

面向多样化服务定制的多态路由机制研究

胡宇翔, 董芳, 王鹏, 兰巨龙

(国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 如何基于有限且确定的路由结构来支持多样化服务是当前研究面临的问题, 采用路由结构的自组织和自调节来实现路由与业务的“自适应”, 提出一种面向多样化服务定制的多态路由机制。该机制通过自适应网络路由结构的基本“微内核”, 实现到个性化定制寻址路由结构的派生与重载, 使网络具有动态适应多样化业务的路由服务功能, 并且支持多样网络寻址与路由的多模多态共存。

关键词: 寻址与路由; 多态; 基态; 结构自适应

中图分类号: TP393.08

文献标识码: A

Research on polymorphic routing mechanism for customized diversified services

HU Yu-xiang, DONG Fang, WANG Peng, LAN Ju-long

(National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: How to provide diversified routing services for various applications based on limited and constant network resources has become the urgent challenge. Based on the network self-organization and self-adjustment researches on the adaptive matching between routing and application was made, and a polymorphic routing model for customized diversified services was provided. By adaptive self-matching of basic macro-core of the network routing architecture the derivation and inheritance of customized addressing and routing mechanisms could be realized. Then the network to self-adjust for various routing services was dynamical, and therefore the co-existence of multiple modes and multiple morphologies of routing and addressing mechanisms was allowed.

Key words: addressing and routing; polymorphic; base state; adaptive structure self-matching

1 引言

随着 IP 网络业务形态的不断丰富, 业务对网络的需求越来越多样和多变, 而 IP 网络的路由服务能力却是有限的和确定的, 这就导致了业务需求与网络固有路由能力之间的差距日益扩大, 从而使网络难以支持多样化的业务。与此同时, 信息网络所依赖的寻址和路由结构过于简单且长期不变。大量实践证明, 现有信息基础网络路由结构或者基于其进行的各种

修修补补都难以满足多样化业务对泛在、互联、质量、融合、异构等信息网络的高等级需求。

信息通信网络的寻址和路由结构决定了其所有的特征以及所能提供的路由服务能力。从网络路由结构与运行机制的角度来看, 依据“结构决定功能”的物理法则, 面对这些高等级需求, 重新设计网络路由体系结构、模型与协议, 直接增强网络基础寻址和路由能力便成为解决上述问题的一个关键切入点和突破口^[1]。国内外关于新型路由技术的

收稿日期: 2014-01-20; 修回日期: 2014-08-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2012CB315901, 2013CB329104); 国家自然科学基金资助项目(61309019, 61372121); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2015AA016102); 中兴通讯产学研合作课题基金资助项目

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB315901, 2013CB329104); The National Natural Science Foundation of China (61309019, 61372121); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2015AA016102); The ZTE Research and Development Fund

研究方兴未艾，但整体上来看这些研究仍处于百家争鸣的初级阶段，尤其是对于支持多样化业务的新颖路由理论研究还是初步的。现有研究思路多从不同侧面对支持多样化业务的新颖路由结构进行了积极的研究和探索，如基于身份和位置分离的路由机制^[2, 3]、基于内容的路由机制^[4, 5]、面向服务提供的路由机制^[6]等着力解决现有互联网的异构、安全性、服务提供、可扩展性、移动性等诸多问题，并取得了丰富的研究成果。

在国外的相关研究中，美国加州大学在2002年首先提出了互联网间接访问基础架构(I3)^[7]。在此基础上，麻省理工学院的H. Balakrishnan^[8]提出了互联网分层命名结构(LNAI)。同时，思科系统网络技术有限公司在互联网研究任务组路由工作组提出了位置与标识分离协议(LISP)^[9]，解决了路由的可扩展性问题并最大限度地考虑了网络的演进性。爱立信公司不断完善主机标识协议HIP^[10]相关技术体系，并在IETF和IRTF分别成立HIP工作组及研究组进行HIP相关的研究和标准化工作。在2010年美国的未来互联网体系结构国家项目FIA计划中，NDN项目^[11]旨在开发一个“名字数据网络”的架构，建立以用户和应用所关心的具体内容为中心的内容创建、分发和传递的体系模型；XIA项目^[12]旨在建立一个更安全的表达性互联网架构；MobilityFirst项目^[13]将节点移动作为节点的常态行为处理，使用通用的容延网络技术(GDTN)增强网络的顽健性和可信性；NEBULA项目^[14]通过由高速、高可靠和安全的骨干网络连接数据中心来提供面向云计算的数据仓库和计算资源。国内的相关研究主要集中在真实源地址验证和标识与地址分离等方面。清华大学提出了面向互联网的源地址验证模型与架构SAVA^[15]，通过接入层、域内和域间不同的方法与机制来保证源地址的真实性；北京交通大学提出了标识与地址分离为核心思想的一体化路由与交换理论^[16]。在路由交换的基础理论研究方面，香港中文大学和北京大学在代数编码理论应用于交换结构与多播路由方面开拓了一个新型研究方向，并取得了突破性进展，针对未来视频业务所占比重越来越大的新型网络提供了一种多播路由^[17]的理论依据。从目前的研究趋势看，地址与身份分离寻址结构以及内容路由是未来的发展趋势，前者可彻底解耦地址前缀对应关系，从机理上彻底解决移动性以及域间路由地址前缀劫持等安全问题；而

后者可有效匹配未来网络以内容为中心的主流业务模式，为多播和多路径路由提供重要支撑。

上述研究分别从不同面对支持多样化业务的新颖路由结构进行了积极的研究和探索。然而，如何基于网络有限的、确定的路由服务能力来支持多样网络体系共存时网络业务形态的不断丰富及其需求的多样化和多变性已成为新颖路由结构研究亟待解决的问题。解决该问题需要从信息网络路由结构方面探索网络按照业务需求动态进行路由结构重组、功能重构的机理与方法^[18]，通过网络路由结构的自组织、功能的自调节和业务的自适应来最大程度地弥合网络路由服务能力与业务需求之间的时变鸿沟^[19]，支持多种网络体制并存的网络寻址及路由，使网络能有效适配多变的业务需求。

在此背景下，本文从提升网络路由服务能力的角度出发，针对IP网络的网络层路由功能单一问题，同时为了支持后续仍然不断出现的新应用，使网络具有动态调整适应多样化业务的路由服务功能，提出一种支持多样网络体系和寻址方式共存情形下的新颖路由模型——“多态路由模型”。该模型包括基态层和多态层结构，基态层定义了网络寻址路由功能的“微内核”，是网络多样化寻址路由的基本要素和功能能力集合。多态层则通过个性化定制呈现出功能特定、安全特定和服务质量特定等多模态特性，是满足具体应用各种约束属性的路由服务实例。模型通过参数化定义配置网络基态层基本“微内核”，实现到个性化定制的多态寻址路由派生与重载，从而使网络基础互联传输能力和路由服务能力得以动态增强，并且支持网络寻址与路由的多模多态共存。

