据块都能够在网络上具有可寻址性<sup>[49-50]</sup>. 例如, 采用这种方式能够对来自 Hulu 等流媒体服务商的数据块直接命名, 而不需要再将用户端地址与 hulu.com 服务器地址嵌入到会话数据报头中. 因此, 在 What 模型中数据检索通过需求(On-demand)驱动. 与 Where 模型相比, What 模型令用户在选择数据方面具有更多的主动权. 尽管这样的模型替换对于沙漏结构是简单、微小的变化, 但是它令沙漏的细腰中数据查找策略由 IP 寻址变为直接查找数据块内容名, 这就使得数据本身成为网络中的直接访问单元<sup>[10]</sup>. 综上所述, 采用 What 模型替代 Where 模型能够突破 IP 结构现有的局限性, 主要体现在:

(1) 在 What 模型中, 应用程序的中间组件可以令程序模型能够与互联网中传递的信息数据直接匹配, 移除其他所有中间组件及其相关配置, 大大提高了数据通信效率.

(2) What 模型减少了单个会话持续时间, 数据内容不再需要被嵌入到端到端的数据包. 这样能够

对数据来源安全性可以直接进行判断, 相对 IP 网络中所采用的 One-size-fits-all 策略而言能够更好的保护信息安全性.

(3) What 模型中由于每一个数据块都是唯一命名标识的, 通过在沿路路由器中增加缓存模块, 能够彻底解决路由回路问题. 同时, On-demand 驱动策略能够利用所有相连的节点进行数据转发, 移除了异步转发, 这样能够极大地减少网络中数据生产者与消费者之间的不协调通信.

## 3.2 内容文件命名

What 模型所具有的特点能够令网络中消息内容分发具有更强的灵活性. 与 Where 模型不同, What 模型中数据报文不再需要指定源地址与目标地址, 取而代之的是直接采用内容对消息进行命名. 因此, What 模型修改了对内容文件命名的方法. 尽管 What 模型提供了多种多样的文件命名方法, 在 ICN 网络中则主要采用了其中 3 种: 层次命名(hierarchical naming)、平面命名(flat naming)以及属性命名(attribute-based naming).

### 3.2.1 层次命名

TRIAD<sup>[11]</sup>与 CCN<sup>[8]</sup>共同提出了一种具有层次性的文件内容命名方法. 层次命名法规定每个内容文件通常拥有一个类似 web URL 的标识名, 而这个标识名通常可以由类似/lab/thu/icn.jpg 的字符串构成. 在标识字符串中, 符号/表示各个子域之间的分隔定界符. 同时, 层次结构文件名可以与 web 中基于 URL 的应用或者服务相兼容. 进一步而言, 这些应用或服务能够直接使用互联网中基于 What 模型转发的内容文件而不需要进行数据报编解码, 因此, 网络中数据的易读性得到了进一步提升. 层次命名法的优势还体现在信息名称具有可聚合性. 可聚合性指信息名称可实现聚合, 这样就能够增强路由表的可拓展性, 进而对路由条目进行聚合归类. 例如, 对于任何以/thu/作为起始路径名的内容文件都可以被存储在同一条路由表记录中. 例如查找数据/thu/cs/icn.jpg 只需要找到起始路径为/thu/cs/的路由表记录, 就可以找到这条路由表记录下聚集的所有数据. 在大数据时代环境中, 若信息名称不能够聚合, 路由表大小将急剧膨胀, 制约网络路由的可扩展性.

### 3.2.2 平面命名

尽管层次命名增强了网络的可扩展性, 使信息

① Jacobson V. A new way to look at networking. <http://video.google.com/videoplay>, 2006

名称可聚合,减小了路由表大小.然而,层次名称却具有语义性,这在一定程度上限制了文件名称的生命周期.例如,当文件名称为/lab/thu/icn.jpg 对应的文件失效时,采用层次命名的路由将无法找到数据源文件.另一方面,相同文件名称所对应的文件可能被多级网络缓存保存,此时文件名称无法聚合,路由表需要若干条记录分别保存文件位置信息,反而降低了路由表记录的聚合度.为了避免上述问题,DONA<sup>[6]</sup>与 PSIRP<sup>①</sup>提出采用平面与自我认证(Flat and Self-certifying)的方法对内容文件进行命名.通过计算文件位置与文件内容的 Hash 值,直接将获得的结果作为文件名.因此,平面名称通常由一系列不规则的数值或字符组成.平面文件名称直接由位置与内容决定,不再具有语义性并且文件名称具有全局唯一标识.尽管如此,由于平面名称不具有语义性,无法实现信息名称的可聚合.因此,平面命名方法并不能够较好地支持网络路由的可扩展性.

### 3.2.3 属性命名

CBCB<sup>[47]</sup>则认为根据内容文件的一系列属性值对(Attribute-Value Pairs, AVPs)能够对文件内容、文件位置进行判定识别.这种方法通常需要进行进一步抽象用户的兴趣内容,将信息内容本身压缩为若干对属性值对 AVPs.用户通过对感兴趣的 AVPs 匹配进而找到信息文件.属性命名在文件名称的语义性与自我认证能力之间找到了一个平衡点,兼顾了网络路由的可扩展性与信息冗余.然而,属性命名方法却依旧带来了新的问题.首先,单个 AVP 可能拥有不同的语义,需要用户提供大量的 AVPs 保证信息匹配的精准性.其次,AVPs 的语义性将影响搜索用户判断结果.一个错误的 AVP 可能导致整个匹配结果出现极大的误差.最后,路由缓存需要保存内容文件本身以及大量内容文件对应的 AVPs,对路由缓存能力提出了苛刻的要求.

## 3.3 信息数据路由

ICN 直接以通过信息名称路由的特点令信息数据路由也发生了巨大的变化.根据先驱研究,ICN 中路由种类可以依据是否具有维护 ICN 路由表的系统分为无层次路由与层次化路由.

### 3.3.1 无层次路由

在 CCN, TRIAD 以及 NDN 等采用层次命名方法的 ICN 体系结构中,由于文件内容名称具有可聚合能力以及 IP 兼容性,它们对路由性能要求较低,因而通常采用无层次路由.无层次路由与 IP 路由类似,不具有维护路由表的系统.同时,这类路由通告

往往采用基于洪泛的方式.另一方面,由于 ICN 体系结构具有向前兼容能力.无层次路由能够继承 IP 路由部分功能,在某些方面能够与 IP 网络兼容.因此,采用无层次路由 ICN 网络体系结构能够在现有 TCP/IP 网络基础设施基础上通过路由策略实现增量部署.并且,层次名称在替代 IP 数据报文网络前缀的过程中原本的路由协议并没有发生明显的变化.

综上所述,在 ICN 中采用层次文件名能够实现 IP 网络中网络前缀聚合的功能,因此并不需要具有层次性的路由.采用无层次路由的 ICN 体系结构能够在现有的网络基础设施上增量部署.尽管如此,随着内容文件被替代或转移失效,依靠内容文件名称实现聚合程度会逐渐减小.除此之外,当内容文件发生更新时,洪泛转发带来的交通控制开销在一些情况下可能会是巨大的.

### 3.3.2 层次化路由

ICN 中层次化路由结构大致可以分为基于树形或分布式 Hash 表(DHTs)的层次结构.DONA 采用了经典的树形层次化路由,通过路由器组成具有层次的逻辑树,每一个路由器维护各自下降子树发布的消息.无论何时,一旦有新消息发布、覆盖或删除,路由通告都能够沿着树形结构逐级传播,直到所有路由表都被更新.CBCB 则通过建立基于源码的多播树来传递发布者与订阅者之间的内容.然而,这种树形结构路由增加了路由器的开销负担,制约了网络路由的可扩展性.同时,路由表大小将随着路由等级上升而变大,每个路由器需要缓存的信息内容将越来越多,根路由器甚至需要保存整个网络的信息.另外,网络路由可扩展性问题还表现在层次化路由采用平面命名方法,文件名本身并不具有数据聚合能力.为了避免树形层次化路由存在的问题,PSIRP 提倡利用 DHTs 的平面性权衡路由器可扩展性与开销负担.在 PSIRP 中,对于数量为  $c$  的内容文件,每个路由器保存相同数量  $\log(c)$  条路由条目.然而,由于 DHTs 由随机和统一放置的路由共同构造,DHTs 路由结构探索数据的拓扑路径通常会为树形路由结构长度的几倍.

