

# 信息中心网络体系结构研究综述

孙彦斌, 张宇, 张宏莉

(哈尔滨工业大学网络与信息安全研究中心, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘要:** 互联网应用需求逐渐转变为信息的分发和获取, 而网络体系结构依然为主机间的端到端通信, 二者矛盾日趋尖锐. 信息中心网络 (Information-Centric Networking, ICN) 采用以信息为中心的设计为解决上述问题提供了新思路. 本文提出了 ICN 的基本体系结构框架, 从功能和特性两个维度探索了 ICN 可能的设计空间, 然后讨论了 ICN 与其他未来网络技术的关系以及 ICN 实验平台和部署, 最后指出当前主要问题及下一步研究方向.

**关键词:** 信息中心网络; 命名数据; 名字路由; 网内缓存

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)08-2009-09

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.08.034

## Survey of Research on Information-Centric Networking Architecture

SUN Yan-bin, ZHANG Yu, ZHANG Hong-li

(Research Center of Network and Information Security, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** The application model in the Internet has shifted into information sharing, while the architecture is still based on the end-to-end communication. The conflict between them is becoming increasingly acute. To solve such a mismatch, ICN (Information-Centric Networking) is proposed. In this paper, a basic architecture framework for ICNs is first proposed, functional modules and properties are adopted to explore the design of ICN. Then, the relationships between ICN and other future network technologies are analyzed, the experiment platform and the deployment of ICN are discussed. Finally, crucial issues and future researches are concluded.

**Key words:** information-centric networking (ICN); named data; name-based routing; in-network caching

## 1 引言

互联网应用由最初主机间文件和资源共享发展为普适的信息分发和服务提供(在区别以主机为中心思想时,信息、内容和数据含义相同). 分发和获取数据已成为互联网主要应用需求,体系结构与应用需求间的矛盾日趋尖锐:网络围绕着主机而用户却对信息感兴趣,设计和需求不一致导致应用低效;P2P和CDN受底层及自身限制,只解决部分问题;信息安全依赖于主机与信道安全,难以保障信息自身安全<sup>[1]</sup>. 采用打补丁方式虽一定程度缓解矛盾但无法消除,很难预测以主机为中心的体系结构未来能否满足以信息为核心的应用需求.

为解决设计和需求矛盾,以信息为中心的网络体系结构被提出,即信息中心网络(Information Centric Networking, ICN). ICN采用革新式设计,以信息高效分

发和获取为目标,通过信息名操作信息,在设计之初考虑可扩展、安全、移动及多接入点等需求,从而实现网络由“机器互联”到“信息互联”的转变.

ICN在应用和技术层面都具有传统网络难以比拟的优势. 应用层面,ICN解决信息“是什么”而不是“在哪儿”的问题,符合人们获取信息的直观感受. 技术层面,(1)内容层替代IP层成为“沙漏模型细腰”,网络核心更接近应用需求,利于应用开发;(2)弱化主机概念,主机对应用透明,可简化其配置,降低其被定向攻击的可能;(3)信息显式命名,名字持久唯一,便于信息管理;(4)网内缓存(In-network Catching)便于信息分布,增强网络健壮性和效率;(5)名字路由将信息与位置解耦,增强移动性,充分利用内容副本,提高内容获取效率;(6)采用基于内容而非容器或信道的安全模型,更易保护内容本身.

以信息为中心的思想很早就被提出,而ICN概念近

年才逐渐成熟. DONA<sup>[2]</sup> 是首个从底层重新设计的 ICN. 国际上, 欧盟启动了第七框架计划下的数个项目: PSIRP/PURSUIT<sup>[3,4]</sup>, NetInf<sup>[5]</sup>, COMET<sup>[6]</sup> 及 CONVERGENCE<sup>[7]</sup> 等. 美国基于 CCN<sup>[1]</sup> 展开了 NDN 和 CCNx 研究. 在国内, ICN 研究多基于 NDN 展开, 集中在路由、缓存及安全等方面. 目前还没有自己的体系结构被提出.

国内外多篇文献<sup>[8-13]</sup> 对 ICN 做过综述, 但均未提出体系结构框架, 也未深入探讨 ICN 与其他未来网络技术的关系及实验平台. 文献[8,9]对如命名、路由、缓存等某种 ICN 关键技术综述. 文献[10,11]归纳总结多个关键技术, 但二者从单一维度分析 ICN, 未涉及 ICN 关键特性. 文献[12,13]介绍了 ICN 主要功能及某些特性, 但二者从“教程”角度介绍 ICN 各模块的具体实现, 对 ICN 框架机制分析不够充分.

本文重点不在于介绍 ICN 的具体设计和实现, 而旨在展示 ICN 体系结构框架, 从功能和特性两个维度探索 ICN 可能的设计空间. 本文首先基于功能和特性提出 ICN 体系结构框架; 然后总结归类 ICN 核心功能, 讨论其面临挑战及方向; 同时分析 ICN 关键特性; 并讨论 ICN 与其他未来网络技术的关系; 总结 ICN 实验平台并分析其部署动机; 最后展望其的未来研究及发展方向.

## 2 ICN 体系结构

ICN 体系结构虽未统一, 但基于信息为中心的思想, 本节通过 DONA、PSIRP、NetInf 和 CCN 等典型 ICN, 尝试梳理出较清晰的体系结构框架.

### 2.1 ICN 简介

DONA 采用扁平名字命名信息, 在树形解析处理器 (Resolution Handler, RH) 网络通过名字选播实现信息分发获取. 如图 1, 信息首先被发布到本地 RH 建立路由 (第 1 步). 路由更新会通知其父节点及对等节点. 请求信息时, 本地 RH 根据信息名查找下一跳, 若无下一跳, 则将报文转发给父节点, 直至到达发布内容的 RH 或获得缓存 (第 2 步). 请求报文记录其经过的 AS (Autonomous System) 域. 信息可直接采用 IP 路由返回, 也可按 AS 路径反向返回 (第 3 步).