2 基态与多态路由建模

鉴于信息网络应用服务需求的多样性，本文对现实应用中多样、多变的路由服务进行抽象归纳，对路由寻址过程进行功能分解，将其分解为功能相对独立、接口清晰明确的基本单元，具体包括：寻址结构、认证方式、加密算法、通信主体标识、链路状态参数计算、路由算法等。通过对上述基本元素和能力集合的组合优化，继而形成具有针对特定业务的满足具体业务服务质量和网络动态行为特征等要求的路由协议。

基于这种考虑，本文将信息网络路由结构分为基态和多态两层，如图1所示。基态层实现基本路由功能，是具备满足所有功能、安全、服务质量等需求的

路由单元的集合。从满足业务要求角度看,要求基态层呈现出功能特定、安全特定、服务质量特定等多模态特性即为多态。对于具体路由机制,具有同类功能或者性能(或安全、多播等)要求的一组业务流,通过确保其性能要求的特定路由形态予以承载,称其为功能或者性能(或安全、多播等)特定的多态路由。这样,多态层就包含了各种模态的多态路由机制。具体来说,多态路由(PR, polymorphic routing)是基于多样化应用的业务特征要求和网络动态行为驱动构建的,基于基态路由(BR, base state routing)模型进行实例特化以满足具体应用所需的各种约束属性服务路径的路由机制。

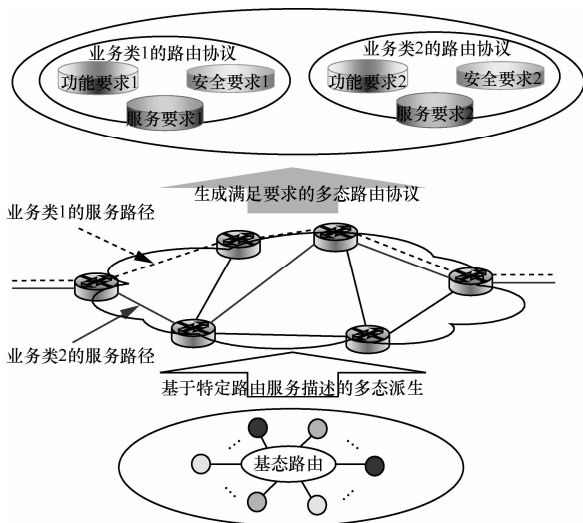


图1 基态与多态路由建模

上述过程中,路由计算过程由网络认知功能得到的网络视图和应用要求决定,其中网络视图不仅包含网络的稳态拓扑信息,还包含网络资源的瞬态能力,比如链路利用率多少、节点处理能力大小等;应用要求主要是由用户(或业务)提出端到端的具体传送指标,如时延、分组丢失率或者安全要求。多态路由计算结果为满足应用要求的服务路径。服务路径建立后,路径传送能力继续受认知功能的监测。若不能满足应用需求或达到路由调整的约束条件,则执行新一轮多态路由计算。

在此,定义BR中多样化寻址路由的基本要素和功能能力集合如下

$$BR = \begin{bmatrix} x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,z} \\ x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,z} \\ \dots \\ x_{y,1}, x_{y,2}, \dots, x_{y,z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, y, z 分别为BR的类别参数和特征参数。BR矩阵中任意元素具有唯一性和不可替代性,是功能相对独立、接口清晰明确的基本路由单元。那么由基态到多态的个性化定制呈现出功能特定、安全特定、服务质量特定等过程即可描述为

$$PR = ABRB^T \quad (2)$$

其中, A 为类别选择参数向量, B 为特征选择参数向量, A 和 B 可分别表示为

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_y] \quad (3)$$

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_z] \quad (4)$$

定义所有可行的多态实例集合为 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 即有

$$x_i = [a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,y}] \begin{bmatrix} x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,z} \\ x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,z} \\ \dots \\ x_{y,1}, x_{y,2}, \dots, x_{y,z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{i,1} \\ b_{i,2} \\ \dots \\ b_{i,z} \end{bmatrix}, 1 \leq i \leq n \quad (5)$$

综上,上述过程可以描述为对Y维线性空间V中基底进行线性组合的过程。基于基态路由空间中基本元素和能力集合的完备性及线性无关性考虑,BR是线性空间V的Y维向量空间的一组基。考虑到矩阵基的线性无关性,BR具有以下性质。

性质1 设 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_y$ 是Y维线性空间V的一个基底,则对于任意 $\alpha \in V$, 可以唯一表示为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_y$ 的线性组合。

证明 由定义知

$$\alpha_t = [x_{t,1}, x_{t,2}, \dots, x_{t,z}], 1 \leq t \leq y \quad (6)$$

设

$$\alpha = p_1 \alpha_1 + p_2 \alpha_2 + \dots + p_y \alpha_y \quad (7)$$

若还有

$$\alpha = p'_1 \alpha_1 + p'_2 \alpha_2 + \dots + p'_y \alpha_y \quad (8)$$

由式(7)和式(8)相减即可得

$$(p_1 - p'_1) \alpha_1 + (p_2 - p'_2) \alpha_2 + \dots + (p_y - p'_y) \alpha_y = 0 \quad (9)$$

因为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_y$ 具有线性无关性,则式(9)不能成立,因此不存在式(8),于是式(7)具有唯一性,得证。

由上述性质可以得到如下推论。

推论1 由基态路由BR可以派生出任何线性

空间内的多态路由 **PR** 实例。

推论 1 从矩阵论中基的线性无关性角度证明了由基态路由派生出任何线性空间内多态路由 **PR** 实例的可行性。

在此，为了对应用需求进行表征，本文引入路由服务描述 (RSD, routing service description) 概念。路由服务描述是在路由服务需求命名基础上对路由服务的进一步描述，分为安全描述、性能描述和功能描述。对于 RSD，安全描述信息包括安全等级 d^{SL} 和安全种类 d^C ；性能信息包括优先级要求 d^P 、带宽要求 d^B 、时延要求 d^D 和分组丢失要求 d^L ；功能描述包括通信模式 d^M 、路由类型 d^T 、路由标识 d^I 和通信主体 d^H 。

于是每个 x_i 的属性用向量表述为

$$D_i = (d_i^{SL}, d_i^C, d_i^P, d_i^B, d_i^D, d_i^L, d_i^M, d_i^T, d_i^I, d_i^H), 1 \leq i \leq n \quad (10)$$

定义属性空间

$$\Omega = \{SL, C, Q, B, D, L, M, T, I, H\} \quad (11)$$

则对于任意需求的 RSD，其属性向量为

$$RSD = \{D_{RSD}^j \mid j \in \Omega\} \quad (12)$$

因此，由基态路由到满足具体 RSD 多态路由派生过程就可描述为

$$PR = \{x_k \mid d_{k,j} \in D_{RSD}^j, j \in \Omega\} \quad (13)$$

3 多态派生机制

多态派生是业务在请求路由服务时提出的具体路由服务描述，并由网络根据路由服务描述动态地生成相应多态路由协议的过程。因此，在多态派生过程需要考虑两点：1) 路由服务规格描述的完备性和准确性；2) 给定服务请求时路由服务组合的正确性。