值得一提的是,尽管路由本身具有层次性,却依旧能够在兼容现有 TCP/IP 基础设施.类似的,内容文件被替代或转移失效时依靠内容文件名称实现的路由依然需要费时费力地更新数据信息.

① FP7 PSIRP project. <http://www.psirp.org/>

### 3.4 数据转发策略

ICN 中对路由器数据结构做出了修改,如图 2 所示,ICN 的每个路由器都需要维护三个数据结构:待请求表(Pending Interest Table, PIT)、前向转发表(Forwarding Information Base, FIB)以及内容存储器(Content Store, CS). PIT 用于记录经过的请求信息,依此实现所请求的内容顺利地传回请求节点.内容数据包按照 PIT 的提示,逐级向内容请求者转发. PIT 记录中包含了每条兴趣包被转发到对应 FIB 的接口(s),当等待的内容传回后,该条目

将从 PIT 中删除. FIB 将请求数据包发往目的端.与 IP 路由器的 FIB 相比,ICN 路由器的 FIB 除了包含信息名称前缀而不是 IP 地址前缀的特点外,还可以显示多个接口对于一个给定的名称前缀,同时向多个方向转发请求. CS 类似于 IP 路由器的缓存,但是在每次通信结束后不会清空 CS 的内容,可以将该内容用于下次通信. CS 是 ICN 中非常关键的理念,它可以帮助减少内容下载时延和网络带宽占用.此外,每个 ICN 路由器都有一个策略模块,通过它决定每个兴趣包转发方向.

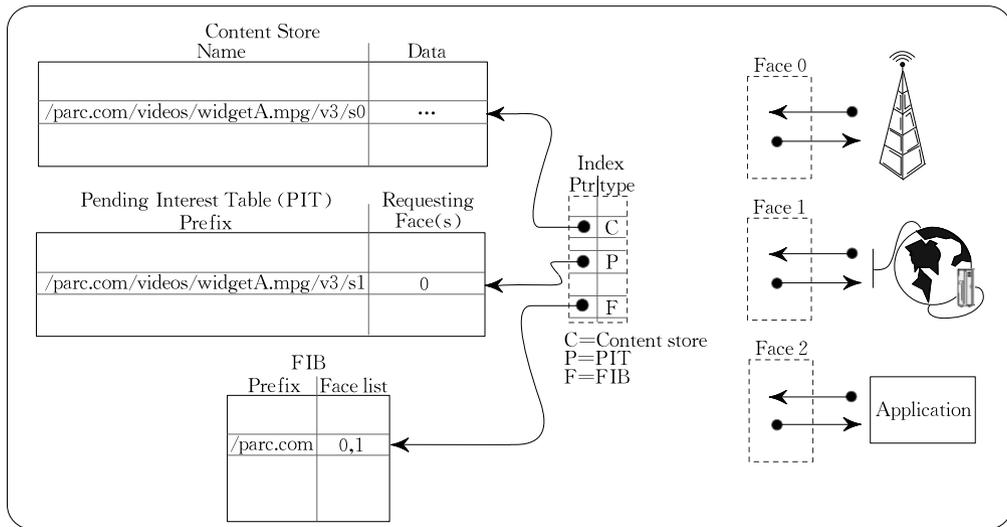


图 2 NDN 数据路由策略结构示意图<sup>[10]</sup>

与 IP 网络中严格按照 IP 地址分配进行数据转发的方式不同,ICN 中数据转发过程主要分为 3 个步骤:

(1) 接收到请求数据包后,首先匹配内容缓存,如果有相关内容,直接发送.否则在 PIT 中查询.

(2) 如果 PIT 中有相应的条目,添加请求端口到列表中.在这一过程中,将请求数据包截留是为了防止同样数据的重复请求.当有内容数据包回应时,将此内容发送给所有请求数据的端口.

(3) 若 PIT 中没有相关内容条目,则查询 FIB.按照 FIB 的指示将该数据包转发到下一 ICN 节点.

### 3.5 信息数据缓存

尽管数据路由可以分为层次性与无层次性,然而路由器都是通过以存储开销为代价的方式保证数据传输效率.随着硬件技术的不断发展,以 CDN 为代表的新型网络结构证明了这种以空间资源换取运行效率的均衡策略在经济方面与应用方面都能够得到认可与支持.在这个基础上,ICN 的路由缓存策略根据信息数据缓存位置可以分为路径存储(On-path)与非路径存储(Off-path).

#### 3.5.1 路径存储

On-path 存储方式将数据信息沿途存储在通过名称解析系统获得的请求路径中.由于后续数据请求的信息已经存储在这条路径的中间节点缓存中,数据请求将不需要再到服务器端获取数据信息,取而代之的是采用就近原则,从最近的中间节点处获取信息.当有全新数据信息在经过路由器的同时将被完整备份. On-path 存储方式具有实现部署简单、获取信息快速等优点.尽管 On-path 将数据沿着数据请求路径缓存能够达到减少网络传输延时,提高网络传输效率的目的.然而,由于路径中所有路由器在信息存储方面不具有协作能力,因此每一个中间路由器都需要对所有经过的信息进行存储备份.这就导致了在整个路径中多台路由器存储了冗余信息.在大部分情况下,由于只有拓扑最近的缓存源信息才会被访问,因此浪费了大量的存储空间并且存储的数据信息较少,缓存利用率低下.随着时间的推移需要缓存的数据信息将无限制增长,有限的存储空间无法满足无限的信息容量存储需求.另一方面,当名称解析路径与数据传输路径不同时,On-path

方式具有较低的传输效率。

### 3.5.2 非路径存储

Off-path 存储方式将数据信息存储在这条路径以外的缓存中,并且多个中间路由器间能够共同协商存储完整的数据信息,数据信息因此能够被分块存储,以此来解决缓存空间受限的问题。Off-path 存储方式中名称解析路径与数据传输路径可以异步或者同步。当名称解析路径与数据传输路径异步时,各个路由器缓存都被当作信息发布者。而当名称解析与数据传输同步时,数据请求通过路由系统转发到各个缓存中。另一方面,根据缓存位置选择不同,Off-path 存储方式又可以具体分为核心缓存与边缘缓存。核心缓存指数据信息缓存位置以核心路由为主,边缘路由尽可能减少缓存信息。然而,核心分布式存储增加了核心路由的存储负担,容易造成核心路由的整体性能下降。边缘缓存将信息存储在用户接入的边缘路由器中。当下一次其他用户请求数据信息

时,若边缘路由器缓存中已经保存对应的数据信息,用户就可以直接从边缘路由器获得数据,从而保证整个过程具有较高的传输效率。Amble 等人<sup>[51]</sup>证明了在缓存信息过程中下一级路由器缓存时间往往是上一级路由器缓存时间的两倍,信息数据将逐渐缓存到网络边缘处,同时也证明了边缘缓存方式的性能高于核心缓存方式。由于核心路由往往承担整个网络的数据路由转发任务,核心分布式存储方式容易导致整个网络性能的下降。因此,在现有 ICN 体系结构中边缘缓存具有更大的优势,得到广泛的应用与支持。

## 4 ICN 关键技术

大部分的 ICN 方案可以分为欧、美两个分支<sup>[41]</sup>。如图 3 所示,现有 ICN 方案中具有里程碑式向导性工作成果包括加州大学伯克利分校提出的

