



通用分组网络寻址路由与标识演进方法及系统

李挥^{1,3*}, 邬江兴², 韦国华¹, 孟详帧¹, 白鹤¹, 林立宏¹, 杨昕¹, 伊鹏², 宗泽斌⁴, 魏进武⁵, 朱伏生⁶, 陆以勤⁷, 缪伟豪⁸, 杨伟豪⁹, 郑泽峰¹⁰, 马军锋¹¹, 张明龙¹², 张汉裕¹², 褚晓理¹³, 何品翰¹⁴, 王泽华¹⁵

1. 北京大学深圳研究生院, 深圳 518055, 中国
2. 国家数字交换系统工程技术研究中心, 郑州 450002, 中国
3. 鹏城实验室, 深圳 518055, 中国
4. 中国电信股份有限公司, 北京 100033, 中国
5. 中国联合网络通信有限公司, 北京 100032, 中国
6. 广东省新一代通信与网络创新研究院, 广州 510289, 中国
7. 华南理工大学电子与信息学院, 广州 510006, 中国
8. 香港科技大学电子与计算机工程系, 香港, 中国
9. 香港中文大学信息工程系, 香港, 中国
10. 澳门科技大学资讯科技学院, 澳门, 中国
11. 中国信息通信研究院, 北京 100191, 中国
12. Department of Electrical and Electronic Engineering, Auckland University of Technology, Auckland 1142, New Zealand
13. Department of Electronic and Electrical Engineering, The University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, UK
14. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, Waterloo N2L 3G1, Canada
15. Department of Electrical and Computer Engineering, The University of British Columbia, Vancouver V6T 1Z2, Canada

* 通信作者. E-mail: lih64@pkusz.edu.cn

收稿日期: 2022-06-28; 修回日期: 2022-09-21; 接受日期: 2022-10-24; 网络出版日期: 2023-08-14

国家重大科技基础设施 — 未来网络试验设施北大实验室 (批准号: 发改高技 [2016]2533, [2018]775, 深发改 [2019]261, 国家发改投资 CENI[2020]386)、基础研究增强计划未来网络与区块链安全项目 (批准号: 2021-JCJQ-JJ-0483)、深圳市科创委资助 (批准号: JCYJ20210324122013036, JCYJ20190808155607340, JSGG20170406144032901, JSGG20170824095858416, JCYJ20170306092030521)、广东省重点领域研发计划网络信息安全“网络基于网络安全大数据的关键信息基础设施安全评价体系研究和应用开发” (批准号: 2019B010137001)、国家重点研发计划网络空间安全重点专项“先进防御设备与系统研制” (批准号: 2017YFB0803204)、“新形势下网络基础设施防护技术” (批准号: 2017YFB0803200)、华为技术资助 (批准号: No.TC20201222002) 和中兴通讯资助 (批准号: No.2019ZTE03-01) 项目

摘要 未来的网络通信需求动态多样, 网络层功能也应适时而变, 因此对网络可演进性的研究具有重要意义. 多标识网络作为一种兼容性极强的网络架构, 网络层功能十分丰富, 但仍缺少网络演进性设计. 本文为多标识网络设计了一种通过标识扩展来支持网络体系不断演进的方案, 包括对标识空间进行形式化定义, 设计标识回退候选标识的优先级排序算法以及设计支持标识扩展的路由转发协议; 并且在 ndnSIM 网络仿真环境和多标识网络测试床中实现了上述方案, 评估了标识扩展方案的可行性和

引用格式: 李挥, 邬江兴, 韦国华, 等. 通用分组网络寻址路由与标识演进方法及系统. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 1629–1644, doi: 10.1360/SSI-2022-0261
Li H, Wu J X, Wei G H, et al. Method and system for general packet network addressing routing and identifier evolution (in Chinese). Sci Sin Inform, 2023, 53: 1629–1644, doi: 10.1360/SSI-2022-0261

性能. 实验结果表明相比于标识扩展机制给网络架构带来的益处, 其性能损失在可接受的范围内.

关键词 多标识网络, 标识扩展, 网络演进, 原型系统, ndnSIM 仿真

1 引言

随着人类生活与互联网的深度融合, 社会对网络通信的需求进一步提升, 各种新型的网络服务和应用场景如雨后春笋般涌现. 传统的 TCP/IP (transmission control protocol/Internet protocol) 网络被设计成一个点对点通信协议, 着重于两个终端节点之间的相互通信. 随着移动互联网、工业互联网、物联网、移动边缘计算网络、车联网和天地一体化网络等新型网络场景的出现, 以及网络用户如今上网主要为了获取内容、获取服务的网络通信需求的本质转变, IP 网络体系已不能适应现在和未来用户对网络通信的新需求. 因此, 当前的互联网中, 体系结构功能与其主要用途间的不匹配问题越发严重^[1,2]. 许多研究都在思考未来网络架构的发展方向, 网络架构亟待演进. 传统 IP 网络和近年来出现的新型网络架构, 包括 IPv6^[3]、内容中心网络^[4] 等, 这些网络架构的共性问题在于, 它们都提倡将一种单一的网络协议或通信主体作为网络的首要通信方式, 并重新构建一个难以扩展的网络层. 在固定网络层协议的网络环境下, 当新型通信需求出现时, 网络的升级总会面临所有路由设备“彻底更换”的问题, 这将成为网络架构升级的巨大阻碍.

本文在总结前人对网络演进方案的研究基础上, 提出了通用分组网络寻址路由与标识演进方法及系统, 详细说明了其思想理论, 对方案可行性和性能进行了实验验证和评估. 该方案实现了向前兼容和向后兼容的特性: 向前兼容的特性保证网络的可演进性, 而向后兼容可以保证新型的网络架构在现有的网络上进行渐进部署, 让未来新出现的新型网络功能快速地在旧的网络设备上部署起来. 为了让未来网络功能的扩展不再需要推翻重来, 对网络可演进性的研究具有重要意义.

2 相关研究及背景知识

2.1 国内外研究现状

时至今日, 学术界已经涌现许多关于网络架构演进技术的方案. 最容易部署的提案是基于覆盖技术 (overlay) 的方案^[5]. 覆盖技术的基本思想是在较旧协议上承载较新协议 (如使用 IPv4 协议来承载 IPv6 协议)^[6]. 覆盖技术对于实验性的部署很有用, 并且可以实现一种架构被另一种架构的大规模替换, 但它们不能实现普遍、持续的改变^[7].

1997 年提出的多协议标签交换协议 (multi-protocol label switching, MPLS) 是一种应用给网络分组增减标签的方法以使中间路由器对流入的网络分组进行高效处理与转发的技术^[8]. MPLS 在网络二层与三层之间, 因此 MPLS 对于三层协议来说可以看成是一种铺垫 (underlay) 技术, 对于二层协议则是覆盖技术. 2002 年由 Tennenhouse 等^[9] 提出的主动网络架构 (active networking) 在网络分组的转发方式上进行改革; 2013 年 NEBULA^[10] 在网络服务上提供很好的可扩展性, 传输路径信息类似于 MPLS 的一系列标签用以说明中间路由器如何处理网络分组.