PSIRP 采用扁平信息名, 通过集会互连网络 (Rendezvous Internet-working, RI) 发布/解析信息, 通过源路由获得信息. 如图 2, 数据源将信息发布到本地集会网络 (Rendezvous Network, RN), RN 通知给 RI (第 1 步). 订阅信息时, 先由本地 RN 或 RI 解析出信息位置 (第 2, 3 步). 然后向该位置请求信息, 请求路径被写入报文头部, 直到找到内容或缓存 (第 4 步). 信息沿请求路径返回 (第 5 步). NetInf 与 PSIRP 类似, NetInf 特点在于: 基于 MDHT<sup>[14]</sup> 实现名字解析; 解析节点可直接请求内容;

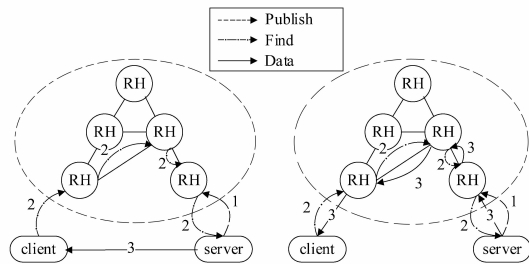


图1 DONA通信过程

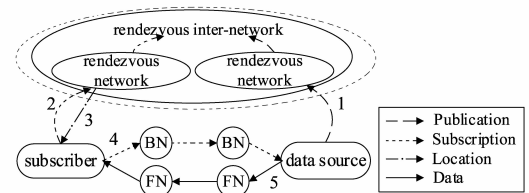


图2 PSIRP通信过程

信息返回基于底层路由.

CCN 采用层次信息名, 直接通过名字匹配查找信息. 报文分两类: 请求报文 Interest 和响应报文 Data. 如图 3, 内容由本地内容路由器 (Content Router, CR) 发布到网络, 各 CR 都记录该内容的路由信息 (第 1 步). 请求信息时, CR 将内容名与转发表 FIB 匹配确定转发出口 (第 2 步). 请求路径上每个 CR 在待定请求表 PIT 中记录 Interest 上一跳. 当找到内容或缓存时, Data 沿 PIT 中的 Interest 路径反向返回 (第 3 步).

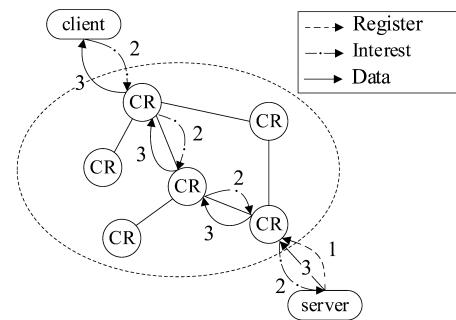


图3 CCN通信过程

### 2.2 体系结构框架

ICN 参与者分三类: 请求者 (订阅者)、提供者 (发布者) 和所有者 (生产者). 请求者为请求内容的用户. 提供者保存并发布内容, 可以是服务器、路由器或主机. 所有者创建和提供内容, 同时证实和担保内容. ICN 参与者角色不固定, 请求者和所有者均可发布内容, 成为提供者.

总结 ICN 共性, ICN 体系结构框架可分三层 (图 5): 应用层、内容层和物理链路层. 网络中内容/服务被抽象成具有唯一标识的命名数据. 基于内容名字, 应用

层调用内容层 API 实现内容/服务检索和发布. 内容层是对 ICN 网络核心的抽象概括, 不同 ICN 内容层可细化成更具体的层次. 链路层用于节点间消息传递. 可建立在传统链路协议之上, 为方便网络间过渡和异构网络融合, 也支持 TCP/IP 协议.

ICN 网络核心包含五个功能模块: 命名机制、通信模式、路由转发、网内缓存及传输控制. 命名机制关注名字结构与功能. 通信模式为通信发起和交互的过程. 路由转发负责信息检索和转发. 网内缓存基于名字缓存信息. 传输控制负责网络传输性能. ICN 还充分考虑可扩展性、安全性、移动性及多接入点等特性, 这些特性均围绕内容而设计.

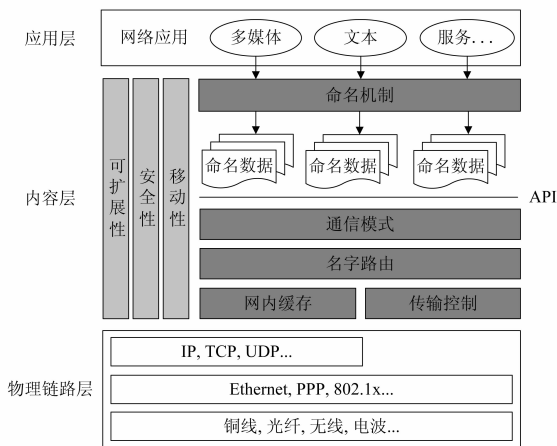


图4 ICN体系结构框架

### 3 功能模块

#### 3.1 命名机制

ICN 对信息命名提出新要求: 全局唯一, 每个信息有区别于其他信息的全局可见的名字; 持续性, 当位置、提供者、时间等外在属性变化时名字不变<sup>[15]</sup>.

名字按结构分为层次名字和扁平名字. 层次名字采用类似 URI、用户可理解的层次结构. CCN 使用层次命名. 层次名字易理解、可聚合, 但名字与信息的相关性需通过数字签名保证. 扁平名字为无语义的比特串, 多为自验证名字. I3<sup>[16]</sup>、DONA、PSIRP 及 NetInf 采用该方案. 扁平名字无需第三方可验证内容完整性及内容-名字绑定, 但信息名与用户可理解名字之间需建立安全映射.

