

一种 ICN 中的启发式路由机制

孙欣欣 王兴伟 李 洁 黄 敏

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

摘 要 互联网逐渐成为社会基础设施,现有 TCP/IP 体系结构面临诸多挑战,以信息中心网络(Information-Centric Networking, ICN)为代表的未来互联网成为研究热点。在基于名字路由的基础上,提出了一种面向 ICN 的启发式路由机制,即通过为满足回溯条件的兴趣包寻找其他可用接口再次进行转发来降低网络阻塞率,通过修改数据包沿途经过的路由器邻居节点的转发信息库(Forwarding Information Base, FIB)来实现对缓存的高效利用,以及通过引入“流行度”概念来提高内容存储库(Content Store, CS)的命中率。基于 INTERNET2 拓扑进行了仿真实验,结果表明该机制是可行和有效的。

关键词 ICN, 启发式路由, 回溯, 缓存, 流行度, CS 命中率

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.12.002

Heuristic Routing Mechanism in ICN

SUN Xin-xin WANG Xing-wei LI Jie HUANG Min

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract Internet has become a social infrastructure. The current Internet architecture based on TCP/IP is faced with many challenges. This fact makes the clean slate design of future Internet architecture represented by Information-Centric Networking (ICN) become a hot research topic. In this paper, a heuristic routing mechanism in ICN was proposed. On the basis of name-based routing, a procedure was devised to look for other available interface through which the backtracking-condition-met interest packet will be forwarded, which can reduce the network blocking rate. Moreover, Forwarding Information Base (FIB) of neighbor nodes will be modified when data packets go through a router, which can realize the efficient use of cache. In addition, a concept of "popularity" was introduced to improve the Content Store (CS) hit rate. The proposed routing mechanism was implemented on INTERNET2 by simulation. The experimental results show that it is feasible and effective.

Keywords ICN, Heuristic routing, Backtracking, Cache, Popularity, CS hit rate

1 引言

互联网始于 1969 年,经过 40 余年的发展已经取得了巨大成功。在设计之初,互联网是只有少数高端用户才能使用的通信平台,现阶段互联网已经发展成为集信息采集、传输、存储与处理于一体的信息基础设施。自互联网诞生之日起,计算模式、通信技术与应用模式便一直处于不断变化之中,互联网接入方式和网络角色定位的转变导致以 IP 地址为核心、以传输为目的、按照端到端原理设计的 TCP/IP 体系结构面临诸多亟待解决的问题,学术界正在思考应该怎样构建和发展未来互联网^[1]。

信息中心网络(Information-Centric Networking, ICN)作为一个崭新的概念,是一种革命性的新型网络体系结构。ICN 提出的通信方式是基于名字的路由,实现内容与位置的分离^[2]。命名数据网络(Named Data Networking, NDN)是

ICN 的一个典型代表,NDN 体系结构与 TCP/IP 体系结构的本质区别在于基于名字的路由,将传统的 IP 定位模式转变为内容定位,通过命名数据代替地址来定位资源^[3]。ICN 更关心“是什么”(what)而非“在哪里”(where),因此,ICN 中的路由机制不能照搬现有 TCP/IP 体系结构中的路由机制,现有路由机制以 IP 为核心,基于 IP 地址进行寻路,并不能满足 ICN 以内容为中心的需要^[4]。

与传统网络中多种多样的路由研究,例如流行的 QoS 路由协议^[5]、QoS 路由算法^[6]、节能路由算法^[7]、感知路由算法^[8]等相比,关于 ICN 中的路由机制的研究尚处于起步阶段。例如,文献[9]提出了一种接口配色方案,即将转发信息库(Forwarding Information Base, FIB)中的接口标以颜色:绿色、黄色和红色,在路由器转发兴趣包的过程中优先选择可用的绿色接口,然后再考虑可用的黄色接口,红色接口为故障接口,不可用。文献[10]提出了一种邻居缓存路由策略,即在蚁

到稿日期:2014-01-15 返修日期:2014-05-20 本文受国家杰出青年科学基金资助项目(61225012, 71325002),高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域资助课题(20120042130003),中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N110204003, N120104001)资助。

孙欣欣(1990-),女,硕士,主要研究方向为网络路由机制, E-mail: sunxinxin@163.com; 王兴伟(1968-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为未来互联网、云计算、网络与信息安全等; 李 洁(1988-),女,博士,主要研究方向为未来互联网; 黄 敏(1968-),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为物流与供应链管理、智能算法设计与优化、调度理论与方法等。