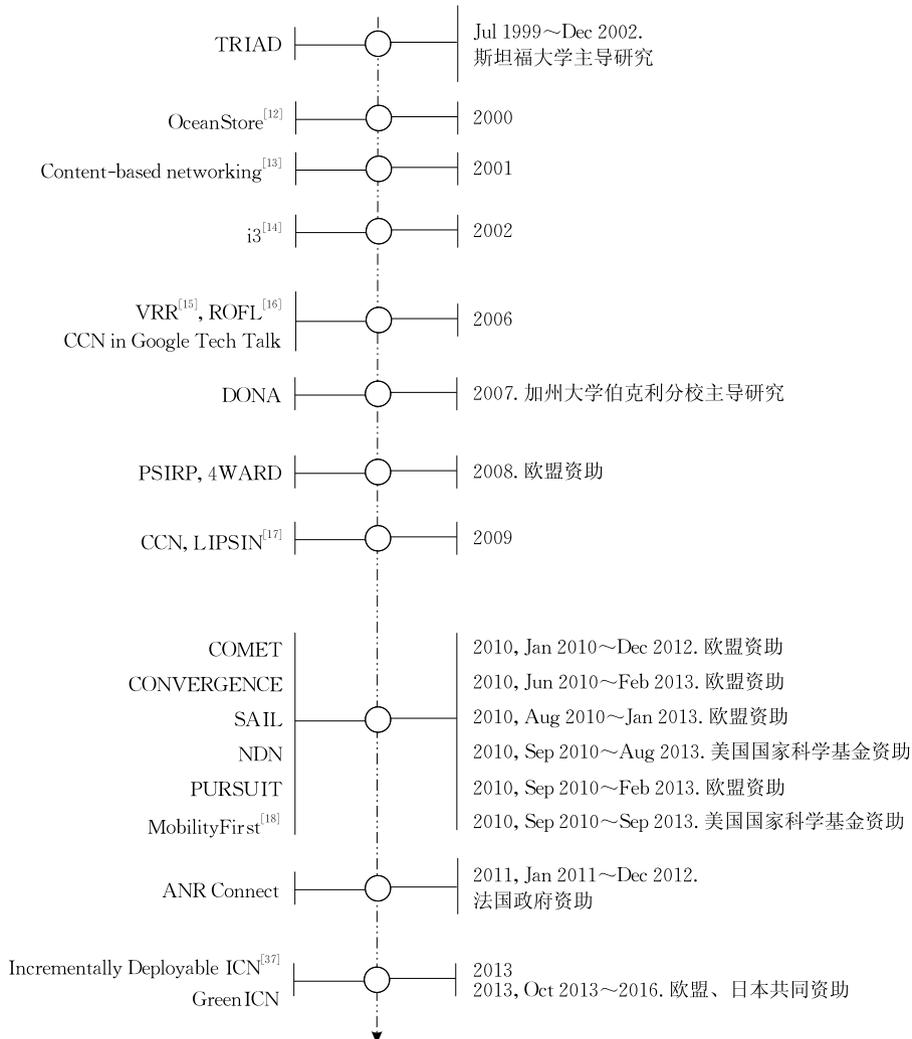


图 3 ICN 体系结构研究里程碑

DONA 项目及其先驱研究 TRIAD<sup>①</sup>; 欧盟资助的 PURSUIT<sup>②</sup> 项目及其先驱研究 PSIRP, SAIL<sup>③</sup> 项目及其先驱研究 4WARD<sup>④</sup>; COMET<sup>⑤</sup> 项目; CONVERGENCE<sup>⑥</sup> 项目. 美国国家基金资助的 NDN 项目及其先驱研究 CCN; MobilityFirst 项目. 法国政府资助的自然基金项目 ANR Connect<sup>⑦</sup>. 欧盟与日本共同资助的 GreenICN<sup>⑧</sup> 项目. 尽管 ICN 的相关研究已经经过了十年时间, 从图 3 中可以发现, 全球各个国家在过去五年中加大投入了 ICN 研究所需的财力物力, 并取得了丰富的研究成果.

通过对这些具有重大影响的里程碑成果进行比较, 本节试图从现有方案中梳理并划分出 ICN 的关

键技术, 讨论可能存在的不足, 从而明确未来 ICN 关键技术的研究要点. 由于现有的 ICN 方案大都支持采用全新的网络体系结构来替代现有的 Host-Centric 网络模型的思想, 并认为全新的体系结构能够直接解决现有 TCP/IP 网络中存在的 key 问题. 为了验证这些方法的可行性与经济适用性, 本节依据前一节中 ICN 模型归类标准, 从解析技术、路由技术、数据技术以及试验技术四个方面对这些方法做出梳理比较. 表 2 着重对这些 ICN 方案的信息名称、路由技术以及信息缓存三个方面进行总结对比. 在表 3 中, 总结了现有 ICN 试验技术的相关工作进展.

表 2 ICN 方案的信息名称、路由技术以及信息缓存

	信息名称		路由技术	信息缓存
	名称类型	可聚合性		
DONA	平面名称	不可聚合	异步数据路由	单个 AS 内的 Off-path 存储方式
PURSUIT	平面名称	不可聚合	异步数据路由	基于异步数据路由的 On-path 存储方式
SAIL	平面名称	部分名称可聚合	同步数据路由或 异步数据路由或 同步异步混合型路由	基于同步数据路由的 Off-path 存储方式
COMET	未指定	可聚合	同步数据路由	单个 AS 内的 Off-path 存储方式或 基于同步数据路由的 On-path 存储方式
NDN	层次名称	可聚合	同步数据路由	基于同步数据路由的 On-path 存储方式
CONVERGENCE	层次名称、平面名称	部分名称可聚合	异步数据路由	基于异步数据路由的 Off-path 存储方式
MobilityFirst	平面名称	不可聚合	同步数据路由	基于同步数据路由的 Off-path 存储方式

表 3 ICN 试验技术

试验方法	试验准确性	试验平台	可利用资源	
ICN Overlay	不精准	在 IP 网络上直接搭建 ICN 网络	依据研究内容自定义搭建方式	
模拟试验	精准	模拟工具、试验床以及直接编写代码	模拟工具 试验床 直接编码	NS2、NS3、OPNET、BOSON、Netsim 等 CCNx、ndnSIM、OFELIA 等 依据研究内容自定义编码内容

#### 4.1 解析技术

ICN 解析技术涉及信息命名与名称解析系统两个方面. 其中, 信息命名是 ICN 体系结构设计过程中的一个关键点. 不恰当的信息命名会因为自身的语义性而对 ICN 体系结构中其他部分产生恶劣的影响. 相对于其他信息命名策略而言, 层次命名与平面命名被认为是最具有代表性的两种信息命名方法. 尽管如此, 对每种 ICN 信息命名方法优缺点的讨论却从未停止过, 至今也没有达到统一认知<sup>[52]</sup>.

层次命名方法存在的争议主要是它允许系统规模通过层次信息名称实现聚合而带来的优势与缺点. 当信息命名对象数量级达到  $10^{13} \sim 10^{16}$  时, 采用层次命名的网络系统相对于传统的 DNS 或 BGP 等系统具有更高的执行效率, 往往能够处理这些系统所不能处理的任务<sup>[53]</sup>. 同时, 由于在 ICN 体系结构

中所有信息名称都将被保存在路由器缓存中, 通过层次文件命名所有的路由决策都具有层次性, 这就允许通过聚合文件名实现缩减路由表大小, 极大地优化了骨干网的核心路由性能. 然而, 这也要求路由转发表中的信息名称必须根据网络拓扑分配. 例如, 在图 2 给出的 NDN 数据路由转发策略中. 根据信息转发表 FIB, 所有名称前缀为 /thu/cs 的路由条目都能够通过接口 C 访问. 当新的名称前缀 /thu/ee,