针对以上两点考虑，多态派生机制工作原理如图 2 所示，其中虚箭头为控制信令流程，实箭头为数据流传输流程。业务在生成具体路由服务描述后，将其服务规格请求发送至多态派生引擎，由该引擎完成相应的服务规格验证以及相应的语义映射，并将该业务的 RSD 分别依据其具体属性要求映射为满足需求的服务列表。在此，路由服务列表的选取是基于本地资源感知与管理的基础上完成的。之后，多态派生引擎对服务列表进行满足具体语义要求的选择并按照基本规则进行服务组合，从而生成具体的多态路由协议。

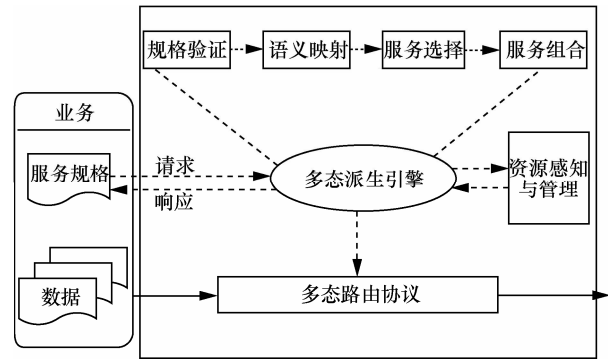


图 2 多态派生机制工作原理

多态路由模型的功能结构采用“管理面—控制面—数据面”结构。其中，管理面负责多态路由的决策，控制面负责多态路由的建立，数据面负责实现具体的数据转发功能。三平面相互之间通过信息交互协同实现多态路由的功能。

管理面功能主要由控制服务器实现。管理面功能一方面负责感知、维护和更新整个网络状态，收集节点信息，作为多态寻址和路由的依据；另一方面实现标识的分配与管理，包括位置标识、主机标识、服务标识和内容标识，并据此实现对特定通信主体的认知，即确定通信对端的标识类型，从而作为控制层标识判断的依据。管理面是多态路由结构中的核心层与管理中枢，对整个网络路由状态进行智能监视与管理。

控制面是网络路由结构功能的执行者，负责管理面多态路由命令与通告的各种具体措施和动作。一方面，控制面通过感知面获取的网络状态信息计算节点路由由表项，并依据网络状态的变化更新维护路由表项，为数据传输提供路径指导。另一方面，控制面还依据管理面的通信主体认知结果，执行多态路由协议来对标识类型进行判别，实现多态路由决策的具体方法与步骤。

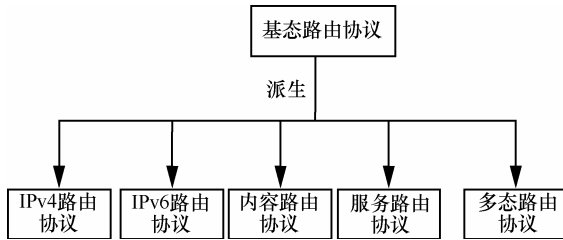
数据面主要负责数据的路由转发，基于多样化的寻址方式完成按需动态资源配置，实现多态路由与寻址形态的灵活配置。该层面具体实现了多态路由功能，在数据传输过程中具备分组分类器、分组处理单元等功能，针对具备特定标识的流进行相应的处理，以达到保障数据流传输需求的目的。

4 多态路由协议体系

4.1 多态路由协议体系框架

随着网络应用的多样化发展，网络的通信主体亦呈现多样化趋势。为了支持多样化通信主体，本

节在此讨论基于基态/多态派生模型的多态路由协议 (PRP, polymorphic routing protocol) 体系。多样化业务特征要求和网络动态行为驱动的多态路由协议主要解决多种网络体制并存的网络寻址及路由问题, 其详细结构如图 3 所示。



多态路由协议是基于基态协议生成的具有多种运行形态的协议, 既可表示为通过基态协议特化的不同协议体系, 也可以表示为一种协议体系的多个运行态。在该体系下, 基态协议重点考虑 IPv4/IPv6、NDN 等多态体系协议的路由兼容和特化。在传统 TCP/IP 网络中, IP 地址既用于位置标识又用作端点的身份标识, 这种双重身份不仅限制了网络移动性, 也带来一些安全问题, 基态

协议的设计应集成内嵌的标识与地址分离解决方案。此外, 随着业务需求逐渐由关注通信转变为关注数据内容和服务, 新的基态协议必须能够有效支持面向数据内容、应用服务以及其他新型网络结构的寻址与路由。

多态路由协议体系运行的具体过程如下: 路由器节点根据网络状态和资源认知获取网络拓扑连接关系和业务传输要求, 以网络当前的资源状态和业务的路线服务描述作为约束条件, 运行多态路由算法并在路由器节点上建立转发信息表。多个相邻的路由器节点通过转发信息表的下一跳节点连接形成一条满足特定需求的全网服务路径, 图 4 给出了多态路由协议体系下一条受安全约束的路由和一条受服务质量约束的路由建立实例。

在上述多态协议体系下, 通过由基态到多态的派生可将网络功能和行为根据用户需求进行动态改变, 或根据要求在不同协议体系间或相同协议体系不同运行形态间进行切换。通过由基态到多态的派生机制可为不同协议体系形成针对多种服务的传输服务网络, 为多样化服务共存情形下的隔离及资源调配提供基础。