2003 年提出的 Plutarch^[11] 代表了一种比较新颖的网络演进方法, 它将一组网络通信主体集合 (包括路由器、终端、交换机和服务器等) 拼接在一起, 它们之间可以通过不同的“间隙函数”进行交流. 与此类似, 2020 年 Jahanian 等^[12] 提出了 COIN, 同样使用类似于“间隙函数”的翻译原则实现内容中心网络架构与 IP 网络架构的互通.

2011 年提出的 XIA (expressive Internet architecture)^[13] 允许通过定义新型通信主体的方法来引入新的服务模型, XIA 依赖于包头中的有向无环图保存不同的路由信息, 该图允许不支持某个网络包所请求服务的路由器将网络包转发到支持所请求服务的网络域. Sambasivan 等^[14] 给 BGP (border gateway protocol) 协议加入两个关键特征: 允许路由器或自治域转发它不认识的控制分组; 支持多种协议的路由通告, 在 2017 年提出 D-BGP 协议可以进化域间路由. ChoiceNet^[15] 旨在通过培育网络服务经济来改善互联网的架构, 通过市场的选择来激励网络的创新.

2011 年提出的 FII (framework for Internet innovation)^[16] 的提议也关注架构的演变, 尽管是通过一种不向后兼容的全新方式, 主张将异构网络划分到网络域内部, 并且网络域之间通过特殊的路由算法进行通信. 与 FII 相比, 在 2012 年 Ghodsi 等^[17] 提出的 OPAAE (ongoing and pervasive architectural evolution) 以及 Raghavan 等^[18] 提出的软件定义网络架构 (software-defined Internet architecture, SDIA) 模型都采用了类似但更普遍的方法来实现网络的可演进性.

国内也涌现许多关于网络可扩展性的相关研究. 2008 年, 清华大学张小平等^[19] 提出了可扩展路由器结构. 2011 年, 北京交通大学张宏科团队^[20] 提出了一体化标识网络的“基础设施层”和“普适服务层”理论及关键技术. 2014 年, 由河南省国家数字交换系统工程技术研究中心的兰巨龙等^[21] 提出的可重构信息通信基础网络体系, 创立了“业务-元服务-元能力”模型, 通过对网络元能力的动态组配和调度, 形成各种通过元服务来支撑上层业务, 从而实现网络层的自定义和动态扩展.

总体上, 虽然近年来已经有许多优秀的关于网络演进的方案被提出, 但这些方案上还存在向后兼容性、网络架构互通性、标识路由可扩展性等的问题.

2.2 多标识网络概述

多标识网络 (multi-identifier network, MIN) 同样是在网络用户对网络层功能丰富性和安全性提出新的需求的时代大背景下产生的研究成果. 从总体目标的来说, MIN 遵循以下 3 个设计原则^[22].

(1) 共管共治原则. 随着互联网与社会各领域的深度融合, 网络空间中攻防对抗更为激烈, “网络主权”是国家主权在网络空间的自然延伸. MIN 网络既提倡对网络顶层标识的共管共治, 又提倡国家或组织对私有标识空间的高度自治, 让各国独立地拥有除 IP 外的其他标识的主权.

(2) 多种标识共存原则. (a) 多种寻址路由标识与网络协议在网络层平行共存是 MIN 的关键特点. 多种标识主要包括身份、内容、服务、IPv4/v6、地理位置、工业互联网/物联网标识、双曲路由等标识, 这些标识可以各自在其传输虚拟平面中存在, 并且 MIN 的所有路由器都支持这些标识所代表网络协议的处理和转发. (b) MIN 使用覆盖技术实现在 IP 网络下的渐进式部署, 即使用 IP 隧道来传输 MIN 的分组.

(3) 安全原则. MIN 的安全性主要体现在 4 个方面. (a) 利用多标识系统 (multi-identifier system, MIS) 将网络通信实体的真实身份标识与网络通信标识绑定在一起, 可以通过 MIS 验证用户标识和真实身份. (b) 使用用户公钥的哈希值作为网络通信实体的身份标识直接用于网络寻址, 这种身份标识可以让通信双方在没有第三方可信机构参与的情况下, 相互认证对方标识的合法性. (c) 引入可信计算、人工智能威胁感知等技术, 提升网络体系的内生安全强度. (d) 采用内生安全的路由器、防火墙、分布式存储系统等技术来保障主权网的安全^[23].

支持多标识网络通信的路由器称为多标识路由器 (multi-identifier router, MIR). MIN 体系架构提出将网络分为两个平面, 数据面和管理面^[21~24]. 在网络数据面, MIN 体系通过 MIR, 构建一个支持多种网络标识和多种通信语义平等共存的网络模型. 通过在网络层支持多种通信机制并将传输控制机制融入网络层, MIN 极大地丰富了网络层的功能, 提升了网络层的服务质量. MIN 在其管理面, 使

用基于投票共识算法 PoV (proof of vote) [25] 构建的多层级联盟区块链, 构建一个支持多个参与方平等地共管共治的网络标识管理和解析系统, 即 MIS. MIS 除了对网络中的标识进行管理解析以外, 还负责对网络中的用户身份进行管理, 为网络的安全提供可靠的信任根等. 使用 MIN 的用户都需要通过 MIS 使用其真实身份信息注册通信所用的标识, 相互通信的网络实体在通信之前也需要通过 MIS 查询解析对方的网络标识.

本文重点为 MIN 的第 2 条原则添加新的内容, 即允许网络标识不断扩展从而支持 MIN 的持续演进.

2.3 基本概念定义

定义1 (网络标识) 网络包中携带的, 用于声明中间路由器如何处理和转发网络包的数据 (下文简称为“标识”).

如 IPv4 和 IPv6 网络中网络包的目的地地址; 命名数据网络 (named data network, NDN) [26] 中, 兴趣包和数据包的名称; 在基于双曲路由算法 [27] 进行路由的网络中, 网络节点的双曲空间坐标等. 在本文中, $I = \{i_0, i_1, i_2, \dots, i_k\}$ 表示 MIN 体系的网络层中支持的所有标识类型的集合, 其中 i_0 表示网络设备的身份标识, 是最基本不可缺少的标识; 而 $\{i_1, i_2, \dots, i_k\}$ 包含内容兴趣 i_1 、内容数据 i_2 、服务请求 i_3 、服务答应 i_4 、地理位置 i_5 和 IP i_6 等标识, 并且可以扩展. I_k 是 I 中若干种标识组成的子集合, 如 $I_k = \{i_0, i_1\}$.

定义2 (标识的形态) 网络标识使用字符串展示出来时的结构特征.

这些特征都存在一定的规律性, 具有相同字符串规律的标识拥有相同的标识形态. 根据标识形态的不同可以将网络标识分为以下几种类型: (a) 平面化标识. 例如一些网络架构使用的公私钥或哈希值就是平面化标识的典型样例. (b) 层级化标识. 典型的层级化标识如 NDN 使用的类 URL 格式的标识, 例如 “/ndn/lab/icon.jpg”. (c) 空间坐标式标识. 双曲路由模型中使用的标识形如 (R_1, Θ_1) , 正是典型的空间坐标式的标识类型. (d) 序列式标识. 序列式标识由一组转发提示组成, 这组转发提示的动态组合直接形成了网络分组的转发路径. 典型代表有 MPLS 技术中的标签序列.

定义3 (标识的语义) 网络路由器对流入网络分组的处理操作的集合.