根据 Zooko 三角理论<sup>[17]</sup>, 层次和扁平名字分别缺少安全和可理解属性. 哪种命名方式更适合 ICN 仍存在争议. 鉴于层次名字包含背景信息及可聚合, 文献[1]倾向层次命名. 鉴于扁平名字的可验证和可识别特性, 文献[15, 18]支持扁平命名.

#### 3.2 通信模式

ICN 通信模式分为接收(请求)者驱动和发送(提

供)者驱动. 二者区别在于<sup>[19]</sup>: 发起方, 前者为接收者, 使用拉(Pull)方式获取信息, 后者为发送者, 使用推(Push)方式推送信息; 路由依据, 前者为提供者发布的信息名, 后者为接收者的订阅信息; 消息方向, 前者为双向, 先请求后响应, 后者为单向, 直接响应.

接收者驱动, 信息首先被发布到网络, 然后才能被请求, 如 DONA、CCN、PSIRP 及 NetInf. 发送者驱动, 接收者先将包含信息名及位置的订阅发布到网络, 内容根据路由中的订阅被推送给接收者, 如 I3. Carzaniga 等人<sup>[19]</sup>对比两种模式, 结合二者特点根据不同流量类型提出混合模式.

#### 3.3 路由转发

ICN 采用名字路由, 在内容路由器根据内容名寻址内容. 由于内容及其副本名字相同, 名字路由需解决: 如何维持到每个内容(副本)的路由信息, 及给定内容名如何找到最优(近)内容. 名字路由可分两类: 基于名字的直接路由和基于名字解析的间接路由.

直接路由也称内容路由, 适用于层次名字, CCN 采用该方案. 路由节点用名字替代 IP, 采用类似 OSPF 等传统路由, 每个节点收到内容发布信息后, 在转发表保存该内容路由表项 <名字, 转发出口>. 请求者利用泛洪或多路查询请求内容, 直到找到内容或缓存, 响应报文沿反向路径返回. 直接路由沿最短路径查找内容, 但节点需保存几乎所有内容的路由信息, 其性能面临挑战, 内容移动易引起大规模路由更新.

间接路由适用于扁平名字, DONA、PSIRP、NetInf 采用该方案. 该路由利用内容路由器构建结构化覆盖网作为名字解析系统. 内容首先被发布到解析节点建立解析项. 当请求报文到达解析节点, 名字被解析成一或多个位置. 解析节点可选择最优位置请求内容, 或将位置返给请求者, 由请求者请求内容. 内容可按请求路径反向返回, 或由底层路由返回. 间接路由将内容分布式发布到解析节点, 减轻节点性能压力, 避免大规模路由更新, 但名字解析采用覆盖网, 可能存在长路径, 解析节点失效易导致路由失败.

ICN 路由是一把双刃剑. 一方面, 其能不同程度地解决当前若干问题: 通信双方地址透明, 可防范针对地址的 DoS 攻击, 并缓解针对内容的 DoS 攻击<sup>[20-22]</sup> (4.2 节); 路由不依赖主机, 支持请求者移动, 并一定程度上降低由提供者移动导致的路由更新的紧迫性<sup>[23, 24]</sup> (4.3 节); 内容路由器支持有状态转发, 利于多播、选播及网内缓存实现.

另一方面, 面对海量信息产生的庞大的位置无关名空间, 路由面临两方面挑战: (1) 海量名空间与有限路由存储空间之间的矛盾. 信息数远高于主机数, 信息名位置无关性加大名字聚合难度. (2) 海量名空间导致

路由转发能力不足. 核心 BGP 路由表为百万条记录, 而 ICN 路由表将达到上亿条. 可见, ICN 加剧了当前路由可扩展问题严峻程度. ICN 路由可扩展问题研究分两方面: 路由方案设计和路由器改进(4.1 节).

### 3.4 网内缓存

名字路由为网内缓存提供支持. 路由器根据报文中的信息名判断其是否存在缓存, 及决定是否需要缓存内容. 网内缓存有助于增强网络健壮性和移动性. 其面临挑战在于: 路由器缓存空间有限, 如何利用有限资源保证缓存利用率最大化.

根据缓存位置, 网内缓存分为: 路径无关缓存(Off-path caching)和路径相关缓存(On-path caching). 路径无关缓存独立于信息请求和传输, 主机或路由器将缓存发布为内容副本, 多缓存粗粒度生存周期长的内容, 但其性能遭受质疑. 文献[25]认为适当边缘缓存可满足流行内容缓存需求. 文献[26]发现对非流行内容, 一些简单缓存即可达到近似效果. 路径相关缓存在请求或传输路径上缓存内容, 缓存不被发布, 由特定缓存策略保证其利用率, 多缓存细粒度生存周期短的内容. 路径相关缓存分为: 主动缓存和被动缓存. 当信息请求达到阈值时, 前者采用 NAT 方式请求并缓存内容. 后者记录并转发请求, 等待内容返回并缓存.

为最大化缓存利用率, 减少缓存冗余, 缓存策略成为路径相关缓存的核心. 缓存策略大致分两类: 非协作缓存和协作缓存. 非协作缓存指路由器单独工作, 根据本地信息决定是否缓存内容, 代价小但收益低. 非协作缓存除采用传统内容替换算法外, 还提出最少收益(Least Benefit, LB)策略<sup>[27]</sup>、介数 LRU 及自介数 LRU 策略<sup>[28]</sup>、基于概率缓存策略<sup>[29]</sup>等. 协作缓存通过路由器间协作, 根据全局或部分全局信息选择缓存节点, 代价大但收益高. 已提出基于年龄的协作缓存(Age-based Cooperative caching, ABC)<sup>[30]</sup>、基于通用性能-代价模型的方案<sup>[31]</sup>和缓存冗余预删除方案<sup>[32]</sup>.

