



一种基于 ELM 预测的 NDN 移动性支持方法

曲桦¹, 李岩松², 赵季红^{1,3}, 赵东旭², 赵建龙²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 西安交通大学软件学院, 陕西 西安 710049;

3. 西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 命名数据网络 (NDN) 架构是信息中心网络思想指导下的新一代网络架构, 移动性支持方法是命名数据网络架构下的主要研究点。传统的生产者端移动性支持方法都采取事后应对的方式, 对消费者而言, 该方法无法保证切换过程的透明性。针对上述问题, 提出了一种基于 ELM 预测的移动性支持方法 PB, 该方法对原有前向转发表进行修改, 并增加了新的控制消息分组使得网络中相应节点可以针对预测算法的结果进行提前调整, 并且兴趣分组多播的方式使得无论何时发生切换, 生产者终端都能立即对兴趣分组进行响应, 同时方法针对预测可能失败的问题提供了快速恢复网络原有状态的方法。仿真实验表明, 本文提出的 PB 移动性支持方法相比于 RP 和 IP 移动性支持方法能显著降低切换时延, 减少因切换导致的分组丢失。

关键词: 命名数据网络; 移动性支持; ELM 预测; 切换时延; 分组丢失

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-801.2017329

A mobility support method based on ELM prediction for named data networking

QU Hua¹, LI Yansong², ZHAO Jihong^{1,3}, ZHAO Dongxu², ZHAO Jianlong²

1. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. School of Software Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

3. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunication, Xi'an 710061, China

Abstract: Named data networking (NDN) is a new generation network architecture under the guidance of information center network, and the mobility support method is the main research point in NDN. In the traditional way of the producer-side mobility support method, the post-response mode is adopted, which makes it impossible to realize the transparency of the switching process. A mobility support method called PB based on ELM prediction was proposed. In the method, the original forwarding interest base was modified and a new control message packet was added so that the corresponding node in the network could adjust the result of the prediction algorithm in advance, and the switch of the producer terminal could respond to the interest package at any time by means of interest packet multicast. At the same time, the method provided a way to quickly restore the original state of the network for the problem that the prediction may fail. The simulation results show that the proposed PB mobility support method can reduce the handoff latency and the packet loss caused by handoff compared with the RP and IP mobility support methods.

Key words: named data networking, mobility support, extreme learning machine prediction, handoff latency, packet loss

收稿日期: 2017-06-21; 修回日期: 2017-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61371087, No.61531013)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61371087, No.61531013)



1 引言

随着社交网络、云存储、视频网站和数据类应用等的流行,网络呈现出以信息内容为中心的发展趋势。网络的使用已经偏离了现有网络当初的设计原则和设想,现有网络在安全性、移动性、可靠性、可用性、可扩展性等方面存在着极大的挑战^[1]。面对上述问题,命名数据网络(named data networking, NDN)^[2]应运而生,NDN 是一种能够满足用户信息传递需求的新体系架构,NDN 采用以内容为中心的通信方式。在 NDN 架构中,移动性是其核心思想之一,引起了研究者的广泛关注。

最初的 NDN 架构设计默认提供消费者端移动性的支持,但是,对于作为内容提供者的生产者端的移动性仍需要额外的策略进行支持。生产者端的移动性看似类似于 IP 网络下的移动性,实则不然。IP 网络下的终端移动性带来的问题是如何将数据传递给一个移动节点,而 NDN 的一个特点是“拉取式”的内容服务,即数据传输是由消费者发起的。NDN 中生产者端移动性带来的问题是如何从一个移动节点处获取内容。

参考文献[3,4]对 NDN 已有的移动性支持方法进行了很好的总结,为了解决生产者端移动性的问题,一个方向是利用中间节点 RV(rendezvous point)找出生产者端的位置。在这个方向中,兴趣分组被导向生产者端,这类似于 IP 网络中将数据导向移动用户,可以借鉴 IP 网络中解决移动性问题的方式。另一个方向是保证生产者端的内容更容易被找到,这个方向包括两种具体方案,其一是利用 NDN 以数据为中心的特点,所有数据都是被全局唯一命名的,这样就很容易使数据和它的原始生产者解耦,比如由移动节点提供的数据都被移动到一处固定的、容易被找到的位置;其二是对于生产者在给定位置生成的数据,可以使数据的名字固定并且独立于移动

终端,这样的数据命名使得消费者的兴趣分组能够被导向该位置。

本文提出的 PB 移动性支持方法,通过预配置网络,在生产者发生切换时消费者仍可以享受无缝的内容传输服务。PB 移动性支持方法中重构了网络架构中原有的转发表,设计了控制分组,从而实现对网络的预配置,设定了路由器针对不同类型控制分组的响应方式,并根据预测结果的成功与否对网络的预配置进行保存或恢复,本方法使得生产者的移动切换面向消费者透明。通过引入预测过程,本方法区别于已有移动性切换方法的事后调整策略,网络设备预配置在切换前与内容传输同步进行,以低带宽代价提升内容向用户的响应速度,降低因移动性切换带来内容响应的额外时延。

2 相关研究

NDN 中节点的移动性分为消费者端移动性和生产者端移动性。NDN 中节点缓存的存在使得消费者端的移动性可以得到很好的解决,当消费者向网内发送数据分组之后位置发生了移动,数据分组按照兴趣分组的转发路径进行回溯时不能在原有的边缘节点找到消费者,边缘节点就可以将内容缓存到节点上,消费者重新和网络取得连接后,只需要重新发送兴趣分组,节点就可以在缓存中将内容返回给用户,而不需要消费者重新到内容服务器获取内容。

人们对于移动性支持策略的研究专注于解决生产者端移动性的问题。解决生产者端移动性问题的关键所在是实现生产者生产的内容和生产者位置进行解耦合。内容根据独一无二的标识(identifier)进行区别,生产者的位置需要用定位器(locator)进行确定。根据已有方法将两者进行分离的程度,已有方法可以被划分为部分分离(partial separation, PS)方法和完全分离(total separation, TS)方法。在 PS 类方法中,移动生

生产者收发分组的路径中存在一个网关。此类方法使得内容标识和定位器在网关和移动生产者之间的传递路径上进行分离。而相应地,在TS类的方法中,存在一个独立的系统负责记录内容标识和位置之间的绑定关系。当需要寻找内容或者终端时,请求就首先被发送到独立系统中查询生产者的位置。然后兴趣分组带着内容的标识和生产者位置信息就可以依据最短路径被转发到相应的目的地。