将一个网络中路由器能够对网络分组执行的操作表示为一个集合 $F = \{f_0, f_1, f_2, f_3, \dots\}$, f_i 表示包转发、查转发表、查缓存、包缓存等操作, 且支持扩展, 用 $I = \{i_0, i_1, i_2, \dots, i_k\}$ 表示网络中支持的标识类型集合. 则网络中的某种标识 i_k 的语义可以表示为操作集合 F 的一个子集:

$$\text{Semantics}(i_k) = \{f_a, f_b, f_c, \dots\} \subseteq F, \quad (1)$$

基于以上标识形态和标识语义的定义, 表 1 列举出了 MIN 以及其他一些网络架构中的标识, 为每种标识命名, 并给出了标识具体样例、标识形态和标识语义说明.

根据表 1 列举的标识形态和语义, 不难发现这些语义可进一步被归纳并定义为操作集合 {转发决策操作, 转发操作}, 其中转发决策操作主要是通过查找转发表或计算距离等方式, 决定收到的网络分组应该往哪个出口转发, 而转发操作则是将网络分组从出口网卡转发出去. 综上, 基础标识的定义如下.

定义4 (基础标识) 仅包含操作集合 {转发决策操作, 转发操作} 的网络标识.

例如, 可以基于 IPv4 和 IPv6 标识承载任意类型的上层网络协议, 是因为二者都可以作为基础标识.

表 1 标识形态和语义

Table 1 Forms and semantics for identifier

Name	Type number	Form	Semantics
Identity identifier	101	Flat	Lookup forwarding table, forward
Content interest identifier	102	Hierarchy	Lookup forwarding table, lookup cache, record returning path in PIT, forward
Content data identifier	103	Hierarchy	Lookup PIT table, cache data chunk, forward
Service request identifier	104	Hierarchy	Lookup forwarding table, record return path in PIT, forward
Service response identifier	105	Hierarchy	Lookup PIT table, forward
Geolocation identifier	106	Space coordinate	Calculate distance, forward
Hyperbolic routing identifier	107	Space coordinate	Calculate distance, forward
Content interest identifier	108	Flat	Lookup forwarding table, lookup cache, record returning path in PIT, forward

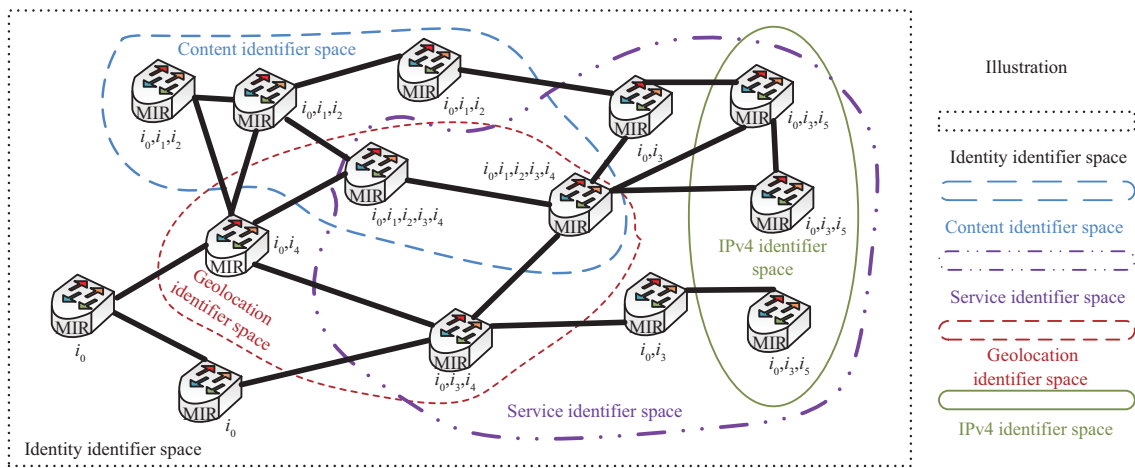


图 1 (网络版彩图) 标识空间划分

Figure 1 (Color online) Identifier space division

定义5 (标识的距离) 标识语义的差别程度。

标识语义集合中元素的个数称为该集合的基数。本文使用两个标识语义基数的差值作为二者的距离,用以量化两种标识语义之间差别的大小。也可根据网络需求选择其他量化方式。例如,根据表 1,内容兴趣标识语义集合包含 4 个元素,其基数为 4,同理服务请求标识基数为 3,所以二者距离为 1。

本文将支持相同标识种类的网络设备划分在一个区域内,这些网络设备可以通过有线或无线通信相连接,也可以相互不相连,并将这个区域称为标识空间。标识空间的形象概念图如图 1 所示。

定义6 (标识空间) 本文中 V 表示网络中所有网络节点的集合, $V = \{H, R, S\}$ 包括主机、路由器、交换机等。结合标识的符号定义,有 $C^{I_k} = (I_k, V_{I_k})$, C^{I_k} 代表多个网络节点以及其中每个节点所支持的标识的集合,是一个二元组。其中 I_k 表示 C^{I_k} 支持的标识种类的集合, V_{I_k} 表示 C^{I_k} 内所有网络节点。

当且仅当集合 $C^{I_k} = (I_k, V_{I_k})$ 满足以下条件, C^{I_k} 构成 MIN 中的一个标识空间:

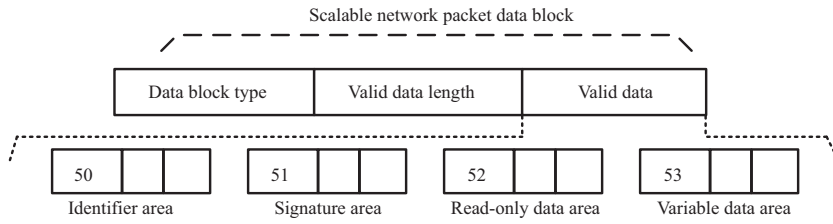


图 2 可扩展网络分组编码结构
Figure 2 Scalable network packet format

表 2 可扩展网络分组的数据块类型字段和有效数据长度字段的长度约定表

Table 2 Length conventions for block type fields and valid data length fields of scalable network packets

First byte value	Field length (bytes)	Range
0 ~ 240	1	0 ~ 240
241	3	$2^{16} \sim 2^{16} - 1$
242	5	$2^{16} \sim 2^{32} - 1$
243	9	$2^{32} \sim 2^{64} - 1$

- (1) 限定性. $I_k \subseteq I, V_{I_k} \subseteq V$, 表示选取 MIN 中节点子集和标识子集.
- (2) 原子性. $i_0 \in I_k$, 表示每个标识空间支持的标识集合中必须包含身份标识.
- (3) 一致性. $\forall v \in V_{I_k}, \forall i_j \in I_k$, 都有 v 支持 i_j , 表示在该标识空间中, 任意设备支持任意标识.
- (4) 闭包性. 若 $\exists v \in V$ 且对于 $\forall i_j \in I_k, v$ 支持 i_j , 则 $v \in V_{I_k}$, 表示在 MIN 的一个标识空间中, 任何一个支持该标识空间内所有标识的网络设备都属于该标识空间.

本文提出利用可扩展网络分组来对 MIN 的网络分组进行编码. 可扩展网络分组编码采用了递归嵌套式的编码方式, 在理论上可以无限添加新的可扩展网络分组对象, 以满足网络演进的需求. 另一方面, 可扩展网络分组对象的有效数据值是变长的, 可以根据网络演进的需求, 适当调整某些字段的长度. 可扩展网络分组的基本结构如图 2 所示.