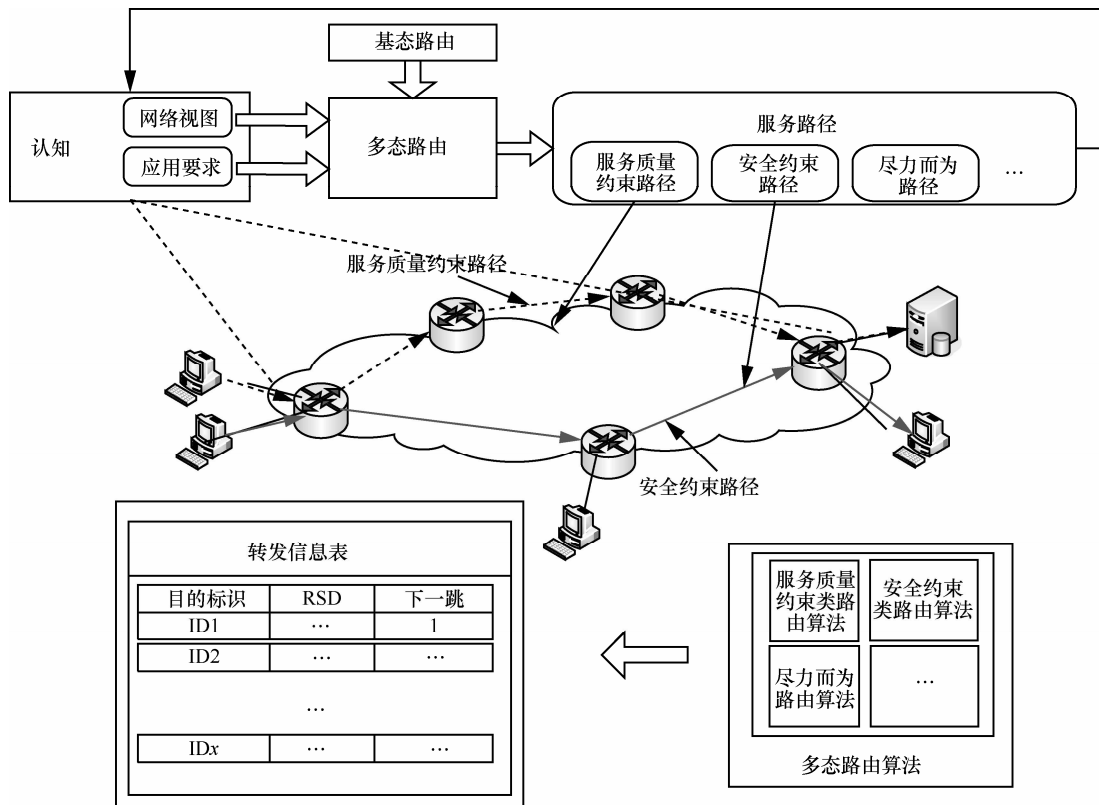


图 4 多态路由协议体系运行原理

4.2 多态路由协议的标识结构

多态路由是基于统一化标识结构定义的特定寻址方式，多态路由协议体系支持的多样化寻址方式包括基于位置的路由、基于身份的路由、基于内容的路由和基于服务的路由共 4 种常态寻址方式，并支持新型寻址方式的快速定义。

1) 位置标识 (LID)，用于以位置为中心的寻址，对应于传统 IP 体系下的寻址。

2) 主机标识 (HID)，用于以主机为中心的寻址。将主机作为网络通信的主体，与主机交互、获取内容或服务都是通过 HID 来达到通信目的，只是获取内容或者服务的最终目的都隐藏在以主机为瘦腰结构的分组数据负荷中，只有到达主机后，将分组内容交付上层应用进程，才能获取通信的真正意向。

3) 服务标识 (SID)，用于以服务为中心的寻址，是一种直接表达通信意向的手段，消除了从服务名称到网络层地址的转换冗余，直接以服务标识作为网络寻址的依据。在该方式下，SID 作为基本的通信主体。

4) 内容标识 (CID)，用于以内容为中心的寻址，主要应用为内容获取类。将内容作为网络通信的主体，在路由节点引入缓存功能，通过 CID 来达到通信目的，满足面向数据内容的寻址。

多态寻址 (polymorphic addressing) 是对统一网络分组格式进行特化，进而生成具有多种运行形态的寻址方案，即由统一分组格式派生出 4 种寻址标识下的特定分组格式，生成可用于数据传输的 4 种具体的分组头部。基态与多态地址派生机制的详细过程如图 5 所示。

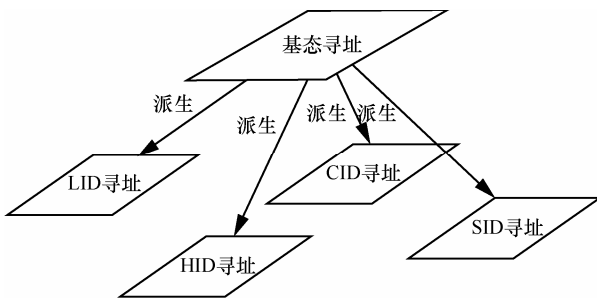


图 5 基态及多态地址派生机制

标识结构定义借鉴 IPv6 地址采用结构化方式，定义统一格式的基态寻址方式，包括类型前缀 (type) 和标识数值 (value) 两部分，并依据统一格式可特化出包括位置、主机、服务和内容在内的

4 种标识。多态路由体系的标识空间 128 bit 的分配方法参考 IPv6 的地址格式，分为类型前缀和标识的其他部分，其中类型前缀给出了标识的类型，剩余部分给出具体的标识值。为实现与 IPv6 的兼容性，HID、SID 和 CID 几种标识使用了 IPv6 中预留的字段，类型前缀分别为 010、011、100，其他类型前缀的标识空间都作为 LID，如表 1 所示。IPv6 的其他保留空间仍可支持新标识类型的扩展，如 00000001。

表 1 标识空间分配方案

地址类型前缀	地址类型
010	HID
011	SID
100	CID
除 010、011、100 之外的其他值	LID (IPv6)

4 种标识的具体格式如图 6 所示。

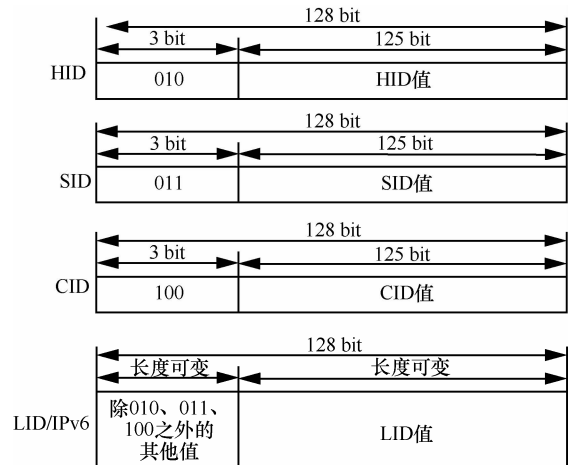


图 6 4 种标识的具体格式

5 多态路由协议体系运行原理

5.1 通信主体发布与路由通告

多态路由协议体系结构仍具有域内和域间 2 种基本形式，分别在域内和域间网络运行域内多态路由协议和域间多态路由协议，动态地为各种业务和应用建立满足其路由服务描述 RSD 的服务路径。

对于多态路由协议体系中通信主体的发布，当主机或服务器新加入网络时，首先向其接入路由器通告本身的节点属性和标识名字。若作为通信主机，则将预先向域内的标识分配与管理服务器申请的 HID 发布给网络；若作为服务提供者，则将预先

申请的 SID 发布；若作为内容提供者，则发布自身的 CID。然后接入路由器将收到的通告消息转发给其他邻居节点，建立域内统一的拓扑状态。最后所有路由器节点根据域内或域间路由算法计算到达新加入节点的最优路径，在对应的路由表中建立针对新加入节点的条目。

域内路由节点负责域内各种标识路由的计算和通告。LID、HID、SID 和 CID 的路由计算和通告过程相同，但是各种标识的路由计算和通告基于的全网拓扑结构可能不同。在路由通告分组的头部中采用不同的路由标识字段来区分不同标识的路由通告信息。因此，域内路由的计算和通告与传统路由相比更加复杂和频繁。在进行域内路由计算时，不仅要考虑最短路径优先的原则，还要根据服务要求和安全等级构建路由。在进行路由通告时，可重构路由器不仅要通告自身的链路状态信息，还要通告自身所能提供的服务能力和安全等级，便于动态地为不同服务类别和安全等级的业务和应用建立满足其要求的服务路径。

域间路由节点负责交换和维护域间路由信息。域间协议交换路由信息的节点数量级是自治域系统数的量级，这要比自治域内的网络数少很多。要在自治域之间寻找一条满足服务要求和安全等级的服务路径，就是寻找满足要求的域间路由器。若 2 个邻居域间路由器分属 2 个不同的自治域，而其中一个域间路由器和另一个域间路由器定期地交换路由信息和服务属性，需要一个协商的过程。一开始进行协商时，首先发送打开分组，如果对方接受，就激活分组进行响应。这样，2 个域间路由器的邻居关系就建立起来了。为了维持邻居关系，双方还需要周期性地交换保活分组。域间路由器更新路由时，必须向邻居发送更新分组，更新分组内容不仅包括网络状态信息还包括本身所能提供的服务能力和安全级别，用于其他的域间路由器建立不同服务种类和安全等级的域间服务路径。