由于网络复杂性、ICN 差异及缓存模型区别, 如何使缓存的资源、代价及收益三者达到平衡, 很难给出各方满意的方案, 但 ICN 为网内缓存预留了接口, 支持各种可能的缓存设计.

### 3.5 传输控制

ICN 采用逐跳传输, 传输控制分四方面: 流量和拥塞控制, 容迟/容断, 多播及选播.

(1) 流量和拥塞控制. 流量和拥塞控制根据报文丢失和节点负载情况检测网络拥塞. 分三类方法: (a) 借鉴传统端到端控制, 如 TCC<sup>[33]</sup>. (b) 逐跳流量控制. 相邻路由器间相互反馈流量信息以控制报文转发. (c) 基于流量分类的传输方法<sup>[34]</sup>.

(2) 容迟/容断. ICN 采用重传、多路通信及 DTN 解

决容迟/容断问题. 重传和多路通信多次请求一份或同时请求多份内容, 易造成网络拥塞. 时延容忍网络(Delay Tolerant Network, DTN)采用“缓存-等待-转发”式消息交换, 适用于性能低下甚至异常网络. 基于缓存和名字路由, ICN 可实现 DTN 架构.

(3) 多播机制. ICN 提供有状态的路由转发, 自动支持多播. ICN 以内容请求作为多播依据, 当路由器中同时有多个相同请求, 则记录各请求来源, 并将相同请求合并为一条, 信息到达后分别返给各请求者.

(4) 选播机制. 选播机制解决路由过程中如何选择最优(近)内容的问题. CCN 同时请求多个内容, 选择最先到达内容. DONA 节点预获取到各内容的距离, 选择最近内容. SoCCeR<sup>[35]</sup>采用蚁群优化算法以服务负载和路径拥塞为度量选择服务.

## 3.6 总结

总结各功能模块异同, 如表 1 所示, 各模块及其方法如同 ICN 设计空间的一张“地图”, 每种 ICN 均可找到其对应坐标. 也可根据“地图”上未被标识的坐标, 按照功能需求设计新 ICN 体系结构.

表 1 功能总结

模块	方法	代表 ICN	
命名机制	层次命名	CCN	
	扁平命名	DONA, PSIRP, NetInf	
通信模式	接收者驱动	DONA, PSIRP, CCN, NetInf	
	发送者驱动	I3	
	混合模式	文献[19]	
路由转发	请求	基于名字的直接路由	CCN
		基于名字解析的间接路由	DONA, PSIRP, NetInf
	传输	对称路径	DONA, PSIRP, CCN
		底层路由	NetInf
网内缓存	路径无关缓存	DONA, PSIRP, CCN, NetInf	
	路径相关缓存	主动缓存	DONA
		被动缓存	PSIRP, CCN, NetInf
传输控制	流量和拥塞控制	DONA, PSIRP, CCN, NetInf	
	容迟/容断	DONA, PSIRP, CCN, NetInf	
	多播	DONA, PSIRP, CCN, NetInf	
	选播	DONA, PSIRP, CCN, NetInf	

## 4 特性分析

### 4.1 可扩展性

面对海量信息的分发和获取, ICN 可扩展性面临规模和性能两方面挑战, 其主要包括: 命名空间可扩展和名字路由可扩展.

命名空间可扩展表现在名字可变长,相对 IPv4 地址,无命名空间不足问题.路由可扩展体现在路由表规模、转发能力及路径长度,可采用三种策略:名字聚合、路由器改进及可扩展路由方案设计.

(1) ICN 支持名字聚合,有助减小路由表规模.层次名字支持显式聚合(Inherent aggregation),根据层次结构采用类似 IP 的聚合方法.由于名字与位置无关,显式聚合效果有限.扁平名字支持显式聚合(Explicit aggregation),可根据聚合不变关系(隶属或包含关系)形成串联名字<sup>[18]</sup>.但还没有 ICN 采用该方案.

(2) 从软硬件方面改进路由器,提高存储空间利用率和路由表查询速度.如 Caesar<sup>[36]</sup>为首个基于名字高速转发的高端内容路由器;Wang 等人针对 NDN 提出基于 GPU 的快速查询方案<sup>[37]</sup>和基于二级布隆过滤器的查询方案<sup>[38]</sup>.以上方法并未降低路由表条数,可作为解决路由可扩展问题的有效补充.

(3) 可扩展路由方案可减小路由表规模,降低路径长度.文献[14,39,40]采用层次 DHT 实现名字解析,支持本地解析和内容获取,但顶层 DHT 需存储所有解析信息,非本地解析可能存在长路径.alpha<sup>[41]</sup>采用基于字符的扁平 DHT 和拓扑间映射实现名字路由,保证路由表和路径可扩展,但解析信息分布不均衡.

ICN 路由可扩展问题可尝试采用新可扩展路由技术.如地理(几何)路由<sup>[42,43]</sup>可保证路径和规模可扩展,可将信息名映射为几何坐标,发布到距其较近节点,通过贪心转发实现内容检索.

## 4.2 安全性

与传统网络基于可信主机的安全模型不同,ICN 采用基于内容的安全模型,保证内容和网络安全.

内容安全体现在:(1)机密性和完整性.机密性由提供者对信息加密实现,完整性由所有者通过数字签名保证.(2)可验证和可识别.可验证指可判断信息与名字是否一致.层次命名利用所有者公钥对名字和信息签名,实现名字-信息绑定<sup>[1]</sup>;扁平命名支持信息和名字自验证.可识别指可判断信息与所有者是否一致.两种命名均需外部认证建立所有者-公钥绑定,由签名验证一致性.(3)访问控制.只有被授权用户才可读取内容.文献[44]由可信访问控制供应商管理访问控制策略,通过密钥分发为请求者提供授权.