群转发策略的基础上,获取邻居路由节点缓存信息并根据邻居缓存信息给出相应的路由转发,控制了网络中的冗余流量。文献[11]提出了一种基于概率的自适应转发策略(Probability-Based Adaptive Forwarding),即将传输时延作为度量值,参照历史信息,利用蚁群优化计算接口的选择概率,基于概率选择接口进行兴趣包的转发,这有效地提高了网络性能。与大量研究工作中采用智能方法^[12]进行目标优化的方式不同,本文提出了一种 ICN 中的启发式路由机制并将其进行仿真实现,仿真结果表明该机制是可行和有效的。

2 模型描述

本文中的节点路由器需要维护 3 个数据结构,也即 3 个表:内容存储库(Content Store,CS)、未决兴趣表(Pending Interest Table,PIT)以及转发信息库(Forwarding Information Base,FIB)^[13]。节点路由器结构和分组转发过程如图 1 所示。客户端通过向网络中发送兴趣包来表达想要获取的数据内容,路由器对兴趣包进行转发并维护未决兴趣的状态信息,成功找到请求数据后形成数据包,返回给客户端。兴趣包中携带请求数据的名字,到达路由节点后,依次查找 CS、PIT、FIB,按照最长前缀匹配选择接口进行转发,兴趣包的转发过程是下游节点提出数据请求向上游节点进行数据检索的过程。数据包中携带数据的名字和数据的具体内容,到达路由节点后,首先查找 PIT,然后根据查询结果将数据包丢弃或者返回给客户端。

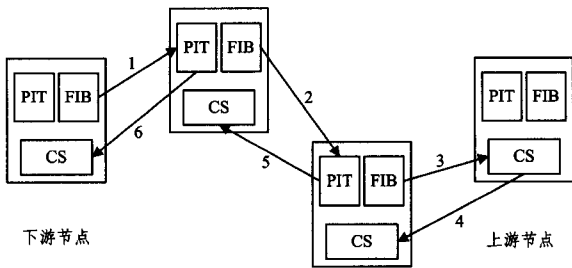


图 1 节点结构和分组转发过程

2.1 内容存储库 CS

在数据包返回给客户端的过程中,数据包的内容会复制到沿途经过的节点中,存储到本地 CS。为了提高 CS 命中率,本文引入“流行度”概念,一定时间内,数据内容被访问的次数越多,其流行度越高。CS 中的条目按照流行度进行排序,流行度越高,排序越靠前。兴趣包到来时按流行度由高到低进行查找,缓存占满后按流行度由低到高进行替换。依据访问局部性原理,按照流行度的高低对内容进行查找和替换能够有效地提高 CS 命中率。

2.2 未决兴趣表 PIT

路由节点接收到兴趣包后,要在 PIT 中创建一个条目,条目中存放有兴趣包中携带的请求数据的名字及兴趣包入口。如果 PIT 中已经存在相同的条目,则直接将兴趣包入口添加到相应的条目之下。当有数据包返回时,每经过一个路由节点,要对其 PIT 进行查找,确定数据包是否有效,如果有效,则将数据包继续转发给 PIT 中相应条目下的所有接口并将此条目移除;否则,此数据包是一个未经请求的无效数据包,直接将其丢弃。PIT 中的每个条目由相应的名字、入口列表等构成,如图 2 所示。

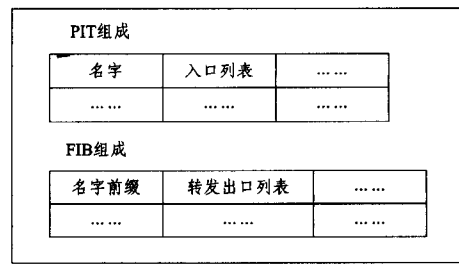


图 2 PIT 和 FIB 表结构

2.3 转发信息库 FIB

FIB 中存放着一系列名字前缀及其对应的转发出口列表,将相应的兴趣包经此转发可能会找到请求的数据内容,本文采用最长前缀匹配来为特定的兴趣包寻找转发接口。FIB 中的每个条目由相应的名字前缀、转发出口列表等构成,如图 2 所示。

3 启发式路由机制

为使 ICN 中的路由更加高效,本文设计了一种 ICN 中的启发式路由机制,它在路由过程中充分利用路由节点中的信息,对分组的处理更加灵活高效。本文给出了回溯路由方法和缓存路由方法,下面将具体介绍。