5.2 路由节点表项维护

为支持现有网络通信中的多种寻址方式共存，路由器节点需要维护 4 种转发信息表（FIB, forwarding information base）。该转发信息表具有可伸缩性，当有新的通信主体出现时，需要添加新的对应表项，4 种 FIB 如下。

1) 位置转发信息表（LFIB）。记录到达特定位置（IP 地址）的转发信息，LFIB 等同于传统网络

的转发信息表。

2) 主机转发信息表（HFIB）。记录到达特定主机 HID 的转发信息，该表规模由网络中的主机数确定。

3) 服务转发信息表（SFIB）。记录到达特定服务 SID 的转发信息，该表规模由网络中提供的服务数确定。

4) 内容转发信息表（CFIB）。记录到达特定内容 CID 的转发信息，该表规模由网络中发布的内容条目确定。

节点内转发信息表结构定义如图 7 所示。路由节点内部转发信息表维护操作为：在收到待转发的数据分组后，在头部信息中查找目的标识类型，查找对应的转发信息表。根据具体标识，在转发信息表中执行查表操作。若有匹配表项时，按照下一跳端口输出；若匹配失败，则基于网络默认配置策略执行相应操作，如启动路径搜索、直接丢弃等。

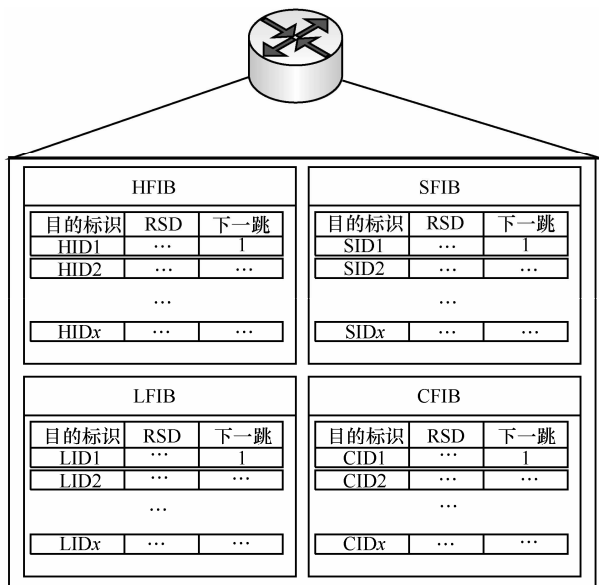


图 7 节点内转发信息表

5.3 多态路由协议的运行实例

面向多样化服务的多态路由协议基于统一的寻址格式，可演化出满足多种业务类通信主体的寻址与路由模式，如表 2 所示。内容通信类业务和位置通信类业务的多态路由协议与现有网络体系下的内容寻址路由方式和 IP 寻址路由方式一致，本文在此不再描述。下面分别围绕服务通信类业务和主机通信类业务，对多态路由协议的运行实例进行说明。

表 2 寻址与路由模式

通信业务类型	源端	目的端	数据类型
服务通信	主机 HID	服务提供者 SID	请求服务
	服务提供者 SID	主机 HID	服务应答
内容通信	主机 HID	内容提供者 CID	请求内容
	内容提供者 CID	主机 HID	内容应答
主机通信	主机 HID	主机 HID	身份通信
位置通信	主机 LID	主机 LID	位置通信

1) 服务通信类业务

服务通信类业务主要指的是服务需求者向服务提供者发送服务请求，获取服务提供者服务后将数据反馈给服务需求者。通信过程是双向的，如图 8 所示。

网络主机以 SID1 作为目的标识，本机标识 HID1 作为源标识，向网络中发送服务请求数据分组；路由器 RR1 根据标识 Type 值进行 ID 判别，查找服务转发信息表 SFIB，在对应表项中匹配 SID1 的 value 值，对应下一跳端口为 2，则将数据分组交付到转发平面进行转发；中间节点执行相应的 ID 判别和查表操作，将数据分组交付到目的服务器 SID1。

服务器提供者收到服务请求后，对请求数据进行对应操作，如内容搜索或者数据压缩等，产生响应数据分组。以 HID1 作为目的标识，服务标识 SID1 作

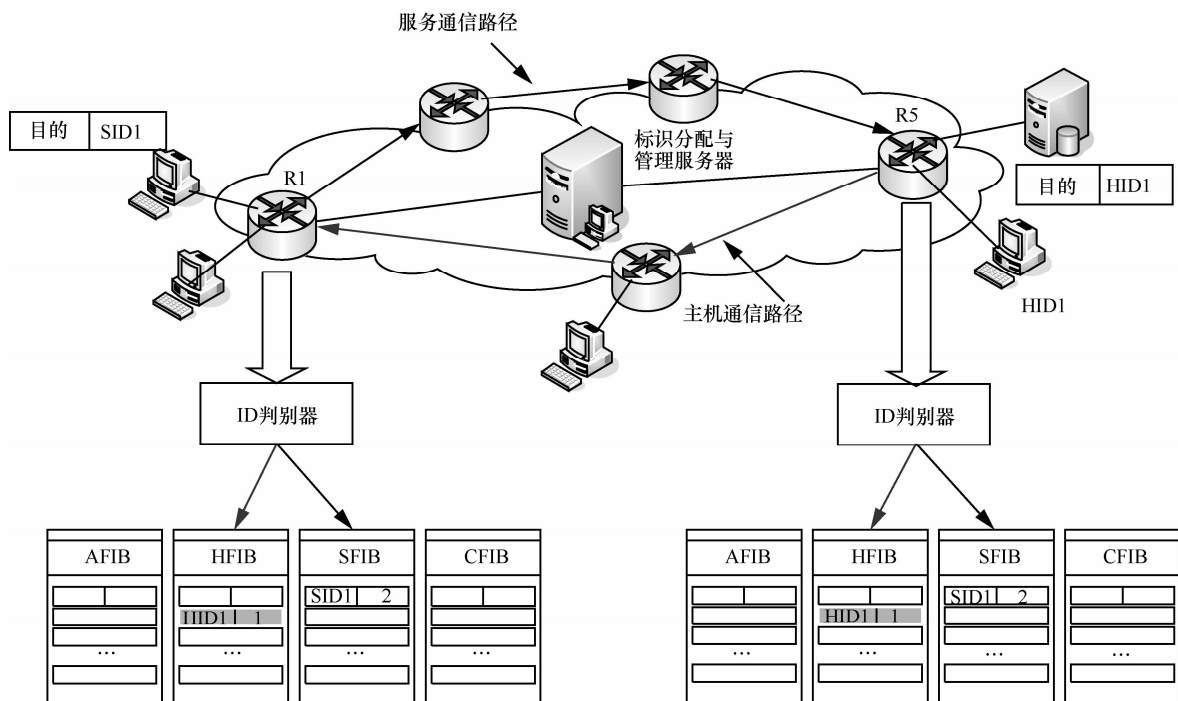


图 8 服务通信类业务路由运行实例

为源标识，向网络中发送服务响应数据分组；路由器 R5 根据标识 type 值进行 ID 判别，查找主机转发信息表 HFIB，在对应表项中匹配 HID1 的 value 值，对应下一跳端口为 1，则将数据分组交付到转发平面进行转发；中间节点执行相应的 ID 判别和查表操作，将数据分组交付到目的主机 HID1，通信终止。