① Stanford TRIAD project. <http://www.dsg.stanford.edu/triad/>

② FP7 PURSUIT project. <http://www.fp7-pursuit.eu/PursuitWeb/>

③ FP7 SAIL project. <http://www.sail-project.eu/>

④ FP7 4WARD project. <http://www.4ward-project.eu/>

⑤ FP7 COMET project. <http://www.comet-project.org/>

⑥ FP7 CONVERGENCE project. <http://www.ict-convergence.eu/>

⑦ ANR Content project. <http://anr-connect.org/>

⑧ FP7/NICT GreenICN project. <http://www.greenicn.org>

根据信息名称的可聚合性,新的前缀被聚合到前缀/thu/下,实现路由条目聚合并且用户能够通过接口 F 访问.然而,当访问路径仅仅只能够通过接口 C 时,FIB 表中就需要创建一个新的路由条目而不能直接进行聚合.因此,除非所有具有相同名称前缀的信息名处在同一区域,否则对应的路由条目不能直接聚合,需要将信息名称与信息存在的位置进行绑定匹配.遗憾的是,将信息名称与信息位置绑定的方法已经被证明在动态性等方面具有难以解决的根本性问题<sup>[54-55]</sup>.因此,通过层次命名而实现的系统可聚合的优点并不是绝对的.平面命名方法的优势主要是能够避免位置身份绑定问题,因此使得信息数据具有更强的动态性.然而,平面文件名却难以聚合,这就导致路由表的大小难以控制.同时,采用平面命名方法的系统需要根据数据到来时刻不断更新数据结构.除此之外,人们对于信息命名的争论还表现在信息名称的人类可读性与自我认证能力无法兼顾.遗憾的是,目前并没有任何文件命名方法能够在这两方面找到一个完美的平衡点<sup>[52]</sup>.现有的 ICN 方案主要通过外部辅助机制实现这个目的.例如,NDN 依靠外部信任机制将签署信息绑定到人类可读的名称上<sup>[56]</sup>,而 MobilityFirst 则依靠外部命名系统将人类可读名称绑定到 GUIDs<sup>[57]</sup>上.

名称解析系统的工作性能很大程度上受到 ICN 解析技术影响.在采用层次命名的 ICN 体系结构中,名称解析系统存在的主要是如何避免信息名称与信息位置绑定.最初,NDN 项目试图通过使用 ISP 服务商的信息名称作为名称前缀从而实现信息名称可聚合.然而,这个思想却因不能清晰完整地实现在避免信息与位置绑定的前提下令信息名称具有可聚合性的缺点而没有进一步细化实现<sup>[10]</sup>.CONVERGENCE 试图通过在路由缓存部分信息名称前缀的方法绕过名称解析与信息位置绑定冲突的问题.然而,这就需要通过引进外部名称解析系统,并没有从根本上解决这个问题.另一方面,在采用平面命名的 ICN 体系结构中,名称解析系统存在的主要问题则是平面名称无法聚合而导致需要极大的信息名称存储空间.DONA 与 COMET 通过积累所有信息名称,层层传递至顶级 ISP 进行解析.其中,DONA 更直接地将所有信息都存储在顶层服务器<sup>[58]</sup>,这将导致顶层解析服务器需要存储巨大的信息名称数据.COMET 则试图通过限制传播信息名称解析范围来部分缓解这个问题.同时,COMET 还提出创建一种清晰的可聚合名从而减少信息名称对语义表达需求.尽管如此,COMET 提出这种可聚合

名仍旧不能实现自我认证功能.PURSUIT 依靠层次化的分布式 Hash 表(DHTs)分摊信息名称存储、膨胀名称路径解析、路由验证以及外部名称信息解析等过程中的开销负担<sup>[58-59]</sup>.为了总能够在本地解决全局的信息请求,SAIL 在本地与全局两个方面分别建立分布式 Hash 表(DHT),代价却是需要将信息名称与特定的自治域(AS)绑定<sup>[53]</sup>.MobilityFirst 采用一种基于 Hash 的策略来确定每一个 GUID 所对应名称解析服务的地址,进而这个普通地址路由获取名称解析服务.然而,MobilityFirst 的部署前提是世界上所有的 AS 都具有相同实现机制<sup>[60]</sup>.

另一种名称解析策略是采用平面显式聚合名称<sup>[52]</sup>.在这种方法中,数据请求通常含有一系列平面信息名称.路由决策总是基于从右到左的最深匹配顺序.例如当信息请求字符串为 a.b.c 时,路由将优先查找信息名称 c.当查找失败时会继续查找信息名称 b,依此类推.平面显式聚合方法在一些条件下能够有效地减小路由表大小.例如,查询路由条目 a 能够代替含有地址 a.b.c 的路由条目.因此,用户路由线索就可以缩减为只含有地址 a 而不再需要完整地址信息 a.b.c.

## 4.2 路由技术

ICN 的路由技术根据信息名称解析方法不同可以分为同步数据路由以及异步数据路由.尽管同步数据路由由理论上对数据请求路径与数据传输路径是否相同并没有限定,然而随着路由信息在信息名称解析的过程不断积累,路由表的具体优化、分配以及调度在实际过程中往往采用沿着数据请求的方向路径反向的策略进行.异步数据路由的结构特点则不尽相同.在异步数据路由的每种方法中,信息名称解析与数据路由都相对独立.因此,异步数据路由相对于同步数据路由而言具有更大的灵活性.

在采用同步数据路由的 ICN 方案中,NDN 与 COMET 将路由转发数据信息安装在信息路由由缓存中.CONVERGENCE,DONA 以及同步 SAIL 则将路由转发数据信息嵌入数据请求数据包中.尽管信息数据包的形式不同,但是它们最终都沿着数据请求路径返回至消息订阅者.虽然同步数据路由容易部署,但是同时也具有以下两点不足.首先,数据路由需要通过内容路由器进行维护.其次,数据路由由状态需要保存在对应数据请求数据包中.

在采用异步数据路由的 ICN 方案中,DONA 与异步 SAIL 通过名称解析系统获得源数据服务地址,接着通过正常的地址路由访问获取数据信息.当数据请求获取到多个位置时,名称解析系统将返回

多个地址, PURSUIT 则通过独立的拓扑管理实体计算请求信息数据的返回路径, 这个拓扑管理实体采用的计算技术与现有源路由类似, 都将在 Bloom Filter 加密, 因此并不会扩大网络规模. 在所有的 ICN 方案中, MobilityFirst 利用“由一般地址开始, 到具体地址结束”的快速名称解析系统迭代地获取网络服务地址<sup>[60]</sup>. 除此之外, 为了尽可能简化数据订阅者与发布者之间数据动态性需求的门槛, MobilityFirst 在信息请求与数据返回的过程中采用同步数据路由.

为了令发布与订阅协议具有无状态性, 从而在一定程度上更好地支持数据动态性, ICN 最初将位置识别独立处理. 然而在具体实现过程中却并非如同设想的简单. 在 DONA 等项目中, 为快速移动物理位置的对象查找网络地址会产生巨大的开销. 虽然独立数据请求能够移动地从不同物理位置得到信息数据, 但在接受单个简单信息对象的过程中仍旧存在问题, 当这个信息对象体积变大时这个问题会更加严重.

支持订阅者动态性通常较为简单. 在最坏情况下, 订阅者也仅需要重新发送请求. 然而这就造成订阅者在漫长等待过程中浪费时间与其他资源. 为了避免这个问题, 异步 DONA 与 SAIL 采用获取名称解析系统返回响应主机网络地址的方法进而获取数据. 另一方面, 在 NDN 与 COMET 方法中重发的请求最终都会与路由内容表中旧的请求相遇. 因此, 新的订阅记录会被重新定位悬挂在旧的记录之后. 在一些 ICN 方案中, 当对象运动到它新的位置之后, 路由器需要对源路由打补丁式更新. 尽管这样处理方式通常并不具有较高的效率, 每一部分的路径都是可视的, 这种方法在 CONVERGENCE、同步 SAIL 以及 DONA 中相对容易实现. 然而, 这种方法在 PURSUIT 中就变得较为棘手. PURSUIT 中所有链接因 Bloom Filter 加密保存而变得难以更新或删除. 相比之下, MobilityFirst 提供了一个最具有弹性的解决方案. MobilityFirst 依靠一系列的解析步骤来尽可能延迟位置移动而重新进行的身份认证与位置绑定, 并且仅允许对象当前所在区域内移动更新. 支持信息发布者的动态性则需要用获取信息发布者移动后的新位置信息来更新名称解析系统. 然而更新名称解析系统可能会造成额外的操作开销. 另一方面, MobilityFirst 以及同步异步混合 SAIL 采用上述延迟位置绑定后更新信息位置的方法. 值得一提的是, 同步异步混合 SAIL 仅延迟名称绑定到请求而不是数据信息, 因此不能够支持消息订阅

者的动态性.