3.1 回溯路由

在 NDN 中,对兴趣包的处理并不高效,在 FIB 中找不到转发接口时,会直接将兴趣包丢弃,如果客户端仍然想要获取请求内容,会花费一定的等待时间,直到 TTL(Time To Live)到期才能够再次发出请求到网络中进行数据检索^[14]。本文在路由中引入了回溯机制,当路由节点接收到兴趣包后,会对本地 CS、PIT 以及 FIB 进行查找,如果这 3 个表中都没有与兴趣包相匹配的条目,本文则将此作为回溯条件来执行回溯路由,满足回溯条件的节点称为回溯点。回溯路由具体步骤如下:

步骤 1 判断是否存在下游节点。若不存在,则转至步骤 5。

步骤 2 返回到下游节点,将兴趣包的名字与节点 FIB 中每一项条目的名字前缀进行匹配,找出本次匹配最长前缀条目下的可用接口。

步骤 3 判断是否存在除了前次转发所选接口以外的其他可用接口。若不存在,则转至步骤 1。

步骤 4 选择其他接口将兴趣包转发出去,若成功找到请求数据,则转至步骤 5;否则,转至步骤 1。

步骤 5 结束。

3.2 缓存路由

数据包返回给客户端时会将携带的数据内容缓存到沿途经过的路由节点中。为了实现对路由节点中缓存的高效利用,本文在对路由节点添加缓存内容的同时将此消息通知给邻居节点,具体步骤如下:

步骤 1 将数据包的名字与邻居节点 FIB 条目中的名字前缀进行匹配查找。

步骤 2 判断邻居节点 FIB 中是否存在与数据包相匹配的条目。若不存在,则为邻居节点的 FIB 创建新的条目并将此节点添加到本条目之下,转至步骤 4。

步骤 3 判断邻居节点 FIB 匹配条目下是否已经包含此节点。若不包含,则将此节点添加到相应的条目之下并保证

邻居发出请求时节点被优先选取。

步骤 4 结束。

3.3 启发式路由机制

本文提出的启发式路由机制将上述回溯路由方法运用到对兴趣包的处理过程,将缓存路由方法运用到对数据包的处理过程,具体做法如下:

(1) 兴趣包处理过程

启发式路由机制对兴趣包的处理过程用图 3 所示的状态变迁过程描述。

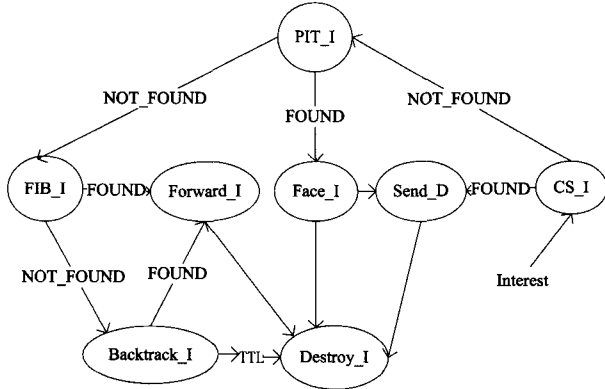


图 3 启发式路由机制对兴趣包的处理过程

- CS_I state: 查找请求数据是否存在于本地 CS。若存在,则对匹配的条目进行计数,按照流行度从高到低进行排序,状态转移至 Send_D state;否则,状态转移至 PIT_I state。

- Send_D state: 形成数据包,将其发送至请求接口,状态转移至 Destroy_I state。

- PIT_I state: 查找 PIT 条目中是否已经存在请求数据的名字。若存在,状态转移至 Face_I state;否则,状态转移至 FIB_I state。

- Face_I state: 将请求接口加入到相应的条目之下,状态转移至 Destroy_I state。

- FIB_I state: 查找 FIB 中是否存在与请求数据名字相匹配的条目。若存在,状态转移至 Forward_I state;否则,状态转移至 Backtrace_I state。

- Forward_I state: 按照最长前缀匹配选择接口将兴趣包转发出去,并为 PIT 创建一个新的条目,添加请求接口,状态转移至 Destroy_I state。

- Backtrace_I state: 根据 3.1 节,执行回溯路由方法。

- Destroy_I state: 将兴趣包丢弃,释放分配的资源。

以上描述的各个状态均假设 TTL 未到期。

(2) 数据包处理过程

启发式路由机制对数据包的处理过程用图 4 所示的状态变迁过程描述。

- PIT_D state: 查找 PIT 条目,如果存在与数据包匹配的条目,状态转移至 Add_CS state;否则,状态转移至 Destroy_D state。