本文设计了表 2 所示的数据块类型和有效数据长度段的表示方法, 使可扩展网络分组的数据块类型和有效数据长度这两个段具有一定的扩展性且尽量减少这两个字段占用的传输开销. 数据块类型段的第一个字节除了表示数据块类型段的值以外, 还用于表示数据块类型段所占的字节数.

基于以上可扩展网络分组编码风格的约定, 本文设计了一种支持标识扩展和网络渐进式演进的多标识网络分组格式. 按可扩展网络分组格式编码的网络分组呈现出一种层级化的结构. 整个网络分组被编码成顶层的可扩展网络分组数据块, 网络分组的所有关键的一级字段被编码成可扩展网络分组数据块之后, 可以不按顺序地装载在顶层可扩展网络分组数据块的有效数据段, 各个一级字段内部的不同数据对象再被递归地装载到各个一级字段对应可扩展网络分组数据块的有效数据段. 在网络演进过程中, 网络分组的某些字段一定程度上会维持长时间不变, 网络的演进也应该基于某些特性和字段长时间的稳定性来实现. 可扩展的 MIN 分组的一级字段应该包括目的标识区、数据签名区、只读数据区和可变数据区 4 大部分. 网络分组转发过程中使用的标识 (目的标识), 同样被编码成一个可扩展的网络分组结构的数据块, 按网络用户希望的顺序装载到目的标识区中.

定义7 (原始标识) 网络分组中携带的第一个标识 (离网络包头部最近的标识).

一个网络分组的标识区可以存放多个标识用于标识回退, 但只能有一个标识表达网络分组发

出的意图, 这个标识被称为原始标识. 而除了原始标识以外, 网络分组中额外携带的标识都称为候选标识. 本文约定, 原始标识是网络分组目的标识区字段的第一个标识, 标识在标识区字段的位置越靠前, 其优先级越高, 越有可能被使用来确定网络分组的处理流程.

3 多标识网络的标识扩展机制设计

3.1 标识扩展机制基本设计思想和原则

针对网络演进这一问题, 本文基于 MIN 提出标识扩展机制, 利用 MIN 的标识互译的想法, 依赖新型网络分组中携带旧网络标识的方法, 并结合新型网络标识回退到旧网络标识的基本思想, 提出了 4 项基于网络标识语义相似性的网络协议互通的基本原则.

原则 1. 网络分组格式必须是统一的, 即新旧路由器都能解析网络分组的部分字段.

原则 2. 网络分组的结构是可扩展的, 即网络分组的字段类型、字段长度都可以变化.

原则 3. 路由器可以尝试使用多个目的地址 (标识) 来转发网络包.

原则 4. 多标识网络中必须存在统一的基础标识. 任何新型网络分组只要携带了这种基础标识, 就能够在旧网络设备中进行寻址和转发 (标识回退). 而考虑到 MIN 中所有的设备都具有身份标识, 且身份标识的语义符合基础标识的语义, 因此选择身份标识作为 MIN 在演进过程中的回退基点. 整个网络都必须支持身份标识, 所以网络中的所有设备都处在身份标识空间中.

3.2 多标识管理系统的标识扩展相关功能

在 MIN 中, MIS 为网络中的设备提供多方参与共管共治的分布式标识注册、身份信息绑定、管理和标识解析服务. 网络中的用户需要在网络中生成唯一的身份标识, 并将标识与其真实身份信息绑定, 网络中的用户可以通过用户的身份信息, 查询到网络的用户在进行网络通信时的网络标识.

标识扩展机制对 MIS 提出了新的需求. 标识扩展机制需要 MIS 负责管理和分配网络分组可扩展的网络分组编码格式中的数据块类型值. MIS 中记录一张已分配的数据块类型值的表, 并说明该值对应的数据对象. 当某个组织或机构想在网络中新增一种标识类型或网络分组字段时, 需要向 MIS 请求一个可扩展的网络分组的数据块类型值, 作为这种新型标识的数据块类型值. MIS 收到新增标识的数据块类型值请求, 会将一个未分配的数据块类型值分配给请求发出者.

在 MIN 的标识回退机制中, 网络分组需要携带同一个网络通信实体的多种标识, 以便于实现标识的回退. 同一通信实体的多种标识的来源是 MIS. MIS 负责将网络通信主体的多种标识绑定在一起, 当网络用户发出标识解析请求时, 可以将网络主体的标识集返回给用户. 一个网络实体名称对应一个记录, 记录内容有两大部分, 一部分是 MIS 原有的内容, 即网络实体所属用户的真实身份信息, 另一部分是多种标识的绑定记录.

MIS 除了记录多种标识之间的绑定关系之外, 还需要记录网络中所有标识类型两两之间的关系. 标识间的关系可以用一个有向图来描述, 其结构如图 3 所示. 标识间的双向箭头表示这两种标识可以相互回退, 原因是它们都具有相同的标识语义; 而单向箭头则表示箭头开始端的标识可以向箭头指向的标识回退, 即在语义上箭头指向的标识是箭头开始处标识的子集.

图 3 中展示了相关标识两两之间的距离. 在区分两种标识可否回退的基础上, 根据 2.3 小节中关于标识距离的定义, 本文使用两种标识语义的基数差来计算二者之间的距离. 例如: 层级化兴趣标识与平面化兴趣标识, 根据表 1, 虽然这两个标识的形态不同, 但却有相同的“兴趣标识”语义, 所以可互相回退, 又因为两者语义的基数都为 4, 所以相差为 0, 即距离为 0.

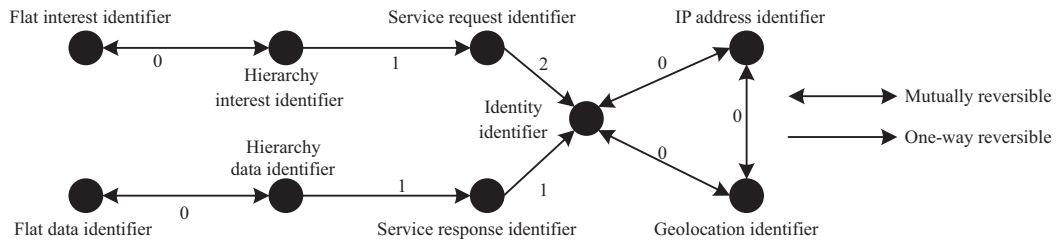


图 3 标识语义关系示例

Figure 3 Example of identifier semantic relationships

标识语义关系图在存储和传输时使用的格式是一个有序三元组的集合. 每个二元组形如 (101, 102, 0), 表示 101 号标识与 102 号标识之间存在一条有向边, 说明 101 号标识可以回退到 102 号标识, 并且他们之间的语义距离为 0. 一个完整的描述标识关系图的字符串形如 ((101, 102, 0), (102, 101, 0), (102, 103, 1), ...).

除此之外, MIS 中还应该保存网络中每种标识对应的语义集合. MIS 中应该保存一个网络路由器所有可能的操作表, 并基于操作类型表, 形成标识的语义信息表. 申请新型标识的用户可以在申请标识前, 向 MIS 请求这两张表的内容, 并利用这些信息判断新型标识与现存的哪种标识存在可回退的关系.