网络安全保证 ICN 可用性,使之抵抗多种网络攻击.由于提供者不确定,ICN 能防止多种针对主机的攻击,如 DoS 攻击;对于专门针对 ICN 的攻击,如内容 DoS 攻击,ICN 也能较好缓解.

内容 DoS 攻击包括请求泛洪(Interest Flooding)和内容投毒(Content Poisoning)<sup>[20]</sup>.请求泛洪指攻击者恶意发送大量请求,占用网络资源.若请求相同,路由器只

转发一条请求;若请求不同,则根据路由状态统计(如请求成功率)检测攻击,并通过限制转发缓解攻击,如 TDM<sup>[21]</sup>、文献[22].内容投毒指攻击者返回伪造或错误内容,阻止用户获得合法内容.若名字与请求不符,有状态转发保证只转发请求的内容;若名字与请求相符,扁平名字通过名字自验证在路由中检测攻击,层次名字需额外验证机制,如 SCID<sup>[20]</sup>.

## 4.3 移动性和多接入点

ICN 移动性关注请求者和提供者移动后如何快速恢复内容获取.多接入点表现在路由器或主机可同时连接多个路由器、ISP 或网络,关注如何通过多个接口实现内容分发获取.

ICN 请求者和提供者松耦合,有助于二者移动.(1) ICN 关注信息本身,无需维持无缝连接,请求者移动只需重新请求信息.(2)提供者移动需重新发布信息,易导致部分路由信息失效,但网络中大量副本可降低信息查询失败的可能.(3)路由器的缓存功能有助于减少移动丢包和时延.针对请求者移动,SNC<sup>[23]</sup>提出选择性邻居缓存方案,通过权衡用户获取内容及代理服务器缓存内容的代价,选择邻居代理缓存订阅内容.针对提供者移动,文献[24]基于 NDN 提出 Interest 转发方法,移动前利用原(接入)路由器缓存 Interest,移动后向原路由器请求 Interest 缓存.

ICN 支持多接入点:信息名不与固定地址绑定,节点不存在多地址通信问题,可选择多条或较优路径发布或查询信息.DONA 中多接入点主机向多个本地 RH 注册信息,多接入点节点将注册信息转发给多个供应商网络.CCN 多接入点节点从多个接口转发 Interest 报文,并记录已转发请求,避免路由回路.

## 5 ICN 与其他未来网络技术

ICN 可与其他未来网络技术结合,如:网络功能虚拟化技术<sup>[45]</sup>(Network Functions Virtualisation, NFV)、软件定义网络<sup>[46]</sup>(Software Defined Network, SDN)和物联网<sup>[47]</sup>(Internet of Things, IoT).

NFV 将网络硬件设施与网络功能解耦,通过虚拟化技术在统一标准的高性能设备上实现专用设备的功能,使网络功能不再依赖专用硬件.由于 NFV 针对网络基础设施,而 ICN 仍处于“实验室”阶段,很少人关注二者关系.NFV 有助于 ICN 部署,可利用标准或原有网络设备,实现 ICN 专用设备的功能,减少专用硬件需求,提高网络设备重用比例.

SDN 将网络设备的控制平面(Control Plane)与数据平面(Data Plane)物理分离,由统一的控制软件计算路由,并向设备下发转发任务,以灵活管理网络.

ICN 与 SDN 从不同维度研究未来网络,SDN 为 ICN

提供基础网络框架. ICN 查询/转发分离符合 SDN 的特点,有助于二者结合. SDN 提供全局视图,提升 ICN 内容识别能力;SDN 为 ICN 提供实验平台而无需关心底层.但 SDN 未考虑网络主体为内容的情况,如何实现 ICN 成为研究点. CONET 和 PSIRP 均提出 SDN 上的设计方案<sup>[48,49]</sup>. 文献[50]基于 SDN 提出模块化 ICN 框架,支持多种 ICN 间的交互和共存.

IoT 通过传感器实现物与物、人与物、物与 Internet 间的互联,达到对物的智能化识别、管理和监控. IoT 面临多方面挑战,如地址扩展、异构网络通信、设备移动和能量消耗及通信安全等.

ICN 较好地解决了 IoT 以上问题<sup>[51]</sup>. ICN 以信息为中心,可将不同设备整合到同一网络. ICN 中设备无需持续连接网络,提高设备移动性,减少能量消耗. 信息网络层可见,不同网络实体可由具体信息决定路由策略,提高网络性能. ICN 采用内容安全模型,避免不同设备间安全协议设计的复杂性. 相反, IoT 可能成为 ICN“杀手级”应用,推动 ICN 发展. ICN 中, IoT 不关注如何连通物,而是如何发现物及其产生的信息. IoT 分别基于 PURSUIT 和 CCN 实现信息查询方案和智慧城市服务方案<sup>[52,53]</sup>.

## 6 实验平台及部署动机

### 6.1 实验平台

ICN 实验平台按研究对象可分为通用和专用两类,如表 2 所示.

表 2 ICN 实验平台

实验平台	对象	环境	规模	代表 ICN
PlanetLab	通用	真实	大	DONA, PSIRP/PURSUIT, CCN/NDN, CONET
OFELIA	通用	真实	大	CONET, PSIRP/PURSUIT
CUTEi	通用	真实	小	CCN/NDN, PSIRP/PURSUIT
PSIRP Testbed	专用	真实	小	PSIRP/PURSUIT
ICN-Sim	专用	模拟	大	PSIRP/PURSUIT
Icarus	专用	模拟	大	COMET
NDN Testbed	专用	真实	小	CCN/NDN
CCNSim	专用	模拟	大	CCN/NDN
ndnSIM	专用	模拟	大	CCN/NDN

通用平台适用于多种 ICN,一般具备环境真实、大规模、分布式等特点,主要包括:未来网络实验床(Testbed) PlanetLab<sup>[54]</sup>;SDN 实验床 OFELIA<sup>[55]</sup>;ICN 通用平台 CUTEi<sup>[56]</sup>. PlanetLab 采用切片思想将节点资源虚拟化为多个资源分片,支持不同网络应用研究. OFELIA 采用 Openflow 技术, CONET 和 PSIRP 在该平台实现部

署. CUTEi 基于轻量级虚拟化 Linux 容器设计,支持应用层和网络层两种模式. 相对其他平台, CUTEi 更适用于 ICN,但规模有限.