- Add_CS state: 将数据包的内容缓存到本地 CS,状态转移至 Cache-informing state。

- Cache-informing state: 根据 3.2 节,将缓存消息通知邻居,状态转移至 Forward_D state。

- Forward_D state: 按照 PIT_D state 中查找的信息转发数据包,状态转移至 Destroy_D state。

- Destroy_D state: 将数据包丢弃,释放分配的资源。

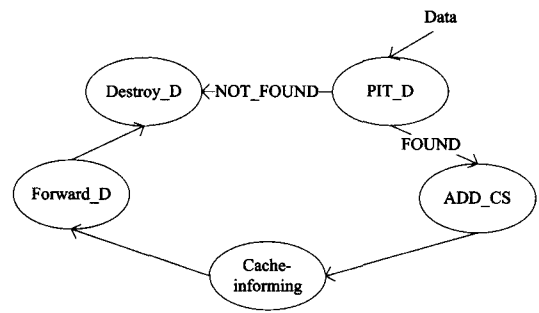


图 4 启发式路由机制对数据包的处理过程

4 性能评价

本文基于美国 INTERNET2 拓扑进行仿真实验,选取基于概率的自适应转发 PAF^[11]作为比较对象。在对本文提出的启发式路由机制 HRM(Heuristic Routing Mechanism)进行性能评价的过程中发现,对于不同的参数设定(如路由节点的 CS 大小、PIT 大小、FIB 大小),仿真结果表现出的性能有所差异。此外,请求内容的名字由随机生成的字符串组成,也会对性能评价产生一定的影响。本文在进行仿真实验时设定 CS 的大小为 25, PIT 的大小为 10, FIB 的大小为 15。

(1) 平均时延(跳数)

图 5 中的横轴代表请求的个数,纵轴代表平均时延,即成功请求中平均每个请求对应的转发跳数。PAF 基于时延选择最优接口转发兴趣包,由图可知,HRM 的平均时延与 PAF 相差不多。当请求数量增多时,HRM 的平均时延要优于 PAF,这主要是因为 HRM 充分利用了网络节点中的缓存内容,同时表明 HRM 在平均时延方面的性能表现良好。

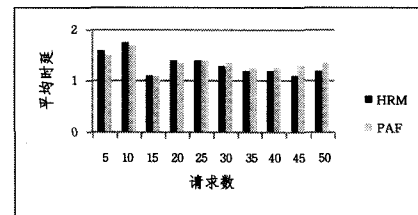


图 5 平均时延对比图

(2) 阻塞率

图 6 中的横轴代表请求的个数,纵轴代表阻塞率,即请求失败数占请求总数的比例。随着请求数量的增多,网络中的流量增大,可用资源减少,与 PAF 相比,HRM 可以通过回溯路由方法为兴趣包寻找其他可用的转发接口,使无效兴趣包的数目减少,从而有效地降低网络的阻塞率。

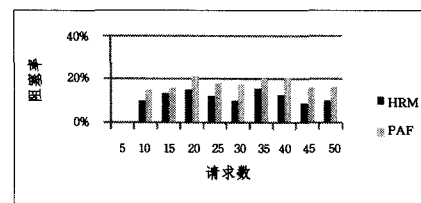


图 6 阻塞率对比图

(3) 内容服务器负载

图 7 中的横轴代表请求的个数,纵轴代表内容服务器负载,即从内容服务器端获取请求数据的请求个数。可以看出,HRM 的服务器端负载一直小于 PAF 的服务器端负载,两者

(下转第 37 页)

确率可以达到 80% 以上,而精确度及召回率可以达到 75% 左右。微博预警算法对研究网络舆情的传播具有重要意义。

参考文献

- [1] 徐晓东. 微博社区谣言传播和舆情挖掘研究[D]. 南京: 江苏大学, 2011
- [2] Phuvipadawat S, Murata T. Breaking News Detection and Tracking in Twitter[C]//2010 IEEE/WIC/ACM International conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology. Toronto, Canada; Orland Hoerber, 2010: 120-123
- [3] 邱云飞, 程亮. 微博突发话题检测方法研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(9): 288-290
- [4] Webberley W, Allen S, Whitaker R. Retweeting: A Study of Message-Forwarding in Twitter[C]//2011 Workshop on Mobile and Online Social Networks. Milan, Italy, 2011: 13-18

(上接第 10 页)

之间的差距非常明显,而且在 HRM 中,有些情况下服务器端已经达到了零负载,这是因为将缓存通知给邻居节点的条件下所有的成功请求都能够直接从网络节点的缓存中获取请求数据。由此,HRM 能够有效地降低内容服务器端负载,实现缓存的高效利用。