3.3 基于标识回退的标识扩展机制

标识回退的基本思想是在网络分组中携带多个目的标识, 从而使得网络分组在不同的网络标识空间转发时, 可以使用携带的候选标识转发. 在 MIN 中, 所有的数据分组都必须携带身份标识作为其中一个目的标识, 以保证该网络分组可以被网络中的所有设备转发. 在网络分组发出之前需要通过标识关系图选择与原始标识存在回退关系的标识作为网络分组的候选标识, 装入网络分组的目的标识区字段. 表现这种关系的标识关系图保存在 MIS 中.

本文现阶段在内容中心网络进行一对多通信且出现跨越多个标识空间的情况下, 仅利用基于语义距离的标识选择方案来选择候选标识, 而更合理的标识选择方案有待后续深入研究. 为解决标识选择的问题, 本文设计了一种标识空间探测协议, 该协议类似于 IP 网络架构中的 ICMP (Internet control message protocol) 协议, 其标识语义为 {在网络分组可变区记录标识种类, 查转发表, 转发分组}, 功能可概述为用户发送请求包, 探测标识空间内多标识路由器所支持的标识类型和支持每种标识的多标识路由器数量, 并且将该探测结果应答包返回给该用户. 候选标识的选择依据是标识空间探测机制得到的结果以及原始标识与候选标识在标识关系图中的路径距离. 选择某种类型的标识作为候选标识的概率具有以下两个原则: (a) 与标识在标识空间探测计数结果成正比. 该结果表示通信路径中支持某种标识的路由器个数, 计数越大, 说明某种标识在通信路径中使用机会越大, 该标识被选择作为候选标识的概率就越大. (b) 与原始标识和候选标识的语义距离成反比. 候选标识与原始标识的语义距离远, 说明在中间路由器中, 该候选标识与原始标识对应的路由器操作差异较大. 因此标识与原始标识的语义距离越远, 该种标识被选择作为候选标识的概率越小.

$$p_i = \begin{cases} \frac{\alpha c_i}{C} + \beta \left(1 - \frac{d_i}{D}\right), & D > 0, C > 0, \\ \frac{\alpha c_i}{C} + \beta, & D = 0, C > 0, \\ 0, & C = 0. \end{cases} \quad (2)$$

根据以上两个原则, 本文设计了一个将候选标识按优先级排序的算法, 其中候选标识的优先级按以上两个规则进行计算, 计算如式 (2) 所示. 其中 p_i 表示标识 i 的优先级, p_i 越大表示优先级越高, 标识 i 被选择用来作为候选标识的机率就越大; c_i 表示在通信双方通信路径上, 支持标识 i 的路由器数量; C 表示 c_i 的总和; d_i 表示在语义关系图中, 标识 i 与原始标识的语义距离; D 表示以原始标识为根结点, 从语义图中生成的多叉树的所有边的距离和; α 和 β 是两个重要性系数常量, 表示在计算优先级时两个选择候选标识原则的权重, 可以在实际通信过程中通过不断调参来设置两个适当的值. 在选择候选标识时, 执行流程如算法 1 所示. 该算法输入标识语义关系图, 标识探测协议返回的结果, α 和 β 值, 原始标识类型号, 以及用户标识列表; 输出按优先级排序好的候选标识列表.

算法 1 候选标识排序算法 (candidate identifiers sort algorithm)

Require: idSemanticMap, detectList, α , β , originalIdType, idList.

Ensure: A list of candidate identifier.

```

1: Choose candidate identifier;
2: Start from originalIdType generate idSemanticTree from idSemanticMap;
3: Int  $D$  = calculate the all path len in idSemanticTree;
4: Int  $C$  = 0;
5: for  $i = 0; i < \text{detectList.size}(); i ++$ ; do
6:    $C = C + \text{detectList}[i].\text{count}$ ;
7: end for
8: List(double, ID) candidateIdList;
9: for  $i = 0; i < \text{detectList.size}(); i ++$ ; do
10:   double  $p_i = 0$ ;
11:   if  $C == 0$  then
12:      $p_i = 0$ ;
13:   else if  $D == 0 \ \&\& \ C > 0$  then
14:      $p_i = \alpha * \text{detectList}[i].\text{count} / C + \beta$ ;
15:   else if  $D > 0 \ \&\& \ C > 0$  then
16:     int  $d_i = \text{detectList}[i].\text{idType path len in idSemanticTree}$ ;
17:      $p_i = \alpha * \text{detectList}[i].\text{count} / C + \beta * (1 - d_i / D)$ ;
18:   end if
19:   ID $_i$  = get id from idList, where id's type equal to detectList[i].idType;
20:   candidateIdList.add( $p_i$ , ID $_i$ );
21: end for
22: Sort candidateIdList by  $p_i$ ;
23: return candidateIdList.

```

MIN 中的多标识路由器组成 MIN 的数据平面. 为了保证标识扩展机制的正常运行, 多标识路由器需要具备两个功能, 一是支持标识空间探测机制; 二是能够处理网络分组中携带的候选标识, 此功能需要算法 1 所得结果作为输入内容, 其处理流程如算法 2 所示.

多标识路由器对多种标识的支持完全可以相互隔离, 在转发器的软件实现中, 可以使用多核处理器对携带不同标识的网络分组进行转发. 在并行的多标识路由器处理模型中, 对一个 MIN 分组的处理流程包含以下几个步骤:

- (1) 提取出 MIN 分组中的所有标识, 通过标识过滤器判断哪些标识是当前路由器支持的.
- (2) 不同的处理单元收到包处理任务后, 独立的完成对 MIN 包的处理并将结果汇总到决策单元.
- (3) 决策单元根据 MIN 分组中标识的先后顺序, 决定采用哪个处理单元的处理结果.

算法 2 路由器处理网络分组的算法 (packet processing algorithm)**Require:** Receive a packet.**Ensure:** Forward the packet to specific neighbor router or drop the packet.

```

1: Global: SupportIdTypeSet;
2: for  $i = 0; i < \text{packet.getIDNum}; i++$ ; do
3:   var id = packet.getID( $i$ );
4:   if id.type in SupportIdTypeSet then
5:     Process packet with id;
6:     if process return not error then
7:       End this process;
8:     end if
9:   end if
10: end for
11: Drop this packet.