专用平台针对单一 ICN 设计,包括专用试验床和模拟器(Simulator). (1) 专用试验床具备环境真实、小规模、分布式等特点. PSIRP Testbed 用于 Blackadder 模型研究. NDN Testbed 用于 NDN 路由及应用评估研究. (2) 模拟器多基于已有平台开发,灵活支持大规模模拟实验. ICN-Sim<sup>[57]</sup> 基于 Omnet ++ 平台,适用于 PSIRP/PURSUIT 拓扑管理研究. Icarus<sup>[58]</sup> 基于 Python 语言,用于 COMET 缓存及路由研究. ndnSim<sup>[59]</sup> 基于 NS3 平台,采用模块化设计,支持数据包级模拟,广泛用于 NDN 研究. ccnSim<sup>[60]</sup> 基于 Omnet ++ 平台,内容为 chunk 级且规模可扩展,用于 NDN 缓存研究.

统一和整合是 ICN 实验平台的趋势,其主要方向有:(1) 开发维护统一版本的 ICN 网络协议软件包,实现网络开发的规范和标准化;(2) 开发通用网络实验编程接口,如 NEPI<sup>[61]</sup>,以快速方便部署 ICN;(3) 整合扩展专用模拟器,设计模块化结构平台,由一种平台支持多种功能模拟.

### 6.2 部署动机

在非实验网络部署 ICN 面临多种困难:TCP/IP 非常成熟并被广泛应用;ICN 需大规模升级或替换现有设备;网络应用需重新设计. 但 ICN 在经济和技术方面仍有很大潜力.

经济方面:(1) 请求者(用户)无需更新个人设备即可接入 ICN,且用户体验更好. (2) 网络供应商(ISP)虽需升级或替换设备,但仍有利益驱动:其可替代 CDN 供应商,为用户提供缓存服务;NFV 可降低设备更新代价. (3) 提供者只需重新设计服务软件,ICN 可增强其业务能力,使内容分布更广泛并保证安全.

技术方面:ICN 可促进互联网不同层次协议的发展. ICN 虽从底层开始重新设计,但其思想可应用在网络不同协议层. 既可作为核心层提供包级别互联,也可在 IP 上作为覆盖网提供信息分发服务. 现阶段, ICN 部署可循序渐进,从覆盖网或专用网络开始,展现其技术和经济优势.

## 7 结论及展望

ICN 设计以应用需求为目标,但目前仍处于发展阶段,存在应用需求不明确和技术不成熟的问题. 未来研究方向包括:(1) 寻找“杀手级”应用,可能是新应用或传统应用的替代业务;(2) 解决技术难题,尤其是路由可扩展和网内缓存问题;(3) 量化比较不同 ICN 设计,对其基本技术路线形成共识. 学术界虽尚未就 ICN 的设计达成共识,但以信息为中心的思想符合未来应用

需求. 无论未来 ICN 与 IP 共存或逐渐消失, ICN 的设计思想都已经为未来网络研究带来了活力, 并将继续促进未来网络的发展.