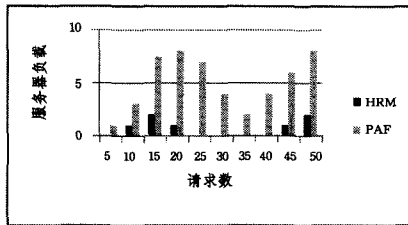


图 7 内容服务器负载对比图

(4) CS 命中率

图 8 中横轴代表请求的个数,纵轴代表 CS 命中率,即在发出一定数目的请求之后成功请求中从网络节点直接获取请求内容的请求数与请求成功数的比值。相比 PAF 而言,HRM 将缓存消息通知邻居的同时,基于流行度进行缓存替换,这有效地提高了 CS 的命中率。

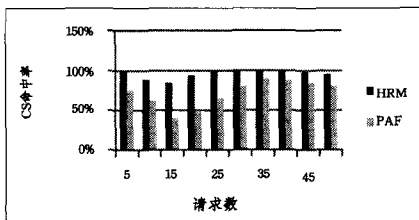


图 8 CS 命中率对比图

结束语 针对当前 ICN 路由存在的不足之处,本文提出了一种 ICN 中的启发式路由机制,给出了回溯路由、缓存路由的方法和基于流行度的缓存替换策略。本文基于 INTERNET2 拓扑对该机制进行了仿真实验。仿真结果表明,与基于概率的自适应转发 PAF 相比,启发式路由在平均时延、阻塞率、内容服务器负载以及 CS 命中率 4 个方面均表现出了更好的网络性能。

参考文献

- [1] Pan Jian-li, Paul S, Jain R. A Survey of the Research on Future

- [5] Suh B, Hong Li-chan, Pirolli P, et al. Want to be Retweeted? Large Scale Analytics on Factors Impacting Retweet in Twitter Network[C]//2010 IEEE Second International Conference on Social Computing. Minneapolis, USA; Justin Zhan, 2010: 177-184
- [6] 郭海霞. 新型社交网络信息传播特点和模型分析[J]. 现代情报, 2012, 32(1): 56-59
- [7] Cha, Meeyoung H, Benevenuto F, et al. Measuring User Influence in Twitter; The million follower fallacy[C]//Proceedings of the 4th International AAAI Conference on Weblogs and Social Media. Washington; William Coben, 2010: 10-17
- [8] 刘庆和, 梁正友. 一种基于信息增益的特征优化选择方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(12): 130-132
- [9] 张旸, 路荣, 杨青. 微博客中转发行为的预测研究[J]. 中文信息学报, 2012, 26(4): 109-114

- [10] Internet Architectures [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(7): 26-36
- [2] 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
- [3] Zhang L, Estrin D, Burke J, et al. Named Data Networking (NDN) Project[R]. Relatório Técnico NDN-0001, Xerox Palo Alto Research Center-PARC, 2010
- [4] Carofiglio G, Gallo M, Muscariello L, et al. Modeling data transfer in content-centric networking[C]//Proceedings of the 23rd International Teletraffic Congress. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2011: 111-118
- [5] 谢小民, 王兴伟, 温占考. 一种面向认知网络的 QoS 路由协议[J]. 计算机学报, 2013, 36(9): 1807-1815
- [6] Wang X, Cheng H, Huang M. Multi-robot navigation based QoS routing in self-organizing networks[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(1): 262-272
- [7] Wang X, Cheng H, Li K, et al. A cross-layer optimization based integrated routing and grooming algorithm for green multi-granularity transport networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2013, 73(6): 807-822
- [8] 曲大鹏, 王兴伟, 黄敏. 移动对等网络中的感知蚁群路由算法[J]. 计算机学报, 2013, 36(7): 1456-1464
- [9] Cheng Yi, Afanasyev A, Wang Lan, et al. Adaptive forwarding in named data networking[J]. Computer Communication Review, 2012, 42(3): 62-67
- [10] 叶润生, 徐明伟. 命名数据网络中的邻居缓存路由策略[J]. 计算机科学与探索, 2012, 6(7): 593-601
- [11] Qian H, Ravindran R, Wang G Q, et al. Probability-based adaptive forwarding strategy in named data networking[C]//2013 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM 2013). IEEE, 2013: 1094-1101
- [12] Wang X, Sun J, Li H, et al. A Reverse Auction Based Allocation Mechanism in the Cloud Computing Environment[J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2013, 7(11): 75-84
- [13] Ahlgren B, Dannewitz C, Imbrenda C, et al. A survey of information-centric networking[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 26-36
- [14] Van Jacobson, Smetters D K, Thornton J D, et al. Networking named content[J]. Communications of the ACM, 2012, 55(1): 117-124