```

4 系统实现与性能分析

本文通过大量实验对所提出的多标识网络标识扩展机制进行功能和性能测试。仿真实验在 ndnSIM-2.8 仿真平台进行, 修改了 ndnSIM 源代码中的 ndn-cxx 网络开发库以及 NFD 网络转发器, 实现对多种标识转发与标识回退机制的支持。为了让实验结果更可靠, 本文还在真实网络环境下的网络测试床中对标识扩展机制的功能和性能进行测试与评估。该测试床由多个单位合作构建, 其中包括北京大学深圳研究生院、中国联通深圳公司、华南理工大学、香港科技大学、香港中文大学、澳门科技大学、深圳广电集团城市联合网络电视台、鹏城实验室、南凌科技有限公司、深圳智慧城市集团等 10 所大学和单位。

4.1 标识扩展机制的模拟仿真实验

首先, 本文设计了基于 ndnSIM 的实验, 用于验证本文提出的标识扩展机制在标识形态和语义扩展方面的可行性。实验拓扑如图 4 所示, 假设网络中有两个标识空间, 标识空间 A 和标识空间 B。其中标识空间 A 表示单纯的身份标识空间, 只支持身份标识的标识语义 (处理流程), 而标识空间 B 则只支持内容中心网络通信语义, 即支持前文提到的内容兴趣标识和内容数据标识的标识语义。实验拓扑图中, 两个标识空间 B 被一个标识空间 A 分割开, 实验的目的是测试两个标识空间 B 中的实体能否使用内容兴趣标识和内容数据标识相互通信。实验结果显示, R2, R3, R6, R4, R5, R8, R10, R11 路径上数据流正常出现, 这说明本实验成功实现了两个相同标识空间的通信实体跨越了不支持该网络分组的标识空间进行相互通信。此外, 该实验在原有标识 101 的基础上, 扩展出了新型的网络标识 102 和标识 103, 且标识 102, 103 与标识 101 的形态和语义相差比较大。这进一步验证了标识扩展机制在标识形态和语义扩展上的可行性。

4.2 标识扩展机制在现网测试床环境的实验

其次, 本文搭建了真实网络环境下的测试床, 并实现了部署在服务器上支持支持多种标识的转发处理和标识扩展机制的软件转发器。网络拓扑如图 5 所示。选用了现网环境下的 7 个地点, 包括北京大学深圳研究生院 4 台服务器、澳门科技大学 3 台服务器、香港中文大学 3 台服务器、香港科技大学 3 台服务器、联通提供的云服务器 3 台、华南理工大学 3 台服务器, 以及深圳城市联合网络电视台提供的服务器 4 台。这些服务器在各个学校和单位内部的服务器之间可以直接使用物理网线传输链

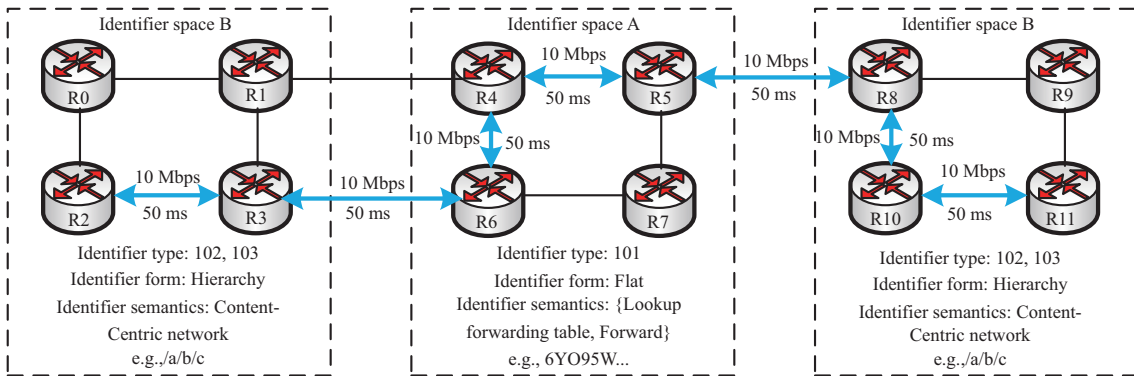


图 4 (网络版彩图) 多标识网络的标识扩展机制在仿真环境下的测试

Figure 4 (Color online) Test of identifier extension mechanism for MIN in a simulation environment

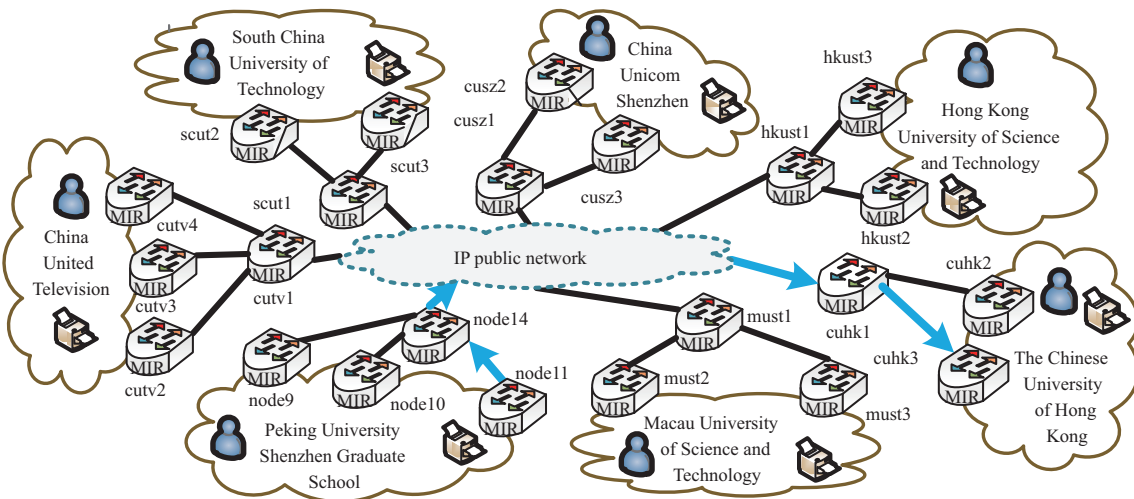


图 5 (网络版彩图) 多标识网络的标识扩展机制在真实网络拓扑下的测试

Figure 5 (Color online) Test of identifier extension mechanism for MIN in real network topology

路层帧, 使用以太网帧来传输多标识网络分组. 学校与学校之间的网络则使用覆盖的方式通信, 即将多标识网络分组装载在 IP 网络协议上传输. 两个子网之间的多标识网络通信使用 TCP 协议传输多标识网络层分组, 例如北大深圳研究生院的 node14 使用 TCP 协议向华南理工大学的 scut1 发送多标识网络分组.

在具体的实验环境配置中, 假设每个边缘路由器接入 10000 个用户, 则该拓扑图中的 16 个边缘路由器共接入了 160000 个用户. 假设不使用网络分域, 则图中的 node14, must1, cuhk1, hkust1, cusz1, scut1 和 cutv1 这 7 个节点上都会有 160000 个身份标识. 本实验从北京大学深圳研究生院的 node9 节点上发出网络包, 并在每个单位内部选择一台服务器来接收网络包, 选择用于收包的服务器分别是 cuhk2, cusz2, scut2 和 cutv2 这 4 台服务器. 本实验主要是对不同通信方式下的通信时延进行测试和评估, 用于考查在真实网络环境下, 标识扩展机制对网络传输时延的影响.