2) 主机通信类业务

主机通信类业务主要指的是 Host to Host 的通信方式，通信主体关注的是特定主机，源节点主动向接收者发送数据。通信过程是单向的，以数据成功接收为通信目的。工作原理如图 9 所示。

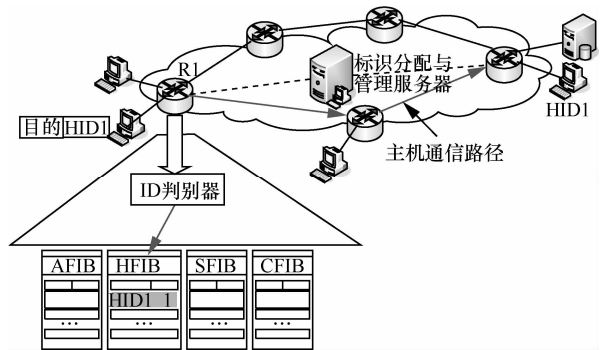


图 9 主机通信类业务路由运行实例

网络主机以 HID1 作为目的标识，本机标识作为源标识，向网络中发送主机通信数据分组；路由器 R1 根据标识 type 值进行 ID 判别，查找主机转发信

息表 HFIB，在对应表项中匹配 HID1 的 value 值，对应下一跳端口为 1，则将数据分组交付到转发平面进行转发；中间节点执行相应的 ID 判别和查表操作，将数据分组交付到目的主机 HID1。通信终止。

6 仿真实验

为了验证多态路由机制的有效性和可行性，本节从支持内容高效传输、服务迁移和移动性 3 个方面对多态路由机制进行评估，并对其可扩展性进行分析。实验环境采用具有 14 个节点共 21 条链路的美国科学基金骨干网络 (NSFNET) 作为网络拓扑结构，如图 10 所示。拓扑中每条边上的数字代表相邻节点实际的物理距离。仿真时，链路带宽设置为 100 Mbit/s，链路时延为 10 ms，路由根据节点之间的距离计算最优路径。

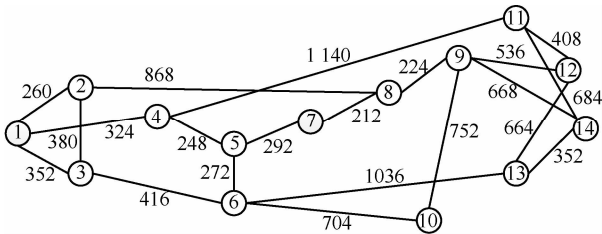


图 10 美国科学基金骨干网络拓扑结构

通过多态路由派生机制实现对多种网络体系结构和多样业务需求的支持，可以提升业务性能和方便业务部署。虽然定量地衡量多态路由机制对各种业务的支持是比较困难的，但是通过性能评估证明了多态路由机制在保持当前网络优良特性的同时也具有其他新型网络体系结构的优点^[20-22]。同时，多态路由机制支持多种通信主体的灵活寻址和路由，能够简化网络应用的设计，支持网络演进和提升网络应用的性能。

6.1 内容传输仿真实验

为了验证多态路由机制的内容传输和分发性能，本文采用如图 10 所示的网络拓扑中节点 1 作为客户端进行内容请求，节点 14 作为内容服务器负责提供内容，然后分别对采用 OSPF 协议的传统网络路由机制和多态路由机制进行单次内容传输时延和网络平均传输时延的实验验证。

图 11 给出了传统网络和多态路由机制单次内容传输时延性能的对比情况。在传统网络中，客户端请求内容时首先要请求提供内容的 Web 服务，得到 Web 服务的响应以后再通过 Web 服务获取所请

求的内容，从图 11 中左半部分可以看出，这一过程耗时 125 ms。而多态路由机制支持直接以内容名称作为通信主体的寻址和路由机制，客户端可以不通过 Web 服务直接进行内容请求，大大缩短了内容请求的时延，但在内容请求的过程中需要进行标识与位置之间的转换，标识与位置之间的转换采用基于 chord 的映射解析机制，内容标识的数量为 1 000 个。因此，多态路由机制中单次内容请求的时延相比于左半部分当前网络 62.5 ms 的服务请求时延略有增加，达到 95.8 ms。

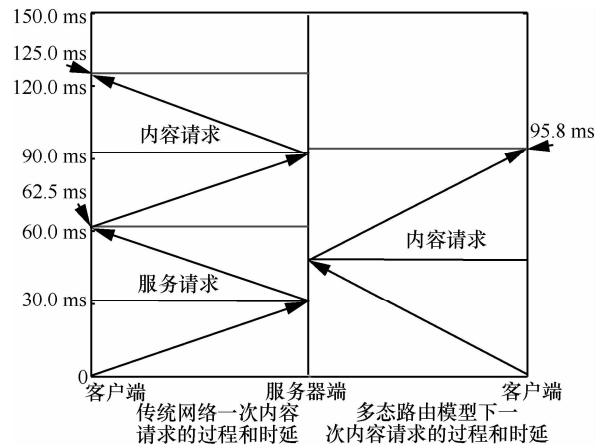


图 11 单次内容传输时延性能示意

图 12 给出了相同网络拓扑结构下传统网络和多态路由机制的平均网络传输时延性能的对比情况。仿真采用如图 10 所示的网络拓扑结构，节点 14 作为内容服务节点，其他 13 个节点作为普通的内容请求节点，内容请求节点的请求分组满足泊松到达特性，平均发送速率为每秒 10 个分组，内容服务节点共有 1 000 个内容，用户请求的内容 (chunk) 序号为 1~1 000，每个 chunk 为 1 024 byte，内容请求行为服从 Zipf 分布，即 80% 的内容请求与 20% 的内容相关，仿真时间为 30 s。多态路由机制节点内嵌缓存功能，支持内容副本的缓存，仿真时节点最多能缓存 100 个内容，缓存替换策略为 LRU(least recently used) 替换。从图 12 中可以看出，由于传统网络节点不具有内容缓存功能，在大量相同内容请求和传输的情况下，网络的平均传输时延一直保持在 43.5 ms 左右，没有明显降低。而多态路由机制由于内嵌了内容缓存功能，在大量相同内容请求和传输的情况下，网络的平均传输时延明显下降并一直保持在 34 ms 左右，网络的平均传输时延性能相比于传统网络提升了 25% 左右。