#### 4.3 数据技术

ICN 中数据技术主要包括数据信息缓存与信息安全两个方面. 信息缓存是 ICN 体系结构的基础特性之一, ICN 中信息意识 (Information Awareness) 能够直接通过网络层识别而不再仅能凭借应用层获取. 在 On-path 存储方式中, 中间路由器收到本地缓存资源数据请求时不需要再次调用名字解析系统而是直接传输数据. 然而, 这种数据传输方式的成功命中通常具有一定的概率性. 在最坏情况下信息请求需要经过长时间转发才能够遇到信息发布者. 而在 Off-path 存储方式中, 缓存则需要将它们的信息注册到名称解析系统, 从而与对应的数据请求相匹配. 这样令缓存实际上变成了新的信息发布者, 在很大程度上增加信息请求响应的效率, 实时动态的获取数据信息.

尽管大部分 ICN 实现方法在理论上都原生地支持 On-path 存储方式. 但是, 异步数据路由的 On-path 存储方式在探测随机缓存过程中命中的概率较低. 而在同步数据路由过程中, 由于沿着数据请求的路径上已经缓存了信息数据, 探测随机缓存命中的概率能够得到保证. 以 NDN 和 COMET<sup>[61-62]</sup> 为代表的 ICN 方案主要采用这种基于同步数据路由的 On-path 信息缓存机制.

另一方面, 采用 Off-path 存储方式的 ICN 方案则关注缓存内容与缓存位置的选择策略<sup>[63]</sup>. 在这个过程中存在的主要问题是尽可能减少名称解析以及数据缓存更新过程中所带来的额外开销. 由于不同的名称解析系统具有不同的实现特点, 因此解决策略也不尽相同. 尽管如此, 这些方法的公共目标都是通过本地保存更新信息的方法减少整个 AS 内的信息广播等开销. 例如, DONA 与 COMET 提供了范围限定机制, 获取缓存信息被限制在单个 AS 中, 并且不支持向层次结构中的上级传递. 在异步 SAIL 与 PURSUIT 中, 缓存信息仅仅对单个 AS 中本地保存的 DHT 中的路由条目数据广播. 而在 NDN, CONVERGENCE, 以及同步 SAIL 中, 需要通过不断更新名称前缀表从而减少开销. 遗憾的是, 由于路由协议大都通过洪泛广播名称前缀, 目前依旧没有一种较为经济适用的方法能够从根本上减少这些额外的开销. MobilityFirst 在这个方面同样面临着额外开销较大的问题. 并且, MobilityFirst 在全局快速名称解析查找过程中依旧难以高效地将本地缓存的信息数据在单个 AS 中并且广播.

信息安全问题是所有 ICN 方案都关注的一个

重要问题. 相对于 TCP/IP 网络中要求信道具有机密性与完整性, ICN 体系结构更强调信息的机密性与完整性. DONA 通过将信息内容数据嵌入信息名称中实现对信息的机密性与完整性的保证. NDN 通过联合信息与元数据(metadata)来保证信息的机密性与完整性. 然而, 正如之前已经描述的, 这些方法都需要通过额外提供的信任系统将信息本身与能够自我认证的信息名称绑定. 另一方面, 由于层次名称与平面名称都可以被转化成自我认证的名称, 因此 ICN 信息名称大多具有自我认知的功能, 并且允许任何网络节点验证对应数据包中的信息. 目前大部分 ICN 体系结构通过信息名称的自我认知能力将信息取舍的最终权直接交给用户. 这个过程对于采用平面名称的 ICN 体系结构更为轻松容易. 因此, 所有支持平面名称的系统通常都允许使用具有自我认证功能的信息名称.

#### 4.4 试验技术

作为新型网络体系结构, ICN 中对应的网络试验往往被要求在基于信息名称路由的环境中进行. 然而, 当前网络基础设施的路由方式基于 IP 地址, 在当前网络基础设施上无法直接进行 ICN 试验. 因此, ICN 试验需要按照新的网络协议搭建网络基础设施. 然而, 这将耗费大量的时间与金钱, 短期内并不能够为紧急的 ICN 试验提供测试环境. 为了尽可能的避免重建网络基础设施, 研究人员提出了两个解决方法.

##### (1) 通过 ICN Overlay 进行试验

由于目前网络中并不存在直接支持 ICN 的网络基础设施, 研究人员提出可以通过在 IP 网络上构建 ICN 网络的策略<sup>[64-65]</sup>, 使 ICN 成为一种新的 Overlay 网络. 尽管 ICN Overlay 能够在一定程度上保证试验的顺利进行. 然而, 由于网络基础设施底层仍旧通过 IP 地址进行路由, 这种方式不能够保证试验结果的准确性, 在特定的情况下甚至可能得到相反的试验结果.

##### (2) 进行 ICN 模拟试验

由于 ICN Overlay 会使试验结果不够准确, 研究人员往往采用模拟试验证明各自研究成果的有效性. 采用模拟试验的方式能够较好地保证 ICN 试验结果的准确性. 常见的模拟试验主要有三种途径: 通过模拟工具进行试验、通过试验床进行试验以及直接编写代码进行试验.

由于 NS2、NS3、OPNET、BOSON、Netsim 等模拟工具能够根据自身特点重构已有的或实现新的 ICN 网络协议. 因此, 大部分研究人员通过这种方法

进行 ICN 试验. 除此之外, 欧美的大型项目研究组针对各自提出的 ICN 方案分别搭建了试验床, 以 CCNx<sup>①</sup>, ndnSIM<sup>②</sup>、OFELIA<sup>③[66]</sup> 等为代表的试验床已经为全球 ICN 工作研究人员试验提供了有力的保证. 另一方面, 由于试验工作的某些特殊需求, 部分研究人员采用直接编写代码的方式实现 ICN 模拟. 然而这种方法具有极大的工作量, 且不能够较好地保证测试结果正确性.

## 5 相关技术与下一步发展方向

### 5.1 CDN 技术与 ICN 结构

Sandvine 调查结果表明, 在 2011 年北美地区互联网流量中, Netflix 占据总份额的 37.5%, Youtube 占据总份额的 11.3%<sup>④</sup>. Cisco 的白皮书同样表明, 2014 年 P2P 数据交换或直接由 Web 下载的流媒体占据整个网络流量的 91%<sup>⑤</sup>, 世界网络流量开始以流媒体内容分发为主.

目前, 大部分流媒体服务商采用 CDN 技术解决在基于 IP 路由的网络中内容获取与传递性能低下的问题. 与 ICN 相比, CDN 并不具有完整的网络体系结构. 请求路由(Request Routing)与内容服务(Content Service)是 CDN 技术中两个核心思想. CDN 的请求路由能够根据用户拓扑位置信息分配代理路由路径, 而内容服务功能则能够为用户提供请求内容信息文件. 因此, CDN 的请求路由是一套能够定向用户请求到拓扑最近代理的机制. 请求路由包括 3 个主要步骤:

(1) 寻找距离用户拓扑位置最近的代理.

(2) 将用户的信息内容请求转发到已经发现的拓扑最近代理.

(3) 当拓扑最近代理出现数据缺失, 能够向其他代理或原始数据源请求缺失数据.

ICN 结构的路由技术与数据存储在一定程度上借鉴了 CDN 的思想, 希望能够将数据就近地转发回用户. 不同的是, ICN 结构中用户并不需要一套寻找拓扑最近代理的机制, 用户总是将信息请求发送到一级路由, 之后路由总是采用直接返回请求数据内容或继续向其他路由请求数据. 表 4 详细比较了 ICN 结构与 CDN 技术之间主要的关联与差异.

① CCNx Project. <https://www.ccnx.org>

② ndnSIM Project. <http://ndnsim.net>

③ OFELIA Project. <http://www.fp7-ofelia.eu/about-ofelia/>

④ Sandvine white paper. Global Internet phenomena report, 2011

⑤ Cisco white paper. Entering the Zettabyte Era, 2011, 6

表 4 CDN 技术与 ICN 结构

关联	差异
1. 均采用信息内容缺失转发数据请求, 尽可能令用户拓扑就近地获取数据的策略.	1. CDN 技术基于 IP 路由, 而 ICN 基于信息名称路由.
2. 均采用内容服务的思想.	2. CDN 中用户请求总是被转发到拓扑最近的代理, 若数据缺失则由代理负责向其他代理或原始数据源转发数据请求.
	3. ICN 中用户数据请求被发送到直接相连的路由, 通过路由负责数据请求转发.