参考文献[5,6]介绍了一种间接的移动性支持策略,首先链路层向生产者预告了切换的到来,生产者就向原间接点(indirection point, INP)发送注销(DE-registration)分组通知原接入点切换的到来。生产者重新连入网络后,它向新的间接点发送注册(registration)分组告知它的接入以及原接入点的位置信息。新接入点发送通知(notification)分组告知原接入点该生产者已经重新连入网络,然后接入点发送另一个通知分组给消费者通知它的新位置。间接点的方式缺点是显著增加了分组的封装和解析过程的开销,消费者的平均请求时延大大增加。

参考文献[7-10]都讲述了一类基于名字解析的移动性支持方法,管理和维护内容源当前的位置信息,例如:参考文献[7]的RP、参考文献[8,9]的DNS服务器以及参考文献[10]的HR。在该方法中,当内容源移动切换后,将向名字解析服务器发送位置更新消息,已更新该内容源位置的名字解析服务器可提供内容的名字与其当前位置信息之间的映射关系。若用户在预定时间内未取回之前请求的内容,将发送查询请求消息至名字解析服务器,查询可提供该内容的内容源的当前位置。随后,用户可依据回复消息重传兴趣消息至内容源移动前换后的位置。这种基于名字解析的方法采用极其被动的切换策略,从而带来极大的切换中断时延。

参考文献[11]提供了一种使用多播解决移动

性问题的方法。当生产者移动时,它的当前接入点(current point of attachment, C-POA)依靠链路层的帮助预测可能的接入点(potential point of attachment, P-POA)集合。C-POA根据消费者的需求和路由可拓展性的因素决定要发布前缀的长度,使得C-POA和所有P-POA都可以收到相应兴趣分组的多播副本,但是这种方法的路由开销很大。

参考文献[12]提供了一种基于路由更新的移动性支持方法。在切换过程中,生产者首先通知原接入点,若到来的兴趣分组的目的地是该生产者,则原接入点缓存该兴趣分组。当生产者重新连入网络后,会向它原接入点发送一个虚拟兴趣分组来触发新接入点和原接入点之间的节点更新它们的FIB表来正确转发兴趣分组。当原接入点收到虚拟兴趣分组之后,它把缓存的兴趣分组转发到生产者新的位置。由于方法中涉及缓存和转发,此方法会带来不小的切换时延和路由更新开销。

基于传统移动性支持方法的弊端,本文引入了ELM预测机制。极限学习机(extreme learning machine, ELM)是由黄广斌^[13]提出的求解单层神经网络的算法。极限学习机是一种前向神经网络,可用于特征学习、分类、聚类、回归等问题。由于其简洁的结构和较高的运算速度,同时可以避免结果陷入局部最优,近年来得到了较广的应用,并扩展到了复数域。ELM最大的特点是相对于传统的神经网络,尤其是单隐层前馈神经网络(single-hidden layer feedforward neural network, SLFN),在保证学习精度的前提下比传统的学习算法速度更快。基于ELM预测机制的PB移动性支持方法使得网络设备预配置在切换前与内容传输同步进行,提升了内容向用户的响应速度,降低了因移动性切换带来内容响应的额外时延。

3 PB 移动性支持方法

3.1 基于ELM算法的位置预测

如图1所示,为预测终端移动位置,首先获



取终端前 N 时刻位置坐标矩阵 (X_N, Y_N) ，接着将 (X_N, Y_N) 输入 ELM 网络预测第 $N+1$ 时刻终端的位置坐标 (X'_{N+1}, Y'_{N+1}) ，计算距 (X'_{N+1}, Y'_{N+1}) 最近的路由器 R ，判断是否切换并执行切换策略。下一时刻，获取终端第 $N+1$ 时刻实际位置坐标 (X_{N+1}, Y_{N+1}) ，将新位置 (X_{N+1}, Y_{N+1}) 加入位置坐标矩阵 (X_N, Y_N) ，使用新的位置坐标矩阵预测终端 $N+2$ 时刻的位置坐标。重复上述过程，持续预测终端位置坐标。

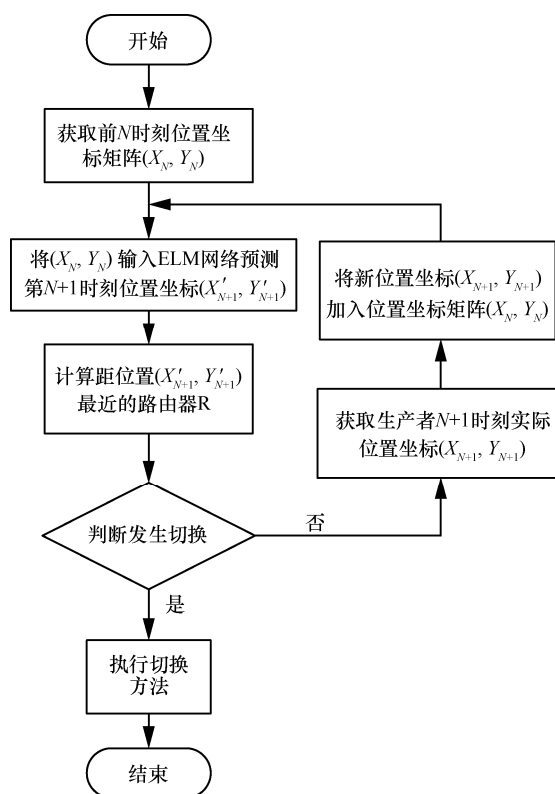


图1 使用 ELM 算法的位置预测流程

具体操作步骤如下。

步骤 1 采用等时间间隔方式获取终端的位置坐标。设定时间间隔 t ，对于某一终端，每隔时间 t 收集一次其位置坐标并存储，共存储 N 条终端位置坐标。记第 i 时刻终端位置坐标为 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, N$ ，其中， x_i 为横轴相对坐标或纬度坐标， y_i 为纵轴相对坐标或经度坐标，则 N 条位置坐标可记为：

$$X = \begin{bmatrix} x_1, y_1 \\ x_2, y_2 \\ \vdots \\ x_N, y_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