图 6 展示了从北京大学深圳研究生院发出网络分组, 并选择 6 个地点作为网络分组接收点, 在不同传输方式下的传输时延, 即网络分组从发出到网络分组被收到的时间间隔. 其中“RTT/2”表示从北

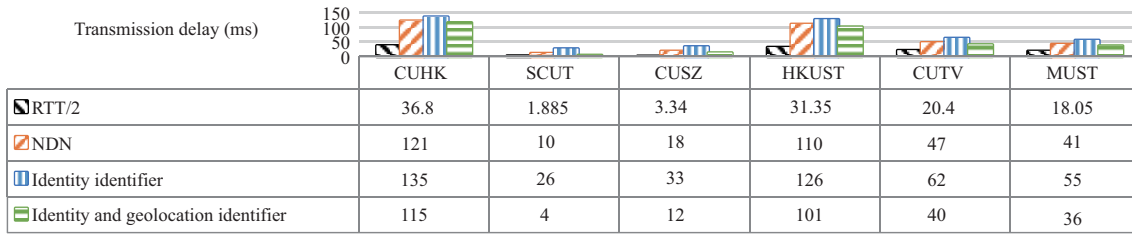


图 6 (网络版彩图) 标识扩展机制在真实网络拓扑中的传输时延测试结果

Figure 6 (Color online) Transmission delay of identifier extension mechanism in real network topology

表 3 各单位内部服务器的地理位置标识

Table 3 Geolocation identifiers of internal servers of each organization

Unit	Longitude	Latitude	Geolocation identifier
Peking University Shenzhen Graduate School	113.981956	22.598999	(113.981956, 22.598999)
Macau University of Science and Technology	113.57686	22.154114	(113.57686, 22.154114)
The Chinese University of Hong Kong	114.218747	22.422997	(114.218747, 22.422997)
China Unicom Shenzhen Tongle Server Room	114.319353	22.718355	(114.319353, 22.718355)
South China University of Technology	113.411783	23.054803	(113.411783, 23.054803)
The Hong Kong University of Science and Technology	114.277227	22.342057	(114.277227, 22.342057)
China United Television	114.078271	22.54745	(114.078271, 22.54745)

京大学深圳研究生院通过 ping 命令发出 IP 包, 通过返回的应答测试得到链路 RTT 值, 取该值的一半作为该路径传输时延的基准值; “NDN” 表示单纯使用未修改的 NDN 软件转发器传输方式将一个兴趣包发送到目的地; “身份标识” 表示使用修改后的软件转发器, 使用线性表搜索法转发携带身份标识的多标识网络分组; “身份 + 地理位置” 表示将网络拓扑图中的 node14, must1, cuhk1, hkust1, cusz1, scut1 和 cutv1 这 7 个节点设置为仅支持地理位置标识, 而其他服务器则支持身份标识的处理与转发. 当使用地理位置标识时, 由于网络拓扑跨度较大, 因此本实验直接使用服务器所在的地理位置经纬度作为服务器的位置标识. 每个单位内部的服务器地理位置标识相同, 如表 3 所示.

从图 6 展示的测试结果可以看到 IP 网络由于直接使用硬件转发, 且网络包格式固定, 网络分组的编解码消耗的时间比较短, 因此传输的总时延最低. 使用软件转发器转发网络分组和使用可扩展网络分组编码结构的条件下, 使用身份标识与地理位置标识共同寻址的方式传输时延最低, 其次是 NDN 兴趣包的传输时延, 而时延最长的是单纯使用身份标识转发分组的方式. 影响传输时延的主要原因是路由器查找转发信息表的时间复杂度. 在使用单纯使用身份标识转发网络分组的情况下, 通信路径中有两个路由器的转发表大小为 160000, 且使用线性搜索的方法, 因此查表开销最大. 而在 NDN 转发方式中, 路由器中都只有一条路由, 但使用了哈希查找法, 而哈希算法的计算开销比使用地理位置标识计算欧氏距离的开销要大, 另一方面, NDN 兴趣包的转发过程中还涉及查找 PIT 表和 CS 表等操作, 因此 NDN 兴趣包转发的时延要比使用身份标识与地理位置标识结合的转发方式时延要长.

总之, 上述实验基于 IP 网络现网环境部署的网络测试床, 再次验证了标识扩展机制在实际网络部署中的可行性, 并说明多种标识相比单一标识在传输时延方面有明显的性能提升.

4.3 标识扩展机制对比分析

根据上文分析和实验验证, 我们在理论上对本文提出的多标识网络的标识扩展机制与 2.1 小节描

表 4 标识扩展机制与其他网络演进方案的对比

Table 4 Theoretical comparison between the identifier extension mechanism and other network evolution schemes

Scheme name	Identifier extension	Trotsky	MPLS	Plutarch	COIN	FII	XIA
Backward compatibility	√	√	×	√	√	×	√
Network packet structure evolutionary	√	√	√	√	×	√	×
Identifier interoperability	√	×	×	√	√	×	×
Unified identifier interoperability scheme	√	×	×	×	×	×	×
Identifier semantic richness	√	√	×	×	×	×	√
Identifier form richness	√	√	×	√	×	√	×
New identifier management system	√	×	×	×	×	×	×
Performance improvement	√	×	×	×	×	×	×
Candidate identifier selection scheme	√	×	×	×	×	×	×

表 5 标识扩展机制与其他方案的实验对比结果

Table 5 Experimental results of the identifier extension mechanism and other network evolution schemes

Test items	Identifier extension	XIA	Plutarch
Processing delay of a single network packet (ns)	2184	2220	2568
Extra data carried by a single network packet (byte)	20	28	0

述的其他 6 类典型方案进行对比, 结果如表 4 所示. 经理论分析, 本方案有诸多功能方面的优势, 例如提供统一的标识互通方案、引进新型标识管理系统、融合标识空间组网提升性能和候选标识选择方案等.

进一步, 通过实验验证对比本文提出的标识扩展机制和经典方案 (XIA, Plutarch 等) 的性能, 本文选用 UDP 协议接收并解析包格式, 在同一环境下通过几种不同的方案对网络包进行处理, 并对包处理的时间进行测量对比. 转发表大小为 100 万, 并且通过接收、解析、查表、处理并转发 100 万个网络包, 测量得到每个网络包的平均处理时延如表 5 所示. 标识扩展机制和 XIA 均基于携带身份标识的 NDN 兴趣包完成在身份标识空间的转发. 其中标识扩展机制以简单的顺序存储网络标识, XIA 的标识以 DAG 图的形式存储, 而 Plutarch 需要使用复杂的映射函数将兴趣包映射到身份标识包, 因此三者的包处理时间依次变长. 同样在该场景中, 本实验还分析了这几种方案为了实现一次网络协议转换在网络分组中额外占用的开销. 假设 NDN 名称长度占用为 40 字节, 身份标识为 20 字节, 则各方案额外传输的字节数开销如表 5 所示. 可以看到, Plutarch 产生的额外开销最小, 几乎为零, 这是由于 Plutarch 在路由器中对网络分组进行映射, 不需要携带额外的数据. 标识扩展机制与 XIA 同样是随包携带额外 20 字节的身份标识, 但 XIA 还需要为每个标识携带 4 字节的标识回退边, 因此开销大于标识扩展机制.

5 总结与展望

本文依托多标识网络体系, 提出了一种通用的分组网络寻址路由与标识演进及扩展方案, 并通过软件仿真和真实网络环境下搭建的网络测试床对所提方案的性能进行了大量验证与评估. 从实验结果来看, 本文所提机制与现有的网络演进方案相比, 在网络可演进性、网络协议互通性、标识管理, 以及新旧标识互译等方面存在显著优势. 此外, 还为网络架构的可演进性提供了一种新的解决方案, 具有

一定的理论研究贡献、工程实践意义, 以及实用前景. 在未来的工作中, 会对标识语义, 即路由器对网络分组的操作, 包括如何划分一个操作、操作是否重复、划分操作的粒度, 以及操作的先后顺序对标识语义的影响等问题, 进行深入研究.