## 5.2 协同缓存系统与 ICN 结构

协同缓存系统通过多个代理缓存服务器的协同工作, 利用各自有效的缓存空间提高缓存命中率. 同时, 系统分散热点数据, 均衡各服务器的负载, 从而避免单点出错或瓶颈问题<sup>[67]</sup>. 现有的协同缓存系统结构分为层次式和分布式两种. 层次式结构中代理缓存服务器按照树状层次组成, 相邻的服务器之间可以进行协同和数据共享. 分布式结构中服务器没有从属和层次关系, 通常采用路由表和组播技术发现或定位其他代理缓存服务器上的数据. 协同缓存系统涉及对象定位和对象放置两个核心技术. 对象定位的主要目的是快速寻找一个满足用户请求的、拓扑最近的缓存副本. 对象放置则研究一个对象何时应该被缓存以及缓存到哪一个服务器上可以获得更好的系统总体性能.

现有的 ICN 网络通常属于分布式结构, 并能够借鉴协同缓存系统的优秀性能. 受到定位技术的启发, 现有的 ICN 路由转发总是希望能够快速寻找一个满足用户请求的、拓扑最近的缓存副本. 另一方面, 现有的 ICN 体系结构在对象放置方面的性能并不够优秀. 近年来, 已经有学者开始了相关工作的研究<sup>[68]</sup>. 表 5 比较了协同缓存系统与 ICN 在结构、对象定位以及对象放置方面的关联与差异.

表 5 协同缓存系统与 ICN 结构

	结构	对象定位	对象放置
协同缓存系统	层次式 分布式	能够对对象定位	对象放置技术成熟
ICN	分布式	能够对对象定位	对象放置技术不成熟

## 5.3 ICN 的发展现状与未来方向

尽管 Nelson<sup>[69]</sup>早在 1979 年就提出了以信息作为网络中心的思想. 然而, 这种背离 Host-Centric 模型的网络协议在大部分情况下需要建立在改变网络基础设施的基础上. 虽然 Baccala 的工作<sup>[70]</sup>在一定程度上强化了信息中心网络的具体工作, Information-Centric 的思想却仍没能够得到人们的重视.

CCN 项目的提出在很大程度上重新激励并引导了 ICN 的发展. 在过去五年中, 包括 DONA、NDN、

XIA、4WARD、SAIL 以及 COMET 在内的越来越多的网络体系结构宣布支持 ICN 或能够与 ICN 相兼容. 这些新型网络体系结构同时也具有了 ICN 所具有的能够在网络层对信息名称进行解析、在路由缓存信息数据、支持最近路由副本、能够采用多播机制进行信息传递等优点.

由于 ICN 的相关研究目前处于雏形阶段, 路由协议、数据转发、缓存机制、信息安全以及数据动态方面仍旧留有大量有待解决的问题, 人们倾注了大量的时间与精力解决这些问题, 并取得了有意义的研究成果<sup>[71-75]</sup>. 例如 Wang 等人<sup>[75]</sup>将 OSPF 协议移植到 NDN 中, 提出了 OSPFN 协议. Hoque 等人<sup>[72]</sup>则在 OSPFN 的基础上进一步提出了脱离 IP 路由的新协议 NLSR. Wang 等人<sup>[29]</sup>则通过 GPU 并行计算的方式大大促进了 ICN 中路由表查找检索的速度. 然而, 人们在专注解决这些问题的同时却忽略了现有大部分 ICN 实现方法严格地要求所有终端主机和网络路由器支持 ICN 网络协议、添加内容存储路由器以及支持内容名称路由的情况. 这就使得 ICN 相对于现有计算机网络所具有的优势都需要建立在不可忽视的基础设施建设成本开销基础上. 为了提高网络性能而将现有基础设施推翻重建, 庞大的代价让学者们开始反思是否能够在现有网络基础设施上部署 ICN. 因此, ICN 基础设施建设及其优化工作也成为未来 ICN 研究与发展中的一个关键点. 由于与现有基础设施的兼容度直接决定了未来 ICN 的经济适用性与普及程度. 而 ICN 基础设施本身结构组成与 IP 网络基础设施结构并不一致. 因此, 尽可能提高 ICN 与现有 IP 网络设施兼容能力将是未来一段时间中的研究难点. 为此, 本文建议接下来 ICN 相关研究可以针对以下两方面开展.

### (1) 移植相关技术以提升 ICN 网络性能

ICN 体系结构的不成熟令越来越多研究人员开始思考如何将相关技术中的优点移植到 ICN 中, 令其更加完善. Lee 等人<sup>[76]</sup>为在 ICN 网络中架设 CDN 技术的可行性做出了验证. 刘外喜等人<sup>[68]</sup>则在 ICN 对象放置方面开展了相关研究, 并取得了较好的成果. 然而, ICN 结构的成熟化仍然需要研究人员不断发现并尝试将各种基于 IP 网络的成熟技术移植到这个新平台中. 研究人员可以从路由协议、数据转发、缓存机制、信息安全以及数据动态方面入手, 发现并解决 ICN 结构中存在的问题.

### (2) 避免不必要的网络基础设施建设

近两年来, 已经有学者开始在这方面进行研究

并取得了一些研究成果. 例如, Fayazbakhsh 等人<sup>[37]</sup>提出基于 Http 以及 Https 的方式增量部署 ICN, 从而尽可能的减少额外部署的硬件设施, 提高 ICN 与现有 IP 基础设施的兼容能力. Lee 等人<sup>[38]</sup>试图将 IP 网络中 P2P 功能移植到 ICN 中, 实现 ICN 中数据的高效共享, 进而缓解 ICN 中对路由器缓存大小的严格需求. Chen 等人<sup>[71]</sup>通过 CoExist 系统令 ICN 的消息订阅与分布能够与 IP 相兼容, 利用集结与分发的思想角度减轻部分 ICN 基础设施的建设必要性.

尽管目前在兼容性方面的相关研究工作并不多, 但是它们为接下来的相关研究工作带来了巨大的意义. 这些工作为 ICN 建设做出了积极的贡献, 并激励接下来的相关工作通过沿着它们所提出的思路进一步缓解或解决 ICN 基础设施的需求. 遗憾的是, 这些工作并没有进一步详细地提及如何在现有 IP 网络基础设施基础上部署 ICN. 因此, 未来 ICN 的相关研究还需要在路由协议、数据转发策略、缓存策略、数据动态性等方面更好地兼容现有 IP 网络基础设施, 在尽可能复用现有网络基础设施的前提下推进 ICN 的发展.

综上所述, 学者们需要在未来研究工作中对现有成熟技术移植与兼容现有网络基础设施两方面投入更多的研究.

## 6 结 论

这篇文章提供了一个关于 ICN 近年来发展研究的深入调查报告. 全文首先识别并分析了当前网络体系结构所存在的一系列关键问题, 并激励互联网在新兴的需求与挑战面前应该在哪些方面做出基本反思. 接着, 文章通过对 ICN 体系结构理论模型的论述, 分析了 ICN 为何能够解决这些问题. 尽管关于信息中心思想的研究已经持续了三十多年, 然而, 在过去五年中由于 CCN 的出现才使得 ICN 相关研究在很大程度上被重新激励并引导. 另一方面, ICN 的相关研究工作目前仍旧处于起步阶段, 各个 ICN 方案之间难以找到一套完整的标准. 文章试图通过对 ICN 的解析技术、路由技术、数据技术以及试验技术等四个方面对现有 ICN 方案进行归类, 并希望能够梳理得出一套相对较为统一的 ICN 核心功能标准. 文章详细比较了主流 ICN 方案在各个技术方面的异同点, 并针对它们的优势与不足做出了分析. 同时, 文章还对 ICN 相关技术差异与未来有待研究的问题做出了分析. 这就带来了两个开放性

问题: 现有成熟技术的移植是否具有必要性? 未来 ICN 基础设施应该如何建设? 是完全推翻现有基础设施还是基于现有基础设施平稳过渡. 而这些不仅与当前的 ICN 方案息息相关, 更是影响未来 ICN 进一步发展的要点. 沿着这个问题的思路, 文章继续提出了对未来有待研究问题的看法.