步骤 2 将坐标矩阵 X 作为 ELM 网络的输入，预测第 $N+1$ 时刻终端的位置坐标 X'_{N+1} 。

步骤 3 计算与该坐标距离最近的路由器 R 。

步骤 4 间隔时间 t 后计算新的终端坐标位置，并将此坐标加入位置坐标矩阵，使用更新后的矩阵预测下一时刻终端的位置坐标。重复步骤 2~步骤 4。

3.2 修改原 FIB 表结构

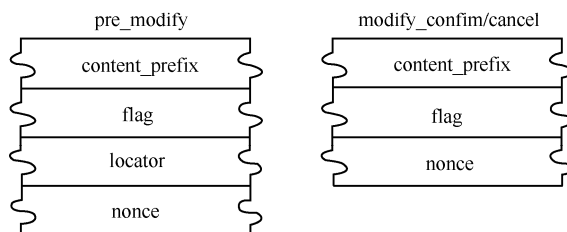
如图 2 (a) 所示，根据本文移动性支持方法的需求，本文对 NDN 架构下原有 FIB 表结构进行了修改。增加预修改端口 (pre_face) 表项，该表项用于临时存储路由器预配置需要修改的端口。预配置过程中，路由器将连接原接入点路由器方向的端口由特定内容前缀的 face_list 移至 pre_face 中，并在预测成功时从 FIB 表中删除；路由器将连接新接入点路由器方向的端口添加至特定内容前缀的 pre_face 中，并在预测成功时移至 face_list 中。特定内容指预测切换的生产者所提供的內容。

3.3 新增控制消息分组

为了实现本文所述 NDN 移动性支持方法，需要增加 3 种控制分组类型，用于进行与移动性切换相关节点之间的消息传递，如图 2 (b) 所示。

prefix	face_list	pre_face
/para/1.avi	0,1	2

(a) 修改后的 FIB 表结构



(b) 新增消息分组结构

图2 修改表结构和新增消息分组结构

3 种修改网络配置的控制分组的生成条件、生成位置、转发方式及作用如下所示。

(1) 预修改分组 (pre_modify)

当预测到终端的切换时, 由原接入点路由器生成, 经由核心路由器发往预测的新接入点路由器, 对转发经过的所有路由器的 FIB 表进行预修改来处理预测的切换过程。

(2) 修改确认分组 (modify_confirm)

预测成功时, 终端与新接入点路由器取得连接, 由新路由器生成, 经由核心路由器发往原路由器, 对路径中的路由器的预修改内容进行保存。

(3) 修改取消分组 (modify_cancel)

预测失败时, 终端未发生切换, 由原接入点路由器生成, 经由核心路由器发往预测的新路由器, 取消对路径中的路由器做出的预修改。

中间路由器对于 3 种控制分组的响应如下。

(1) 分组中的标志位为 0

- 收到 pre_modify 分组, 将接收端口号由 FIB 中 content_prefix 对应表项的 face_list 移动到 pre_face 中。
- 收到 modify_confirm 分组, 将接收端口编号由 FIB 中 content_prefix 对应表项 pre_face 删除。
- 收到 modify_cancel 分组, 将接收端口编号由 FIB 中 content_prefix 对应表项的 pre_face 删除。

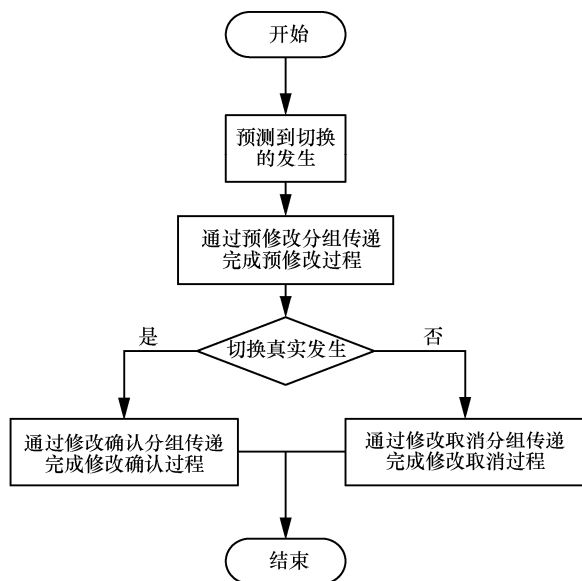
(2) 分组中的标志位为 1

- 收到 pre_modify 分组, 将接收端口编号添加到 FIB 中 content_prefix 对应表项的 pre_face 中。
- 收到 modify_confirm 分组, 将接收端口编号由 FIB 中 content_prefix 对应表项 pre_face 移动到 face_list 中。
- 收到 modify_cancel 分组, 将接收端口编号由 FIB 中 content_prefix 对应表项的 pre_face 中移回到 face_list。

如图 2 所示, 预修改分组的内容包含: 内容名 (content_prefix), 即将发生切换的终端所提供内容的名称; 标志位, 路由器根据分组类型和该字段取值确定对预修改端口的移动或增删; 定位器 (locator), 用于定位特定核心路由器, 其与原接入点路由器和预测的切换后接入点路由器相连; 可选部分, 用于功能拓展。修改确认分组沿着预修改分组的转发路径转发, 修改取消分组沿着预修改分组转发的反向路径转发, 故这两种分组中没有定位器字段。

3.4 具体流程

如图 3 所示, 基于以上对 FIB 表做出的修改, 当接入点路由器预测到生产者终端的切换时, 路由器可生成预修改分组将该切换告知网内与切换相关的所有路由器完成预修改过程。若切换真实发生, 生产者新接入点生成修改确认分组, 告知相关路由器将预修改内容保存下来, 完成修改确认过程; 若切换没有发生, 预测的接入点路由器生成修改取消分组, 将相关路由器恢复到预测前的状态完成修改取消过程。



将上述流程中的预修改过程、修改确认过程和修改取消过程展开后的方法具体流程如下。



步骤 1 边缘路由器根据终端历史位置信息, 使用极限学习机算法, 预测其下一时刻的位置。

步骤 2 边缘路由器预测到某终端将发生切换时, 产生预修改分组, 分组中分组含该终端所提供内容的前缀, 并将标志位置 0, 向特定核心路由器转发。

步骤 3 中间路由器在 FIB 表中查找预修改分组中的内容前缀对应的表项, 将预修改分组的到来端口号由 face_list 移至 pre_face 中。

步骤 4 核心路由器在 FIB 表中查找预修改分组中的内容前缀对应的表项, 将预修改分组的到来端口号由 face_list 移至 pre_face, 并在 pre_face 中添加朝新边缘路由器转发的端口号, 标志位置 1。

步骤 5 中间路由器在 FIB 表中查找预修改分组中的内容前缀对应的表项, 在 pre_face 中添加朝新边缘路由器转发的端口号。

步骤 6 新边缘路由器收到预修改分组后, 按原路径返回 success 分组完成预修改过程。

步骤 7 若终端重新与新边缘路由器取得连接, 则预测成功, 进行步骤 8~步骤 12; 若终端未发生移动, 仍连接在原边缘路由器上, 则预测失败, 进行步骤 13~步骤 17。