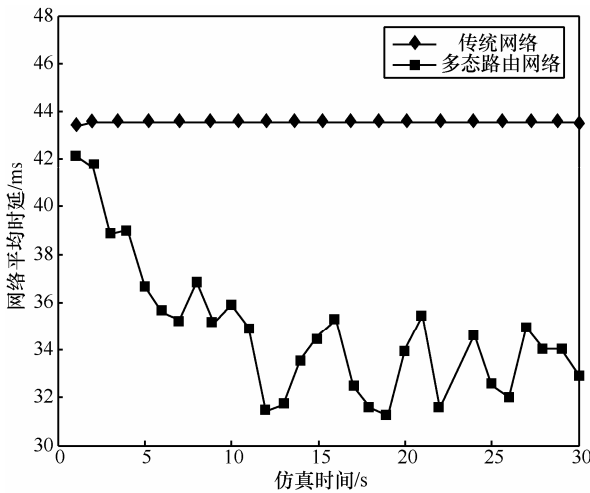


图 12 平均网络传输时延性能对比

6.2 服务迁移性能仿真实验

为了评估多态路由机制对服务迁移的支持性能，本文在如图 10 所示的网络拓扑结构中以节点 1 作为服务请求者，节点 14 作为服务提供者。从某一时刻起，该服务开始从节点 14 迁移到节点 12，在此过程中评估多态路由机制的服务迁移支持性能。图 13 给出了服务迁移过程的不同时间点记录。从图中可以看出，服务客户端一直持续请求服务，服务提供者响应服务请求。服务迁移开始时，节点 14 正常响应服务请求，同时底层的迁移机制开始将部分状态迁移到节点 12。当大部分状态已迁移到节点 12 时，需要冻结该服务以完成最后的状态迁移。如图 13 所示，从 100 ms 开始进入服务冻结期，一直持续到 392 ms 处时完成整个服务迁移，这段时间服务请求无法得到响应，需要缓存请求数据分组等到迁移完成以后重定向到新的服务提供节点。服务

迁移到新的节点以后，可以响应缓存的请求数据分组，但无法收到新的服务请求。这是因为服务迁移以后需要更新服务转发信息表，而响应服务使用的是主机转发信息表。这段时间的服务请求可以通过多态路由模型的回退寻址机制回退到主机寻址机制完成服务请求。服务转发信息表更新完成以后，服务请求者和响应者基于更新后的服务转发信息表进行服务请求和响应。

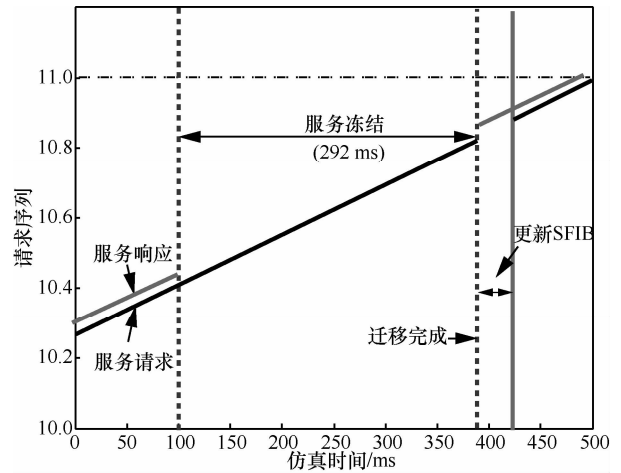


图 13 服务迁移性能分析

6.3 移动性仿真实验

多态路由模型另外一个重要的优点是支持移动性并且移动切换时延较低。本节从分域内移动切换时延和域间移动切换时延 2 种情况进行评估。如图 14(a)所示，域内移动切换过程由 3 个步骤组成：1) 新的 TR (tunnel router) 节点检测到移动节点 MN，检测时延为 T_r ；2) TR1 向域内标识管理与分配服务器 MS1 发送标识与位置映射信息更新消息，

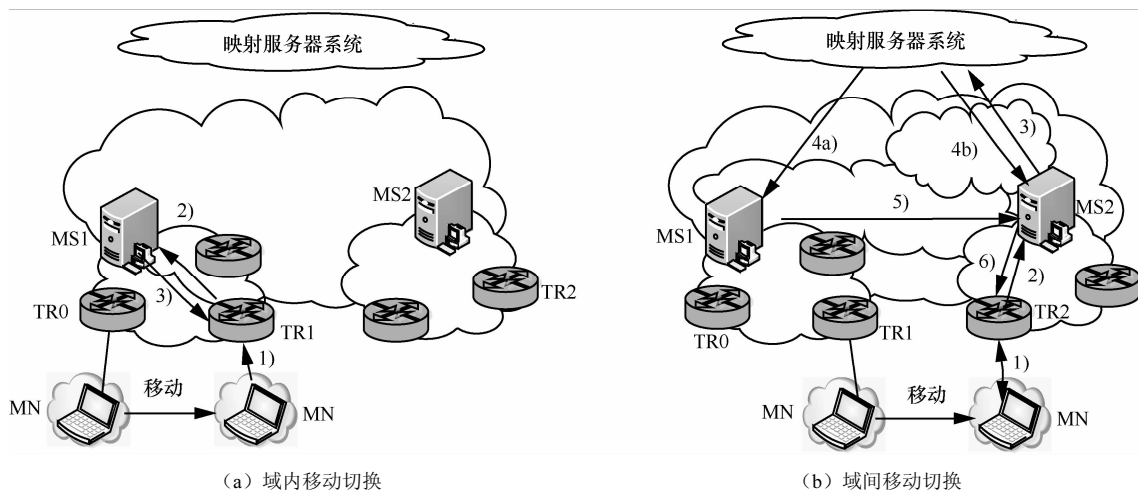


图 14 移动切换过程

传输时延为 T_u ; 3) MS1 返回更新完成消息, 传输时延为 T_u 。所以, 整个域内移动切换时延可以表示为

$$T_{HO}^1 = T_r + T_u + T_u = T_r + 2T_u \quad (14)$$

如图 14(b)所示, 域间移动切换过程由 6 个步骤组成: 1) 新的 TR 节点检测到移动节点 MN, 检测时延为 T_r ; 2) TR2 向域内标识管理与分配服务器 MS2 发送标识与位置映射信息更新消息, 传输时延为 T_u ; 3) MS2 向映射系统发送标识与服务器的更新消息, 传输时延为 T_u ; 4) 映射系统向 MS1 和 MS2 分别发送更新响应消息, 传输时延为 T_u ; 5) MS1 向 MS2 发送标识与位置映射更新响应消息, 传输时延为 T_x ; 6) MS1 向 TR2 发送更新完成消息, 传输时延为 T_u 。所以, 整个域间移动切换时延可以表示为

$$T_{HO}^2 = T_r + 2T_u + T_x + 2T_u = T_r + T_x + 4T_u \quad (15)$$

图 15 给出了当 $T_r=30$ ms 和 $T_x=120$ ms 时的域内和域间移动切换时延随 T_u 变化的过程。因为 TR 检测移动节点的时间间隔很小, MN 节点移动到新的 TR 以后, 可以很快地被检测到, 因此, T_r 设置为 30 ms。 T_x 作为域间服务器之间的传输时延, 完成信息交互可能要跨越多个路由节点, 因此, T_x 设置为 120 ms。从图 15 中可以看出, T_u 在 1~100 ms 之间变化时, 域内移动切换的时延保持在 30~200 ms 之间, 切换时延相当小; 而域间移动切换也能在 200~600 ms 之间完成, 切换时延也相对较小。