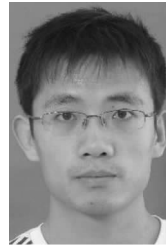
#### 参考文献

- [1] Jacobson V, Smetters D K, Plass M F, et al. Networking named content [A]. Proc of the 5th CoNEXT [C]. New York: ACM Press, 2009. 1 – 12.
- [2] Koponen T, Chawla M, Chun B G, et al. A data-oriented (and beyond) network architecture [A]. Proc of ACM SIGCOMM [C]. New York: ACM Press, 2007. 27 – 31.
- [3] Särelä M, Rinta-aho T, Tarkoma S. RTFM: publish/subscribe internetworking architecture [A]. Proc of ICT Mobile Summit [C]. Stockholm: IIMC, 2008. 1 – 8.
- [4] Fotiou N, Nikander P, Trossen C, et al. Developing information networking further; from PSIRP to PURSUIT [A]. Proc of the 7th ICST Conference on Broadband Communications [C]. Heidelberg: Springer, 2010. 1 – 13.
- [5] Ahlgren B, Ambrosio M D, Dannewitz C. Second netinf architecture description [R]. EU: 4WARD FP7, 2010.
- [6] Böhlen A, Batalla J M, Florez D, et al. The content mediator architecture for content-aware networks [J]. Special Issue of Journal Telecommunication Review and Telecommunication News. 2012, 8(9): 1192 – 1203.
- [7] Detti A, Blefari-Melazzi N, Salsano S, et al. CONET: a content centric inter-networking architecture [A]. Proc of ACM SIGCOMM Workshop on ICN [C]. New York: ACM Press, 2011. 50 – 55
- [8] Bari M F, Rahman C S, Ahmed R, et al. A survey of naming and routing in information-centric networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(12): 44 – 53.
- [9] Zhang G Q, Li Y, Lin T. Caching in information centric networking: A survey [J]. Computer Networks, 2013, 57(16): 3128 – 3141.
- [10] 夏春梅, 徐明伟. 信息中心网络研究综述 [J]. 计算机科学与探索, 2013, 7(6): 481 – 493.  
Xia C M, Xu M W. Survey of information-centric networking [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2013, 7(6): 481 – 493. (in Chinese)
- [11] 吴超, 张尧学, 周悦芝, 等. 信息中心网络发展研究综述 [J]. 计算机学报, 2015, 37(14): 1 – 18.  
Wu C, Zhang Y X, Zhou Y Z, et al. A survey for the development of information-centric networking [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 37(14): 1 – 18. (in Chinese)
- [12] Ahlgren B, Dannewitz C, Imbrenda C, et al. A survey of information-centric networking [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 26 – 36.
- [13] Xylomenos G, Ververidis C, Siris V, et al. A survey of information-centric networking research [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2014, 16(2): 1024 – 1049.
- [14] D'Ambrosio M, Dannewitz C, Karl H, et al. MDHT: a hierarchical name resolution service for information-centric networks [A]. Proc of ACM SIGCOMM workshop on ICN [C]. New York: ACM Press, 2011. 7 – 12.
- [15] Dannewitz C, Golic J, Ohlman B, et al. Secure naming for a network of information [A]. Proc of INFOCOM Workshops [C]. San Diego: IEEE Press, 2010. 1 – 6.
- [16] Stoica I, Adkins D, Zhuang S, et al. Internet Indirection Infrastructure [J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2004, 12(2): 205 – 218.
- [17] Wilcox-O'Hearn Z. Names: decentralized, secure, human-meaningful: choose two [EB/OL]. <http://shoestringfoundation.org/~bauern/names/distnames.html>, 2006-01-30/2015-07-04.
- [18] Ghodsi A, Koponen T, Rajahalme J. Naming in content-oriented architectures [A]. Proc of ACM SIGCOMM Workshop on ICN [C]. New York: ACM Press, 2011. 1 – 6.
- [19] Carzaniga A, Papalini M, Wolf A L. Content-based publish/subscribe networking and information-centric networking [A]. Proc of ACM SIGCOMM workshop on ICN [C]. New York: ACM Press, 2011. 56 – 61.
- [20] Gasti P, Tsudik G, Uzun E, et al. DoS & DDoS in named-data networking [A]. Proc of the 22nd ICCCN [C]. Nassau: IEEE Press, 2013. 1 – 7.
- [21] Wang K, Zhou H, Luo H, et al. Detecting and mitigating interest flooding attacks in content-centric network [J]. Security and Communication Networks. 2014, 7(4): 685 – 699.
- [22] Afanasyev A, Mahadevan P, Uzun E, et al. Interest flooding attack and countermeasures in named data networking [A]. Proc of IFIP Networking [C]. New York: IEEE Press, 2013. 1 – 9.
- [23] Vasilakos X, Siris V A, Polyzos G C, et al. Proactive selective neighbor caching for enhancing mobility support in information-centric networks [A]. Proc of ACM SIGCOMM workshop on ICN [C]. New York: ACM Press, 2012. 61 – 66.
- [24] Kim D H, Kim J H, Kim Y S, et al. Mobility support in content centric networks [A]. Proc of ACM SIGCOMM workshop on ICN [C]. New York: ACM Press, 2012. 13 – 17.
- [25] Ghodsi A, Koponen T, Raghavan B, et al. Information-centric networking; seeing the forest for the trees [A]. Proc of ACM SIGCOMM Workshop on HTN [C]. New York: ACM Press, 2011. 1 – 6.
- [26] Fayazbakhsh S K, Lin Y, Tootoonchian A, et al. Less