步骤 8 新边缘路由器产生修改确认分组, 标志位置 1, 并向网内转发。

步骤 9 中间路由器收到修改确认分组后, 将 pre_face 中的端口号移至 face_list。

步骤 10 核心路由器收到修改确认分组后, 将该分组的到来端口号由 pre_face 中移至 face_list, 删除其余端口号, 并将标志位置 0。

步骤 11 中间路由器收到修改确认分组后, 删除 pre_face 中的端口号。

步骤 12 原边缘路由器收到修改确认分组, 返回 success 分组, 完成修改确认过程。终端切换到新边缘路由器, 兴趣分组根据修改后的 FIB 表被路由到终端现在的位置。

步骤 13 原边缘路由器产生修改取消分组, 标志位置 0, 并向网内转发。

步骤 14 中间路由器收到修改取消分组后, 将 pre_face 中的端口号移至 face_list。

步骤 15 核心路由器收到修改取消分组后, 将该分组的到来端口号由 pre_face 中移至 face_list, 删除其余端口号, 并将标志位置 1。

步骤 16 中间路由器收到修改取消分组后, 删除 pre_face 中的端口号。

步骤 17 新边缘路由器收到修改取消分组, 返回 success 分组, 完成修改取消过程。终端仍连接在原路由器上, 兴趣分组按照原 FIB 表被路由到终端原位置。

3.5 方法简单模型分析

如图 4 所示, 消费者 (consumer) 正在请求生产者 (producer) 的内容/para/1.avi, 原接入点路由器 R_old 经过 ELM 算法计算, 预测生产者将由原接入点路由器 R_old 切换到新接入点

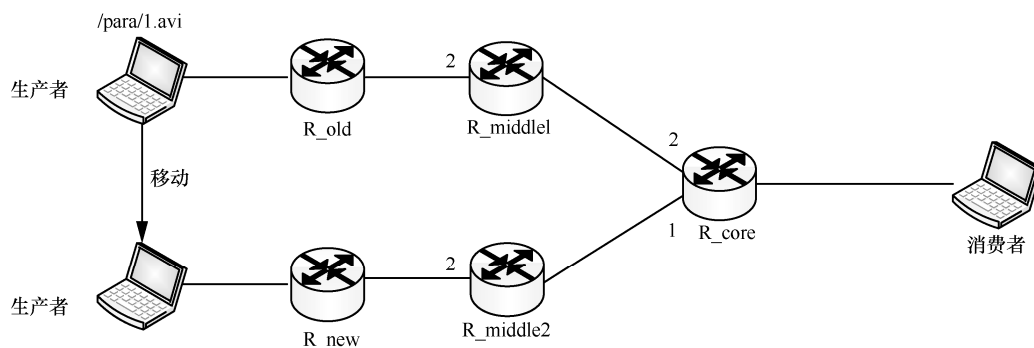


图 4 PB 移动性支持方法简单分析模型

R_new, 此时 R_old 生成 pre_modify 分组, 分组中内容名为/para/1.avi, locator 的内容为 R_old 和 R_new 的核心路由器 R_core, 中间路由器 R_middle1 收到该分组后对 FIB 表做出修改, 如图 5(a)所示, 将分组到来端口号 2 从 face_list 移动到 pre_face 中; 当核心路由器 R_core 收到该分组后对 FIB 作出修改如图 5(b)所示, 将分组到来端口号 2 从 face_list 中移动到 pre_face 中, 并添加转发出去的端口号 1; 当中间路由器 R_middle2 收到该分组后对 FIB 表做出修改, 如图 5(c)所示, 添加需要转发该分组的端口号 2; R_new 收到该分组后按原路径返回 success 信号, 至此预修改过程完成。

若预测成功, 生产者与 R_new 取得连接, 则由 R_new 生成 modify_confirm 分组, 将 R_middle2 中端口号 2 移动到 face_list 中; 将 R_core 中收到分组的端口号 1 由 pre_face 移动到 face_list 中, 并将余下的原内容转发端口 2 从 pre_face 中删除; 将 R_middle1 中 pre_face 中的端口号 2 删除, R_old 收到该分组后按原路返回 success 信号, 完成修改确认过程。

若预测失败, 生产者未发生移动, 则有 R_old 生成 modify_cancel 分组, 将 R_middle1 中 pre_face 中的端口号 2 移回到 face_list 中; 将 R_core 中接

收该分组的端口号 2 由 pre_face 移回到 face_list, 并将余下的转发端口 1 从 pre_face 中移除; 将 R_middle2 中 pre_face 中的端口号 2 删除; R_new 收到该分组后按原路返回 success 信号, 完成修改取消过程。至此, 一次完整的使用 ELM 算法的无缝切换过程完成。

通过以上方法在简单模型上执行过程的描述可以看出, 通过控制消息分组在节点间的传递, 节点利用新增的 pre_face 表项将生产者切换的预测结果很好地应用在了针对该切换的准备过程中。这使得当切换发生时网络可以无阻碍地将生产者的兴趣分组路由到生产者处, 消费者可以无缝地从网络获取所需内容。

3.6 方法时序图展示

一次完整的应用 ELM 预测的 NDN 移动性切换处理过程的时序如图 6 所示, 其中展示了当处于处理过程的不同阶段时, 对于消费者的兴趣分组兴趣的不同处理方式。

当完成预修改过程后如图 6 中 301 所示, 兴趣分组到达 R_core 后根据 FIB 表被同时转发到 R_old 和 R_new, 使得无论生产者是否已经进行了切换, 总有一处地方的兴趣得到响应, 返回数据分组给消费者, 而消费者并不关心生产者是否已经发生切换。

FIB_old			FIB_new		
prefix	face_list	pre_face	prefix	face_list	pre_face
/para/1.avi	0,1,2		/para/1.avi	0,1	2

(a) 节点R_middle1

FIB_old			FIB_new		
prefix	face_list	pre_face	prefix	face_list	pre_face
/para/1.avi	0,2		/para/1.avi	0	1,2

(b) 节点R_core

FIB			FIB		
prefix	face_list	pre_face	prefix	face_list	pre_face
/para/1.avi	0,1		/para/1.avi	0,1	2