参考文献

- 1 Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, et al. Networking named content. In: Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, 2009. 1–12
- 2 Zhang L, Afanasyev A, Burke J, et al. Named data networking. SIGCOMM Comput Commun Rev, 2014, 44: 66–73
- 3 Ashraf S, Muhammad D, Aslam Z. Analyzing challenging aspects of IPv6 over IPv4. Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika, 2020, 6: 54–67
- 4 Nour B, Mastorakis S, Ullah R, et al. Information-centric networking in wireless environments: security risks and challenges. IEEE Wireless Commun, 2021, 28: 121–127
- 5 Andersen D, Balakrishnan H, Kaashoek F, et al. Resilient overlay networks. In: Proceedings of the 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles, 2001. 131–145
- 6 Ratnasamy S, Shenker S, McCanne S. Towards an evolvable Internet architecture. In: Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, 2005. 313–324
- 7 Jimenez J G, Cervero A G. Overview and challenges of overlay networks: a survey. Int J Comput Sci Eng Surv, 2011, 2: 19–37
- 8 Ridwan M A, Radzi N A M, Ahmad W S H M W, et al. Recent trends in MPLS networks: technologies, applications and challenges. IET Commun, 2020, 14: 177–185
- 9 Tennenhouse D L, Wetherall D J. Towards an active network architecture. In: Proceedings of DARPA Active Networks Conference and Exposition, 2002. 2–15
- 10 Anderson T, Birman K, Broberg R, et al. The NEBULA future Internet architecture. In: Proceedings of the Future Internet Assembly, 2013. 16–26
- 11 Crowcroft J, Hand S, Mortier R, et al. Plutarch: an argument for network pluralism. SIGCOMM Comput Commun Rev, 2003, 33: 258–266
- 12 Jahanian M, Chen J, Ramakrishnan K K. Managing the evolution to future internet architectures and seamless interoperation. In: Proceedings of the 29th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), 2020. 1–11
- 13 Naylor D, Mukerjee M K, Agyapong P, et al. XIA: architecting a more trustworthy and evolvable internet. SIGCOMM Comput Commun Rev, 2014, 44: 50–57
- 14 Sambasivan R R, Tran-Lam D, Akella A, et al. Bootstrapping evolvability for inter-domain routing with D-BGP. In: Proceedings of Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication, 2017. 474–487
- 15 Rouskas G N, Baldine I, Calvert K, et al. ChoiceNet: network innovation through choice. In: Proceedings of the 17th International Conference on Optical Networking Design and Modeling (ONDM), 2013. 1–6
- 16 Koponen T, Shenker S, Balakrishnan H, et al. Architecting for innovation. SIGCOMM Comput Commun Rev, 2011, 41: 24–36
- 17 Ghodsi A, Shenker S, Koponen T, et al. Intelligent design enables architectural evolution. In: Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, 2011. 1–6
- 18 Raghavan B, Casado M, Koponen T, et al. Software-defined internet architecture: decoupling architecture from infrastructure. In: Proceedings of the 11th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, 2012. 43–48
- 19 Zhang X P, Liu Z H, Zhao Y J, et al. Scalable router. J Softw, 2008, 19: 1452–1464 [张小平, 刘振华, 赵有健, 等. 可扩展路由器. 软件学报, 2008, 19: 1452–1464]
- 20 Su W, Liu Q, Zhang H K. Architecture and key technologies of identifier-based universal networks. Zte Tech J, 2011, 17: 1–4 [苏伟, 刘琪, 张宏科. 一体化标识网络体系及关键技术. 中兴通讯技术, 2011, 17: 1–4]
- 21 Lan J L, Cheng D N, Hu Y X. Research on reconfigurable information communication basal network architecture. J Commun, 2014, 35: 128–139 [兰巨龙, 程东年, 胡宇翔. 可重构信息通信基础网络体系研究. 通信学报, 2014, 35: 128–139]
- 22 Li H, Wu J X, Xing K X, et al. Prototype and testing report of a multi-identifier system for reconfigurable network

- architecture under co-governing. *Sci Sin Inform*, 2019, 49: 1186–1204 [李挥, 鄂江兴, 邢凯轩, 等. 多边共管的多模态网络标识域名生成管理解析原型系统. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 1186–1204]
- 23 Li H, Yang X. Co-governed Sovereignty Network: Legal Basis and Its Prototype & Applications with MIN Architecture. Berlin: Springer, 2021
 - 24 Li H, Wu J, Yang X, et al. MIN: co-governing multi-identifier network architecture and its prototype on operator's network. *IEEE Access*, 2020, 8: 36569–36581
 - 25 Li K, Li H, Hou H, et al. Proof of vote: a high-performance consensus protocol based on vote mechanism & consortium blockchain. In: *Proceedings of the 19th International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC)*, 2017. 466–473
 - 26 Tariq A, Rehman R A, Kim B S. Forwarding strategies in NDN-based wireless networks: a survey. *IEEE Commun Surv Tut*, 2019, 22: 68–95
 - 27 Cvetkovski A, Crovella M. Hyperbolic embedding and routing for dynamic graphs. In: *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2009. 1647–1655

Method and system for general packet network addressing routing and identifier evolution

Hui LI^{1,3*}, Jiangxing WU², Guohua WEI¹, Xiangzhen MENG¹, He BAI¹, Lihong LIN¹, Xin YANG¹, Peng YI², Zebin ZONG⁴, Jinwu WEI⁵, Fusheng ZHU⁶, Yiqin LU⁷, Wai Ho MOW⁸, Raymond W. YEUNG⁹, Zefeng ZHENG¹⁰, Junfeng MA¹¹, Minglong ZHANG¹², Peter Han Joo CHONG¹², Xiaoli CHU¹³, Pin-Han HO¹⁴ & Zehua WANG¹⁵

1. Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China;
2. National Digital Switching System Engineering and Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China;
3. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China;
4. China Telecom Corporation Limited, Beijing 100033, China;
5. China United Network Communications Limited, Beijing 100032, China;
6. Guangdong Communications & Networks Institute, Guangzhou 510289, China;
7. School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China;
8. Department of Electronics and Computer Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China;
9. Department of Information Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China;
10. Faculty of Information Technology, Macau University of Science and Technology, Macao, China;
11. The China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China;
12. Department of Electrical and Electronic Engineering, Auckland University of Technology, Auckland 1142, New Zealand;
13. Department of Electronic and Electrical Engineering, The University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, UK;
14. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, Waterloo N2L 3G1, Canada;
15. Department of Electrical and Computer Engineering, The University of British Columbia, Vancouver V6T 1Z2, Canada

* Corresponding author. E-mail: lih64@pkusz.edu.cn

Abstract Future network communication demands are dynamic and diverse, requiring a flexible and scalable network layer. Thus, investigating the network evolution is of great importance. Multi-identifier network (MIN) has emerged to provide a novel network layer with rich functions as a highly compatible network architecture. However, the current design of network evolution in the MIN is still in a preliminary stage. In this work, a network evolution scheme is proposed based on the identifier extension for the MIN. This scheme defines the formal description of the network identifier space. Meanwhile, a priority-based sorting algorithm is designed for candidate identifiers in an identifier fallback mechanism. Additionally, a novel routing and forwarding protocol is designed to support identifier extension. Extensive experiments are performed both on the ndnSIM simulator and MIN testbed, revealing the effectiveness and superiority of the proposed scheme, albeit with a slight performance loss.

Keywords multi-identifier network, identifiers extension, network evolution, prototype system, the ndnSIM simulation