综上所述, ICN 是一块值得人们进行更多思考的研究领域. 尽管在某些方面 ICN 已经展现出能够解决当前一些互联网问题的潜力. 然而, 目前 ICN 仍旧只能通过定性的方式寻求解决方案. 正因如此, 还需要更进一步的研究评价约束这个新型网络体系结构的规范, 挖掘 ICN 关键的性能优势, 探索迄今为止在 ICN 中仍旧被忽视的领域. 通过人们的不断完善, ICN 体系结构才能具有更强的适用性、更高的可行性以及更可观的经济效益.

## 参 考 文 献

- [1] Xie Gao-Gang, Zhang Yu-Jun, Li Zhen-Yu, Sun Yi, Xie Ying-Ke, Li Zhong-Cheng, Liu Yun-Jie. A survey on future internet architecture. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(6): 1109-1119(in Chinese)  
(谢高岗, 张玉军, 李振宇, 孙毅, 谢应科, 李忠诚, 刘韵洁. 未来互联网体系结构研究综述. 计算机学报, 2012, 35(6): 1109-1119)
- [2] Leiner B M, et al. A brief history of the Internet. SIGCOMM Computer Communication Review, 2009, 39(5): 22-31
- [3] Balakrishnan H, et al. A layered naming architecture for the Internet. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(4): 343-352
- [4] Stoica I, Adkins D, Zhuang S, et al. Internet indirection infrastructure//Proceedings of the 2002 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM). Pittsburgh, USA, 2002: 73-86
- [5] Guha S, Francis P. An end-middle-end approach to connection establishment//Proceedings of the 2007 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM). Kyoto, Japan, 2007: 193-204
- [6] Kopoen T, Chawla M, Chun B-G, et al. A data-oriented (and beyond) network architecture. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(4): 181-192
- [7] Akhshabi S, Dovrolis C. The evolution of layered protocol stacks leads to an hourglass-shaped architecture. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(4): 206-217
- [8] Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, et al. Networking named content//Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies (CoNEXT). Rome, Italy, 2009: 1-12

- [9] Feldmann A. Internet clean-slate: What and why? ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(3): 59-64
- [10] Zhang L, et al. Named data networking (NDN) project. CA, USA: PRAC, Technical Report NDN-0001, 2010
- [11] Gritter M, Cheriton D R. An architecture for content routing support in the Internet//Proceedings of the 3rd USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems. San Francisco, USA, 2001, 1: 4
- [12] Kubiawicz J, et al. Oceanstore: An architecture for global-scale persistent storage. ACM SIGPLAN Notices November, 2000, 35(11): 190-201
- [13] Carzaniga A, Wolf A L. Content-based networking: A new communication infrastructure//Proceedings of the NSF Workshop on Infrastructure for Mobile and Wireless System. Scottsdale, USA, 2001: 59-68
- [14] Stoica I, Adkins D, Zhuang S, et al. Internet indirection infrastructure. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2004, 12(2): 205-218
- [15] Caesar M, Castro M, Nightingale E B, et al. Virtual ring routing: Network routing inspired by DHTs//Proceedings of the 2006 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM). Pisa, Italy, 2006: 351-362
- [16] Caesar M, Condie T, Kannan J, et al. ROFL: Routing on flat labels. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(4): 363-374
- [17] Jokela P, Zahemszky A, Rothenberg C E, et al. LIPSIN: Line speed publish/subscribe inter-networking//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2009 Conference on Data Communication (SIGCOMM). Barcelona, Spain, 2009: 195-206
- [18] Seskar I, Nagaraja K, Nelson S, Raychaudhuri D. Mobility-First future Internet architecture project//Proceedings of the 7th Asian Internet Engineering Conference (AINTEC). Amari Watergate Hotel Bangkok, Thailand, 2011: 1-3
- [19] Anand A, et al. XIA: An architecture for an evolvable and trustworthy Internet//Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-X). Cambridge, USA, 2011: 1-6
- [20] McKeown N, et al. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 69-74
- [21] Gavras A, Karila A, Fdida S, et al. Future Internet research and experimentation: The fire initiative. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(3): 89-92
- [22] Lu Guowei, et al. Nine-way optical wavelength multicasting and field trail transmission over optical network test-bed (JGN2Plus)//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC). Los Angeles, USA, 2011: 1-3
- [23] Li X, Bao C, Chen M, et al. The China education and research network (CERNET) IVI translation design and deployment for the IPv4/IPv6 coexistence and transition. IETF RFC6219, May, 2011
- [24] Wu J, Wang J H, Yang J. CNGI-CERNET2: An IPv6 deployment in China. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(2): 48-52
- [25] Jain R. Internet 3.0: Ten problems with current Internet architecture and solutions for the next generation//Proceedings of the Military Communications Conference (MILCOM 2006). Washington, USA, 2006: 23-25
- [26] Domingue J, et al. The Future Internet-Future Internet Assembly 2011: Achievements and Technological Promises. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011
- [27] Handley M. Why the Internet only just works. BT Technology Journal, 2006, 24(3): 119-129
- [28] Rexford J, Dovrolis C. Future Internet architecture: Clean-slate versus evolutionary research. Communications of the ACM, 2010, 53(9): 36-40
- [29] Wang Y, Zu Y, Zhang T, et al. Wire speed name lookup: A GPU-based approach//Proceedings of the 10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (USENIX). San Jose, USA, 2013: 199-212
- [30] Ahlgren B, Dannewitz C, Imbrenda C, et al. A survey of information-centric networking. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 26-36
- [31] Choi J, Han J, Cho E, et al. A survey on content-oriented networking for efficient content delivery. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(3): 121-127
- [32] Tyson G, Sastry N, Rimal I, et al. A survey of mobility in information-centric networks: Challenges and research directions//Proceedings of the 1st ACM Workshop on Emerging Name-Oriented Mobile Networking Design-Architecture, Algorithms, and Applications (NoM'12). Hilton Head, USA, 2012: 1-6
- [33] Xylomenos G, Ververidis C, et al. A survey of information-centric networking research. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, (99): 1-26
- [34] Stuckmann P, Zimmermann R. European research on future Internet design. IEEE Wireless Communications, 2009, 16(5): 14-22
- [35] Yin Hao, Zhan Tong-Yu, Lin Chuang. Multimedia networking: From content delivery networks to future Internet. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(6): 1120-1130 (in Chinese)
- (尹浩, 詹同宇, 林闯. 多媒体网络: 从内容分发网络到未来互联网. 计算机学报, 2012, 35(6): 1120-1130)
- [36] Pan J, Paul S, Jain R. A survey of the research on future Internet architectures. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(7): 26-36
- [37] Fayazbakhsh S K, et al. Less pain, most of the gain: Incrementally deployable ICN. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 147-158
- [38] Lee H Y, Nakao A. Efficient user-assisted content distribution over information-centric network//Bestak R, et al, eds. Proceedings of the 11th International IFIP TC 6 Conference on Networking, Vol. Part I. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, Germany, 2012: 1-12