(c) 节点R_middle2

图5 方法执行前后节点 FIB 表内容对比

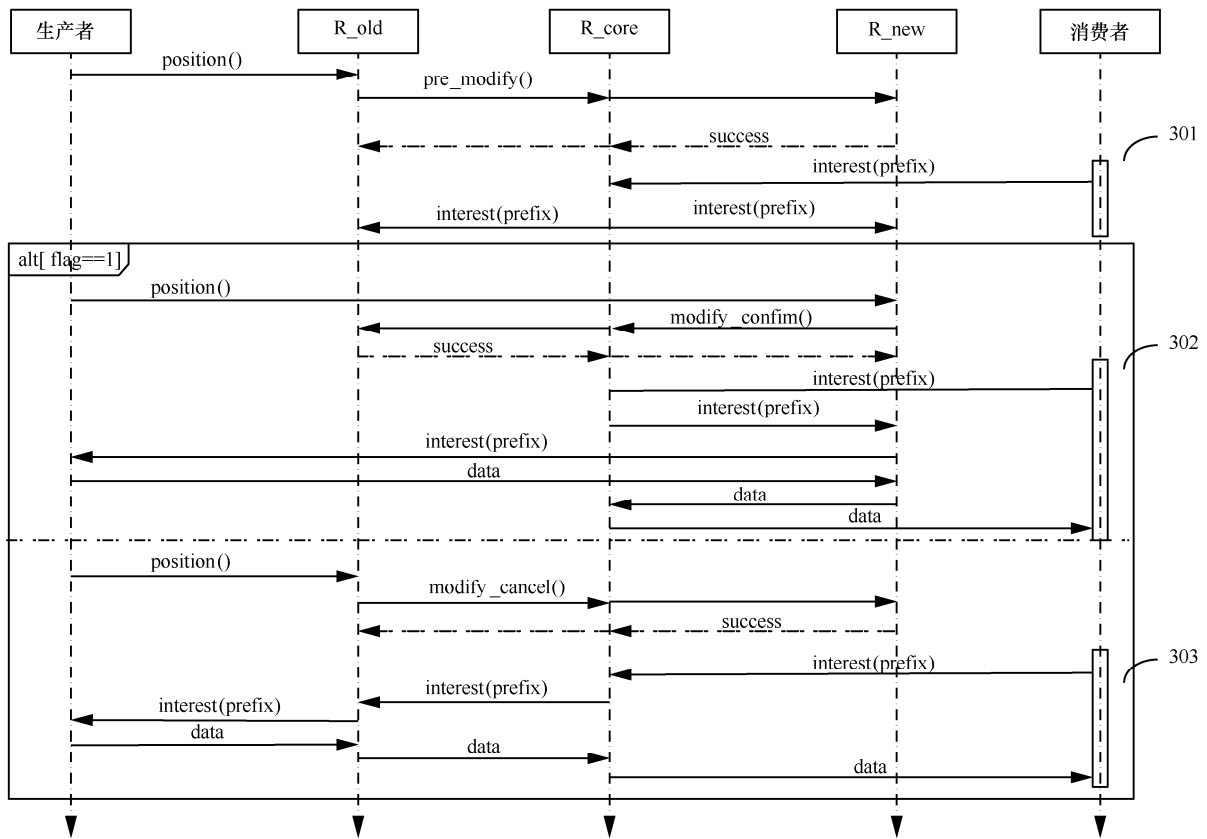


图6 基于预测的移动性支持方法时序

如果预测成功,在完成修改确认过程之后如图6中302所示,生产者此时与R_new连接,且网络中的FIB表也将生产者提供的内容指向了R_new,所以此时消费者发出的兴趣分组会被R_core转发到R_new并从生产者处获得内容。

如果预测失败,在完成修改取消过程之后如图6中303所示,网络配置被还原,消费者仍然按照预测前的路径与生产者进行通信,即消费者发出的兴趣分组会被R_core转发到R_old处,并从生产者处获得内容。

4 仿真实验与分析

4.1 ELM预测算法准确度

在仿真生产者移动预测时,移动模型采用随机游走模型(random walk mobility model),生产

者以随机变量速度(speed)和方向(direction)从当前位置向下一位置移动,其中,speed服从区间 $[speed_{min}, speed_{max}]$ 上的均匀分布,direction服从区间 $[0,2]$ 上的均匀分布。当前速度和方向与上一次计算的速度和方向独立。若生产者移动到仿真区域边缘,则按照下一移动方向弹回。生产者位置每隔时间间隔 t 计算一次。

移动模型使用BonnMotion仿真平台生成。使用MATLAB r2016b读取移动轨迹,使用该轨迹训练ELM网络,进行基于ELM算法的预测计算,并在仿真区域内生成蜂窝状小区。图7中,实线为生产者实际移动轨迹,虚线为使用ELM算法预测的生产者移动轨迹,圆点为路由器,正六边形为路由器覆盖小区边界。

为绘图简明起见,每次仅仿真一个生产者的移动。仿真参数设计见表1。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	参数值配置
横向移动范围/m	1 000
纵向移动范围/m	1 000
生产者最大移动速度/(m·s ⁻¹)	15
生产者最小移动速度/(m·s ⁻¹)	5
位置计算间隔/s	10
小区半径/m	144

记计算生产者移动的总次数为 N ，则切换预测的准确率如下：

$$A_N = 1 - \frac{N_e}{N} \quad (2)$$

其中， N_e 为预测错误的次数，预测错误包括错误地预测是否切换以及切换到错误的小区。基于 ELM 预测的仿真训练预测准确率为 90.29%，实际发生切换 132 次，预测发生切换 134 次，其中预测正确（切换到正确的小区）119 次，达到较高的准确率。应用 ELM 预测生产者移动及切换的仿真如图 7 所示。

4.2 仿真环境和性能评价指标

本文将 ndnSIM 作为仿真工具，为了验证 PB (prediction base) 移动性支持方法是否达到预期效果，本文选择了具有代表性的传统的中间点 RP

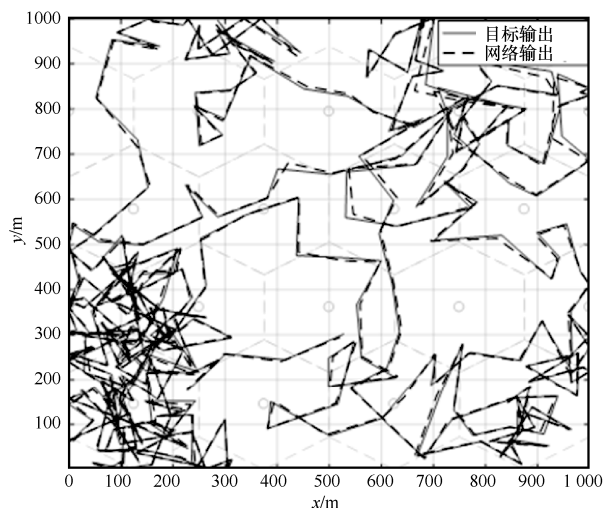


图 7 应用 ELM 预测生产者移动及切换的仿真

(rendezvous point) 和间接点 IP (indirection point) 两种移动性支持策略进行了对比。对于移动性支持策略的仿真建立了如图 8 所示的拓扑结构。