- gain, most of the gain; incrementally deployable ICN [A]. Proc of ACM SIGCOMM [C]. New York: ACM Press, 2013. 147 – 158.
- [27] Wang S, Bi J, Wu J P, et al. Could in-network caching benefit information-centric networking [A]. Proc of the 7th AINTEC [C]. New York: ACM Press, 2011. 112 – 115.
- [28] He D, Chai W K, Pavlou G. Leveraging in-network caching for efficient content delivery in content-centric network [A]. Proc of LCS [C]. London: University College London, 2008. 1 – 4.
- [29] Psaras I, Chai W K, Pavlou G. Probabilistic In-Network Caching for Information-Centric Networks [C]. Proc of ACM SIGCOMM workshop on ICN. New York: ACM Press, 2012. 55 – 60.
- [30] Ming Z X, Xu M W, Wang D. Age-based Cooperative Caching in Information-Centric Networks [A]. Proc of INFOCOM Workshops [C]. Orlando: IEEE Press, 2012. 268 – 273.
- [31] Li YH, Xie H Y, Wen Y G, et al. Coordinating in-network caching in content-centric networks; model and analysis [A]. Proc of the 33rd ICDCS [C]. Philadelphia: IEEE Press, 2013. 62 – 72.
- [32] Wang J M, Zhang J, Bensaou B. Intra-AS cooperative caching for content-centric networks [A]. Proc of ACM SIGCOMM Workshop on ICN [C]. New York: ACM Press, 2014. 61 – 66.
- [33] Koptchev V, Dimitrov V. Traffic and congestion control in a publish/subscribe network [A]. Proc of the 11th CompSysTech [C]. New York: ACM Press, 2010. 172 – 176.
- [34] Tsilopoulos C, Xylomenos G. Supporting diverse traffic types in information centric networks [A]. Proc of the ACM SIGCOMM workshop on ICN [C]. New York: ACM Press, 2011. 13 – 18.
- [35] Shanbhag S, Schwan N, Rimac I, et al. SoCCeR: services over content-centric routing [A]. Proc of ACM SIGCOMM workshop on ICN [C]. New York: ACM Press, 2011. 62 – 67.
- [36] Varvello M, Perino D, Esteban J. Caesar: a content router for high speed forwarding [A]. Proc of ACM SIGCOMM workshop on ICN [C]. New York: ACM Press, 2012. 73 – 78.
- [37] Wang Y, Zu Y, Zhang T, et al. Wire speed name lookup: a GPU-based approach [A]. Proc of NSDI [C]. Berkeley: USENIX Association Publishers, 2013. 199 – 212.
- [38] Wang Y, Tai D Z, Zhang T, et al. Greedy name lookup for named data networking [A]. Proc of ACM SIGMETRICS [C]. New York: ACM Press, 2013. 359 – 360.
- [39] Liu H, Foy X D, Zhang D. A Multi-Level DHT Routing Framework with Aggregation [A]. Proc of ACM SIGCOMM workshop on ICN [C]. New York: ACM Press, 2012. 43 – 48.
- [40] Dannewitz C, D' Ambrosio M, Vercellone V. Hierarchical DHT-based name resolution for information-centric networks [J]. Computer Communications, 2013, 36 (7) : 736 – 749.
- [41] Ahmed R, Bari M F, Chowdhury S R, Rabbani MG, Boutaba R. aroute: a name based routing scheme for information centric networks [A]. Proc of the 32nd INFOCOM [C]. Turin: IEEE Press, 2012. 90 – 94.
- [42] Kleinberg R. Geographic routing using hyperbolic space [A]. Proc of the 26th INFOCOM [C]. Anchorage: IEEE Press, 2007. 1902 – 1909.
- [43] 王建新, 赵湘宁, 刘辉宇. 一种基于两跳邻居信息的贪婪地理路由算法 [J]. 电子学报, 2008, 36 (10) : 1903 – 1909.  
Wang J X, Zhao X N, Liu H Y. A greedy geographic routing algorithm based on 2-hop neighbors [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36 (10) : 1903 – 1909. (in Chinese)
- [44] Fotiou N, Marias G F, Polyzos G C. Access control enforcement delegation for information centric networking architectures [A]. Proc of ACM SIGCOMM workshop on ICN [C]. New York: ACM Press, 2012. 85 – 90.
- [45] Chiosi M, Clarke D, Willis P, et al. Network functions virtualisation [R]. Darmstadt: SDN and OpenFlow World Congress, 2012.
- [46] Foundation O N. Software-defined networking: The new norm for networks [R]. Palo Alto: Open Networking Foundation, 2012.
- [47] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究 [J]. 电子学报, 2012, 40 (5) : 1023 – 1029.  
Qian Z H, Wang Y J. IoT technology and application [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40 (5) : 1023 – 1029. (in Chinese)
- [48] Salsano S, Blefari-Melazzi N, Detti A, et al. Information centric networking over SDN and OpenFlow: architectural aspects and experiments on the OFELIA testbed [J]. Computer Networks, 2013, 57 (16) : 3207 – 3221.
- [49] Liu W, Ren J, Wang J. A unified framework for software-defined information-centric network [R]. USA: IETF, 2013.
- [50] Syrivelis D, Parisi G, Trossen D, et al. Pursuing a software defined information-centric network [A]. Proc of EWSDN [C]. Darmstadt: IEEE Press, 2012. 103 – 108.
- [51] Quevedo J, Corujo D, Aguiar R. A case for ICN usage in IoT environments [A]. Proc of GLOBECOM [C]. Austin: IEEE Press, 2014. 2770 – 2775.

- [52] Marias G F, Fotiou N, Polyzos G C. Efficient information lookup for the Internet of Things [A]. Proc of WoWMoM [C]. San Francisco: IEEE Press, 2012. 1 – 6.
- [53] Piro G, Cianci I, Grieco L A, et al. Information centric services in smart cities [J]. Journal of Systems and Software, 2014, 88: 169 – 188.
- [54] Chun B, Culler D, Roscoe T, et al. Planetlab: an overlay testbed for broad-coverage services [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(3): 3 – 12.
- [55] Køpsel A, Woesner H. OFELIA-pan-european test facility for openflow experimentation [A]. Towards a Service-Based Internet [C]. Heidelberg: Springer, 2011. 311 – 312.
- [56] Asaeda H, Li R, Choi N. Container-based unified testbed for information-centric networking [J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 60 – 66.
- [57] Vastardis N, Bontozoglou A, Yang K, et al. Simulation tools enabling research on Information-centric Networks [A]. Proc of ICC [C]. Ottawa: IEEE Press, 2012. 5833 – 5838.
- [58] Saino L, Psaras I, Pavlou G. Icarus: a caching simulator for information centric networking [A]. Proc of the 7th SIMUTools [C]. Brussels: ICST, 2014. 66 – 75.
- [59] Afanasyev A, Moiseenko I, Zhang L. ndnSIM: NDN simulator for NS-3 [R]. Los Angeles: University of California, Los Angeles, 2012.
- [60] Rossini G, Rossi D. ccnSim: an highly scalable ccn simulator [A]. Proc of ICC [C]. Budapest: IEEE Press, 2013. 2309 – 2314.
- [61] Quereilhac A, Lacage M, Freire C, et al. NEPI: an integration framework for network experimentation [A]. Proc of the 19th SoftCOM [C]. Split: IEEE Press, 2011. 1 – 5.

#### 作者简介



**孙彦斌** 男, 1987 年生于山东滕州. 哈尔滨工业大学网络与信息安全研究中心博士生. 研究方向为网络安全, 未来网络.

E-mail: sunyanbin@nis.hit.edu.cn



**张宇** 男, 博士, 哈尔滨工业大学网络与信息安全研究中心副教授, 研究方向为网络安全, 并行处理, 未来网络.

**张宏莉 (通讯作者)** 女, 博士生导师, 哈尔滨工业大学网络与信息安全研究中心教授, 研究方向为网络安全, 网络测量, 网络计算.  
E-mail: zhanghongli@hit.edu.cn