- [39] Bari M F, Chowdhury S R, Ahmed R, et al. A survey of naming and routing in information-centric networks. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(12): 44-53
- [40] Xia Chun-Mei, Xu Ming-Wei. Survey of information-centric networking. *Journal of Frontiers of Computer Science & Technology*, 2013, 7(6): 481-493(in Chinese)  
(夏春梅, 徐明伟. 信息中心网络研究综述. *计算机科学与探索*, 2013, 7(6): 481-493)
- [41] Li Jun, Chen Zhen, Shi Xi. ICN system structure and technology research. *Netinfo Security*, 2012, (4): 75-80(in Chinese)  
(李军, 陈震, 石希. ICN 体系结构与技术研究. *技术研究*, 2012, (4): 75-80)
- [42] Yi Y, Deb S, Shakkottai S. Time-scale decomposition and equivalent rate-based marking. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2006, 14(5): 938-950
- [43] Frank B, et al. Pushing CDN-ISP collaboration to the limit. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013, 43(3): 35-44
- [44] Akella A, Chawla S, Kannan A, Seshan S. On the scaling of congestion in the Internet graph. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2004, 34(3): 43-56
- [45] Postel J. RFC 791: Internet protocol. 1981
- [46] Carzaniga A, Wolf A L. Forwarding in a content-based network//*Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM)*. Karlsruhe, Germany, 2003: 163-174
- [47] Carzaniga A, Rutherford M J, Wolf A L. A routing scheme for content-based networking//*Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*. Hong Kong, China, 2004: 918-928
- [48] Ganesan P, Gummadi K, Garcia-Molina H. Canon in G major: Designing DHTs with hierarchical structure//*Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. Tokyo, Japan, 2004: 263-272
- [49] Arianfar S, Nikander P, Ott J. On content-centric router design and implications//*Proceedings of the ACM Re-Architecting the Internet Workshop (ReARCH'10)*. Philadelphia, USA, 2010: 1-6
- [50] Diallo M, Fdida S, Surlas V, et al. Leveraging caching for Internet-scale content-based publish/subscribe networks//*Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Kyoto, Japan, 2011: 1-5
- [51] Amble M M, Parag P, Shakkottai S, et al. Content-aware caching and traffic management in content distribution networks//*Proceedings of the 30th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*. Shanghai, China, 2011: 2858-2866
- [52] Ghodsi A, Koponen T, Rajahalme J, et al. Naming in content-oriented architectures//*Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking (ICN)*. Toronto, Canada, 2011: 1-6
- [53] D'Ambrosio M, et al. MDHT: A hierarchical name resolution service for information-centric networks//*Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking*. Toronto, Canada, 2011: 7-12
- [54] Walfish M, Balakrishnan H, Shenker S. Untangling the Web from DNS//*Proceedings of the Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI)*. San Francisco, USA, 2004: 225-238
- [55] Moskowitz R, Nikander P. Host identity protocol architecture. RFC 4423, 2006
- [56] Smetters D, Jacobson V. Securing network content. USA: PARC, Technical Report TR-2009-01, 2009
- [57] Baid A, Vu T, Raychaudhuri D. Comparing alternative approaches for networking of named objects in the future Internet//*Proceedings of the IEEE Workshop on Emerging Design Choices in Name-Oriented Networking (NOMEN)*. Florida, USA, 2012: 298-303
- [58] Katsaros K V, et al. On inter-domain name resolution for information-centric networks//*Proceedings of the Networking 2012: 11th International IFIP TC 6 Networking Conference*. Prague, Czech Republic, 2012: 13-26
- [59] Rajahalme J, et al. On name-based inter-domain routing. *Computer Networks*, 2011, 55(4): 975-986
- [60] Vu T, Baid A, Zhang Y, et al. DMap: A shared hosting scheme for dynamic identifier to locator mappings in the global Internet//*Proceedings of the IEEE 32nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. Macao, China, 2012: 698-707
- [61] Chai W K, He D, Psaras I, Pavlou G. Cache "less for more" in information-centric networks//*Proceedings of the 11th International IFIP TC 6 Conference on Networking-Volume Part I (IFIP'12)*. Berlin, Germany, 2012: 27-40
- [62] Psaras I, Chai W K, Pavlou G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks//*Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking (ICN'12)*. Helsinki, Finland, 2012: 55-60
- [63] Sourlas V, Flegkas P, Paschos G S, et al. Storage planning and replica assignment in content-centric publish/subscribe networks. *Computer Networks*, 2011, 55(18): 4021-4032
- [64] Vieira B, Poll E. A security protocol for information-centric networking in smart grids//*Proceedings of the ACM Workshop on Smart Energy Grid Security (SEGS)*. Berlin, Germany, 2013: 1-10
- [65] D'Ambrosio M, Fasano P, Marchisio M, et al. Providing data dissemination services in the future Internet//*Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBALCOM)*. New Orleans, Louisiana, 2008: 1-6
- [66] Salsano S, Blefari-Melazzi N, Detti A, et al. Information centric networking over SDN and OpenFlow: Architectural aspects and experiments on the ofelia testbed. *Computer Networks*, 2013, 57(16): 3207-3221
- [67] Li Wen-Zhong, et al. GCaching — A grid-based cooperative caching system. *Journal of Computer Research and Development*, 2004, 41(12): 2211-2217(in Chinese)

(李文中等. GCaching——一种网络协同缓存系统. 计算研究与发展, 2004, 41(12): 2211-2217)

- [68] Liu Wai-Xi, Yu Shun-Zheng, Cai Jun, Gao Ying. Scheme for cooperative caching in ICN. *Journal of Software*, 2013, 24(8): 1947-1962(in Chinese)

(刘外喜, 余顺争, 蔡君, 高鹰. ICN 中的一种协作缓存机制. 软件学报, 2013, 24(8): 1947-1962)

- [69] Ted Nelson. *Literary machines* (1993). Distributed by Eastgate Systems Inc. Skyline Boulevard, Portland; Mindful Press, 1981

- [70] Baccala B. Data-oriented networking. Internet draft, IETF, 2002

- [71] Chen J, Arumathurai M, Fu X, Ramakrishnan K K. Coexist: Integrating content oriented publish/subscribe systems with IP//Proceedings of the 8th ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems (ANCS). Austin, USA, 2012: 223-234

- [72] Hoque A K M M, Amin S O, Alyyan A, et al. NLSR:

Named-data link state routing protocol//Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking (ICN). Hong Kong, China, 2013: 15-20

- [73] Yi C, Afanasyev A, Wang L, et al. Adaptive forwarding in named data networking. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 2012, 42(3): 62-67

- [74] Chiochetti R, Perino D, Carofiglio G, et al. INFORM: A dynamic interest forwarding mechanism for information centric networking//Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking (ICN). Hong Kong, China, 2013: 9-14

- [75] Wang L, Hoque A M, Yi C, et al. OSPFN: An OSPF based routing protocol for named data networking. USA: Technical Report NDN-0003, 2012

- [76] Lee B, Jeon H, Yoon S, et al. Towards a CDN over ICN//Proceedings of the International Conference on Data Communication Networking, e-Business and Optical Communication Systems, ICETE. Rome, Italy, 2012: 46-51



**WU Chao**, born in 1989, Ph. D. candidate. His main research interest is future Internet architecture.

systems, pervasive computing, transparent computing, and active services.

**ZHOU Yue-Zhi**, born in 1975, Ph.D., associate professor. His research interests include ubiquitous/pervasive computing, distributed system, mobile device and systems.

**FU Xiao-Ming**, born in 1973, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor, Yangtse Rive Scholar. His research interests include cloud computing, online social network, future Internet architecture.

**ZHANG Yao-Xue**, born in 1956, Ph.D., professor, Ph. D. supervisor, Member of Chinese Academy of Engineering. His research interests include computer networking, operating

## Background

The evolution of the Internet usage pattern allows TCP/IP architecture to meet many fundamental problems that are hard to be overcome. In recent years, there are various researches that focusing on Information-Centric Networking (ICN), and these researches have gained lots of achievements. Thus, it is very meaningful to summarize how ICN architecture works in the aspects of naming, routing, caching, mobility, security and so on. Although existing ICN surveys have a good summary about the above aspects, they do not conduct this work refer to the fundamental problems in today's TCP/IP network architecture. Nor do they discuss how to build ICN's infrastructure at a trivial cost, or how to make ICN been more compatible with existing

networking infrastructure. We believe that it is important to have a detailed survey according to these issues. In this survey, we firstly talk about fundamental problems in the existing network architecture. Secondly, we analyze the significance and necessity of ICN in the aspects of several key technical points. Finally, we discuss some related issues in the process of ICN's future infrastructure construction.

This work is supported by the International Science and Technology Cooperation Program of China under Grant No.2013DFB10070 and by the National Key Technology R&D Program under Grant No.2012BAH13F04. Part of this work is performed in the context of the FP7/NICT EU-JAPAN GreenICN project.