图 8 中的节点仍然被分为 3 类：内容生产者、内容消费者和中间节点，其中，中间节点又被分为 3 类：L-1 节点、L-2 节点和 L-3 节点。L-3 节点指的是内容源或者消费者的接入节点，L-2 节点指的是网络域的出口节点，L-1 节点指的是网络的名字服务器节点。仿真中的切换过程可以发生在同一个网络域内的两个 L-3 节点之间，切换仿真的次序编码如图 9 (a) 所示，也可以发生在属于

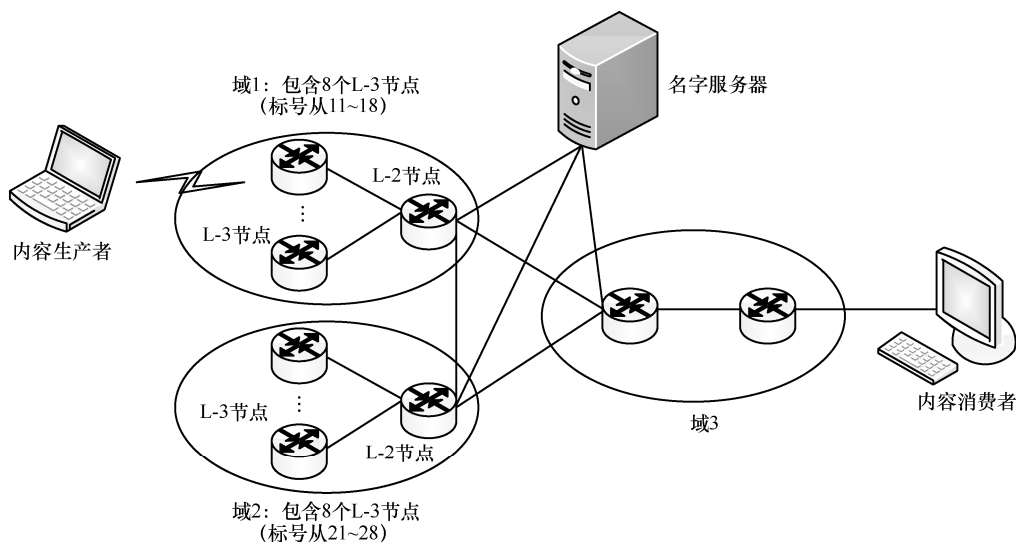


图 8 移动性支持方法仿真拓扑



不同网络域的两个 L-3 节点之间, 切换仿真的次序编码如图 9 (b) 所示。

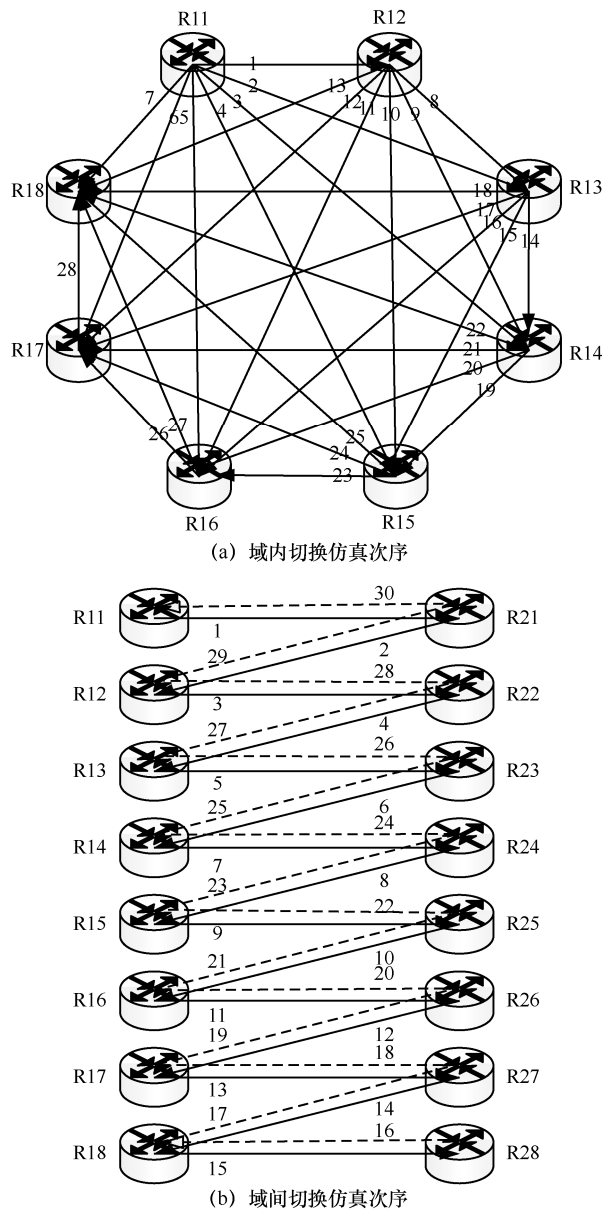


图 9 移动性支持方法仿真次序

主要仿真参数设置见表 2。

本文对 PB 移动性支持方法进行性能分析, 采取以下测量参数作为性能评价指标。

(1) 切换时延

切换时延 (handoff latency, HL) 指的是从内容生产者断开网络连接的时刻起到内容生产者重新连接网络后收到第一个兴趣分组的时刻为止的

表 2 仿真参数

仿真参数项	仿真参数值
有线链路带宽/(Mbit·s ⁻¹)	100
无线链路带宽/(Mbit·s ⁻¹)	10
L-1 节点和 L-2 节点间的链路时延/ms	10
任意两个 L-2 节点间的链路时延/ms	5
域 1 中 L-2 节点和 L-3 节点间的链路时延/ms	3~5
域 1 中两个 L-3 节点间的链路时延/ms	1~3
域 2 中 L-2 节点和 L-3 节点间的链路时延/ms	3~5
域 2 中两个 L-3 节点间的链路时延/ms	1~3
用户与其接入点之间的链路时延/ms	0.5
兴趣分组的发送速率/(个·s ⁻¹)	100

一段时间。切换时延指标代表的是内容源的移动引发的网络切换的时延, 内容源重新连接到网络后如果不能收到兴趣分组代表着它还未被网络感知, 不能开始为消费者提供服务, 所以直到内容源收到第一个兴趣分组的时刻为止的时间都计算在切换时延之内。