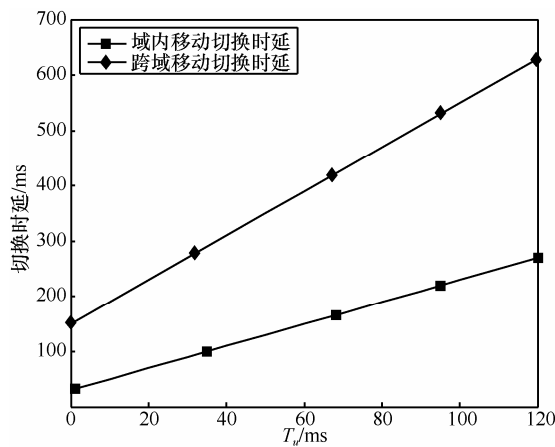


图 15 移动切换时延性能

7 结束语

本文从提升网络路由服务能力的角度出发, 提出一种新型路由模型——“多态路由模型”, 该模型通过定义网络路由的基本“微内核”构建基态模

型, 基于基态模型实现到个性化定制的多态寻址路由机制以构建多态模型, 从而使网络路由服务能力得以动态增强, 并且支持网络的多模多态共存, 使网络路由服务能力得以动态增强, 从而为构建一个支持目前业务和未来新业务的不同服务质量需求, 功能灵活扩展, 满足泛在互联、融合异构、可信可管可扩需求, 支持现有网络兼容演进和适于规模应用的新型路由方案提供一种解决途径。

然而, 由于资源的随机共享普遍存在于网络运行过程中, 要实现时变网络的资源提供与基于众多随机因素实现应用要求的“一致匹配”, 就使客观意义上的随机性、全局性和主观意义的确定性相互交织, 这种复杂性对于明确多态路由模型的内涵和运行机理带来了巨大挑战。在此, 本文对路由结构多态特性内涵的讨论和认识仍是初步的, 模型中的重要理论和关键机制如多态路由算法和协议交互流程设计仍需要进一步深入研究并开展相关的实验验证, 这也是作者下一步的工作。

参考文献:

- [1] 兰巨龙, 程东年, 胡宇翔. 可重构信息通信基础网络体系研究[J]. 通信学报, 2014, 35(1): 187-198.
LAN J L, CHENG D N, HU Y X. Research on reconfigurable information communication basal network architecture[J]. Journal on Communications, 2014, 35(1): 187-198.
- [2] VOGT C. Six/one router: a scalable and backwards compatible solution for provider-independent addressing[A]. ACM SIGCOMM MobiArch'08[C]. Seattle, 2008.13-18.
- [3] LUO H B, ZHANG H K, ZUKERMAN M. Decoupling the design of identifier-to-locator mapping services from identifiers[J]. Computer Networks, 2011, 55(4): 959-974.
- [4] CHENG Y, ALEX A, LAN W, *et al.* Adaptive forwarding in named data networking[J]. ACM Computer Communication Reviews, 2014, 42(3): 62-67.
- [5] TROSSEN D, SARELA M, SOLLINS K. Arguments for an information-centric internetworking architecture[J]. SIGCOMM Computer Communication Reviews, 2010, 40(2): 26-33.
- [6] SCHAHRAM D, REINHARD P, VADIM S, *et al.* Quality-aware service-oriented data integration: requirements, state of the art and open challenges[J]. ACM SIGMOD Record, 2012, 41(1): 11-19.
- [7] STOICA I, ADKINS D, ZHUANG S, *et al.* Internet indirection infrastructure[A]. Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications of ACM[C]. 2002.73-86.
- [8] BALAKRISHNAN H. A layered naming architecture for the Internet[A]. Proc of ACM SIGCOMM[C]. 2004.343-352.
- [9] FARINACCI D. Locator/ID Separation Protocol (LISP)[S]. Internet-draft, draft-farinacci-lisp-00.txt, 2007.
- [10] MOSKOWITZ R, NIKANDER P. RFC 4423: Host Identity Protocol (HIP) Architecture[S]. Internet Request for Comments, 2006.

- [11] HOQUE M, AMIN S O, ALYYAN A, *et al.* NLSR: named-data link state routing protocol[A]. The 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking[C]. 2013.15-20.
- [12] ANAND A, DOGAR F, HAN D, *et al.* XIA: an architecture for an evolvable and trustworthy internet[A]. The Tenth ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-X)[C]. Cambridge, 2011.
- [13] RAYCHAUDHURI D, NAGARAJA K, VENKATARAMANI A. MobilityFirst: a robust and trustworthy mobility-centric architecture for the future internet[J]. ACM Mobile Computing and Communications Review, 2012, 16(3): 2-13.
- [14] ANDERSON T, BIRMAIV K, BROBERG R, *et al.* The NEBULA future Internet architecture[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2013, 7858:16-26.
- [15] WU J, REN G, BI J, *et al.* A First-Hop Source Address Validation Solution for SAVA[S]. IETF Internet Draft, draft-wu-savasolution-firsthop-eap-00.txt, 2007.
- [16] LUO H B, QIN Y J, ZHANG H K. A DHT-based identifier-to-locator mapping approach for a scalable internet[J]. IEEE Trans Parallel Distrib Syst, 2009, 20(12): 1790-1802.
- [17] LI S Y R, SUN Q T. Network coding theory via commutative algebra[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2011, 56(1): 403-415.
- [18] HU Y X, LAN J L, WU J X. Providing personalized converged services based on flexible network reconfiguration[J]. Science China Information Sciences, 2011, 54(2): 334-347.
- [19] 程东年, 汪斌强, 王保进等. 网络结构自调整的柔性内涵初探[J]. 通信学报, 2012, 33(8): 214-222.
- CHENG D N, WANG B Q, WANG B J, *et al.* Preliminary study on the connotation of flexibility in dynamically reconfigurable networks[J]. Journal on Communications, 2012, 33(8): 214-222.
- [20] FREEDMAN M J, ARYE M, GOPALAN P, *et al.* Serval: an end-host stack for service-centric networking[A]. Proc of USENIX NSDI[C]. 2012.1-14.
- [21] JACOBSON V, SMETTERS D K, THORNTON J D, *et al.* Networking named content[A]. Proc of ACM CoNEXT[C]. 2009.1-6.
- [22] KOPONEN T, CHAWLA M, CHUN B G, *et al.* A data-oriented (and beyond) network architecture[A]. Proc of ACM SIGCOMM[C]. 2007.

作者简介:



胡宇翔 (1982-), 男, 河南周口人, 博士, 国家数字交换系统工程技术研究中心讲师, 主要研究方向为新型网络体系结构、路由与交换技术。



董芳 (1981-), 女, 河南开封人, 国家数字交换系统工程技术研究中心讲师, 主要研究方向为网络建模与性能分析。



王鹏 (1986-), 男, 河南周口人, 国家数字交换系统工程技术研究中心博士生, 主要研究方向为新型网络体系结构、路由与交换技术。



兰巨龙 (1962-), 男, 河北张北人, 国家数字交换系统工程技术研究中心总工程师、教授、博士生导师, 主要研究方向为新一代信息网络关键理论与技术。