(2) 分组丢失数量

分组丢失 (packet loss, PL) 数量指的是仿真期间切换引发的被丢弃兴趣分组的数量。由于本文中的移动性支持策略中利用 NDN 的多播特性, 将兴趣分组进行多播发送来解决预测可能失败带来的问题, 所以这个指标的设置是为了衡量本文以及已有策略在消息传送方面的移动性支持的代价。分组丢失的数量越多, 代表策略的消息传送代价相对越大。

4.3 仿真结果

仿真中将 PB 移动性支持策略与传统的中间点 RP 和间接点 IP 两种移动性支持策略进行了对比。

图 10 (a) 展示了域内切换时延的仿真结果, 可以明显地看出, PB 策略的域内切换时延远远低于 RP 和 IP 策略。可以从几种策略的操作过程解释仿真结果。PB 策略的切换时延最低, 在 PB 策略中, 由于预测过程的存在且预测过程和正常的数据通信同步进行, 保证了在预测准确的情况下网络已经为切换提前做好了准备, 网内节点的 FIB 表已经支持将需求该生产者所提供内容的兴趣分组转发

到生产者当前的位置处,所以切换带来的时延主要是生产者断开网络连接的时间以及当预测失败时引发的部分时延。仿真中在切换预测失败的情况下,通过新接入点和原接入点的一次通信进行处理,此时方法效果基本退化为与IP策略相当,从图10(a)中也可看出时延接近IP策略。IP策略的时延主要来自于当生产者重新和网络取得连接后,需要和中间点进行一次通信,通知中间点自己已经重新连接,可以开始提供内容并告知中间点自己的当前位置。所以切换时延是生产者断开连接的时间与生产者的新接入点与中间点之间的通信时间之和。RP策略的切换时延最长,原因是RP策略中消费者在一次请求失败后判断生产者的位置发生了移动,再向间接点请求该生产者对应的最新位置信息,所以生产者在切换之后收到的第一个兴趣分组来自于消费者进行的重传。切换时延是生产者断开连接的时间与消费者和间接点进行一次通

信并对兴趣分组进行重传的时间之和。

图10(b)展示的是几种策略在分组丢失数量上的表现,其中RP和IP策略在多次仿真中分组丢失的表现是稳定的,而本文的PB策略由于预测失败情况的发生导致分组丢失数量在几次仿真中会有所上升。由于切换时延对应的时间内的兴趣分组传递都会被丢弃,所以切换时延更长的策略相应分组丢失也会更多。

图11(a)、图11(b)中分别展示的是发生域间切换时几种移动性支持策略在切换时延和分组丢失数量上的表现。从图11(a)中可以看出,本文的PB策略在应对域间切换时的时延与应对域内切换时的时延基本保持不变,因为PB策略的时延基本不受所切换两个节点间关系的影响。而RP和IP策略在应对域间通信时需要通信的距离更长,相应的通信时间更长,带来的切换时延也会更长。而图11(b)中相应的分组丢失数量也会随

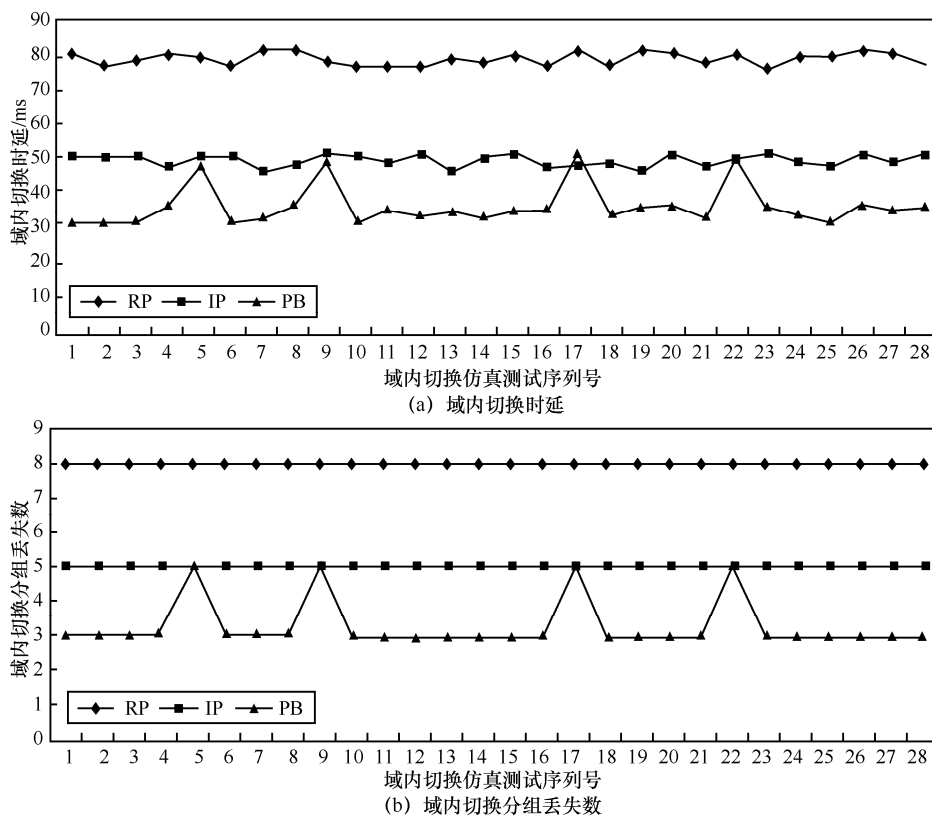


图10 域内切换性能分析

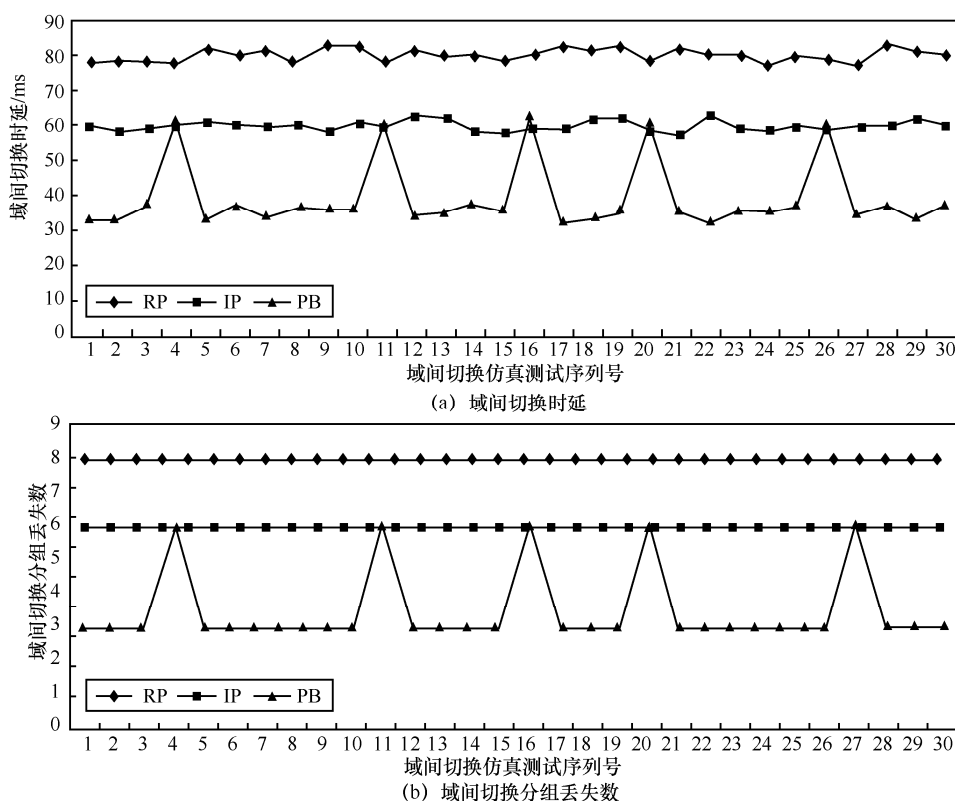


图 11 域间切换性能分析

切换时延进行变化。

5 结束语

本文在对已有传统 NDN 移动性支持方法进行分析的基础上,发现了使用预测方法实现移动性支持的可行性,并对已有的移动预测进行了简单的调研分析,决定选用 ELM 极限学习机作为预测算法,最终设计了 PB 移动性支持方法。考虑到预测存在准确度的问题,本文设计了一种基于 NDN 多播机制的支持方法,该方法的特点是将预测结果暂时用于对 FIB 表的修改直到终端实际发生切换,若预测错误,可将 FIB 表恢复至更改之前而不影响正常通信。方法设计中涉及了 FIB 数据结构修改、新增控制消息分组的设计以及设定节点对不同消息分组的响应方式等。通过引入预测过程,使得路由器可以对终端的移动提前做出切换操作,有效减小了切换过程中的流量损耗,

节约了带宽,缩短了时延。鉴于 NDN 中对于消费者端移动性的支持方法还是依靠消费者对兴趣分组进行重传机制,仍然属于被动应对的方法,所以还可以将本文基于预测的方法拓展到消费者端移动性的支持,在兴趣分组回传过程中直接将兴趣分组缓存到预测消费者端要移动到的位置上。

参考文献:

- [1] FELDMANN A. Internet clean-slate design: what and why?[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(3): 59-64.
- [2] 雷凯, 袁杰. 命名数据网络内容分发机制研究与探讨[J]. 电信科学, 2014, 30(9): 27-36.
LEI K, YUAN J. Content distribution mechanisms of named data networking[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(9): 27-36.
- [3] ZHANG Y, AFANASYEV A, BURKE J, et al. A survey of mobility support in named data networking[C]//IEEE INFOCOM 2016-IEEE Conference on Computer Communications Workshops, April 14-19, 2016, Turin, Italy. New Jersey: IEEE Press, 2016: 83-88.

- [4] FENG B, ZHOU H, XU Q. Mobility support in named data networking: a survey[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2016, 2016(1): 220.
- [5] HERMANS F, NGAI E, GUNNINGBERG P. Mobile sources in an information-centric network with hierarchical names: an indirection approach[J]. Proc Swedish National Computer Networking Workshop, 2011.
- [6] KIM D H, KIM J H, KIM Y S, et al. Mobility support in content centric networks[C]// Edition of the ICN Workshop on Information-Centric Networking, August 17, 2012, Helsinki, Finland. New York: ACM Press, 2012: 13-18.
- [7] RAVINDRAN R, LO S, ZHANG X, et al. Supporting seamless mobility in named data networking[C]//2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 10-15, 2012, Ottawa, ON, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2012: 5854-5869.
- [8] JIANG X, BI J, WANG Y, et al. A content provider mobility solution of named data networking[C]//IEEE International Conference on Network Protocols, Oct 30-Nov 2, 2012, Austin, TX, USA. New Jersey: IEEE Press, 2012:1-2.
- [9] JIANG X, BI J, WANG Y. What benefits does NDN have in supporting mobility[C]// Computers and Communication, June 23-26, 2014, Funchal, Madeira, Portugal. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [10] HERMANS F, NGAI E, GUNNINGBERG P. Global source mobility in the content-centric networking architecture[C]//1st ACM workshop on Emerging Name-Oriented Mobile Networking Design - Architecture, Algorithms, and Applications, June 11, 2012, Hilton Head, South Carolina, USA. New York: ACM Press, 2012: 13-18.
- [11] WOO T, PARK H, JUNG S, et al. Proactive neighbor pushing for enhancing provider mobility support in content-centric networking[C]//2014 Sixth International Conf on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), June 8-11, 2014, Shanghai, China. New Jersey: IEEE Press, 2014: 158-163.
- [12] KIM D, KIM J, KIM Y, et al. Mobility support in content centric networks[C]//The Second Edition of the ICN Workshop on Information-Centric Networking, August 17, 2012, Helsinki, Finland. New York: ACM Press, 2012: 13-18.
- [13] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: theory and applications[J]. Neurocomputing, 2006, 70(1): 489-501.

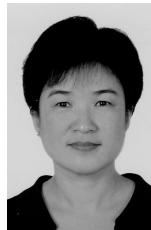
[作者简介]



曲桦 (1961-), 男, 博士, 西安交通大学电子与信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为现代通信网、计算机网络体系结构。



李岩松 (1992-), 男, 西安交通大学软件学院硕士生, 主要研究方向为软件定义网络、信息中心网络。



赵季红 (1963-), 女, 博士, 西安交通大学电子与信息工程学院、西安邮电大学通信与信息工程学院教授, 主要研究方向为宽带通信网、新一代网络的管理与控制。



赵东旭 (1993-), 男, 西安交通大学软件学院硕士生, 主要研究方向为基于软件定义网络流量监控及分类。



赵建龙 (1992-), 男, 西安交通大学软件学院博士生, 主要研究方向为面向软件定义网络的流量工程技术及北向接口协议。