



专题:未来网络

内容中心网络中基于温度场的路由算法

刘宗海¹, 王 鹏¹, 张校辉¹, 金飞蔡²

(1. 国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002;

2. 中兴通讯股份有限公司 南京 210012)

摘 要: 内容中心网络(content-centric networking, CCN)作为一种全新的网络体系结构,对路由算法的设计提出了许多新的挑战。针对 CCN 的特点,提出了一种基于温度场的路由(temperature field based routing, TFBR)算法,将物理学中稳态温度场的概念引入 CCN,并采用有限元法求解稳态温度场,形成路由转发决策。仿真实验表明,TFBR 算法能够充分利用 CCN 的路由节点缓存功能,在降低网络平均时延性能的同时,提高了 CCN 的负载均衡性能。

关键词: 内容中心网络;路由;缓存;温度场

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015323

A Temperature Field Based Routing Algorithm in Content-Centric Networking

Liu Zonghai¹, Wang Peng¹, Zhang Xiaohui¹, Jin Feicai²

(1. National Digital Switching System Engineering and Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China;

2. Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation, Nanjing 210012, China)

Abstract: Content-centric networking (CCN) is a novel network architecture which presents new challenges for the design of routing. Aiming at the characteristics of CCN, a temperature field based routing (TFBR) algorithm was proposed. This scheme introduced the conception of temperature fields in physics into CCN and applied a finite element method (FEM), which is one of numerical analysis techniques, to assign a temperature value to each node of CCN in a distributed way. Simulation results show that TFBR can adequately utilize the cache in CCN nodes and decrease the network average delay while improving the performance of load balancing.

Key words: content-centric networking, routing, cache, temperature field

收稿日期:2015-11-20;修回日期:2015-12-07

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(No.2012CB315901, No.2013CB329104),国家自然科学基金资助项目(No.61309019, No.61372121), 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2015AA016102),中兴通讯产学研合作课题资助

Foundation Items: The National Basic Research Program of China(973 Program)(No.2011CB315901, No.2013CB329104), The National Natural Science Foundation of China(No.61309019, No.61372121),The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(No.2015AA016102), Application & Research Joint Innovation Funding Product

论文引用格式:刘宗海, 王鹏, 张校辉等. 内容中心网络中基于温度场的路由算法. 电信科学, 2015323

Liu Z H, Wang P, Zhang X H, *et al.* A temperature field routing algorithm in content-centric networking. Telecommunications Science, 2015323

1 引言

以业务为驱动的互联网的快速发展,正在逐步改变人们传统的端到端通信模式,人们对数据内容本身的需求越来越强烈,以内容为中心的业务逐渐占据网络业务的统治地位。这种网络功能的转变给互联网发展带来了许多新的挑战,使得传统以主机为中心的网络体系结构已经难以适应现代互联网的发展。为了更好地满足用户需求和进一步推动网络业务的发展,互联网体系结构亟需改变。

研究人员在现有互联网体系结构的基础上提出了许多演进式方法,如缓存(cache)、内容分发网络(content delivery network, CDN)、P2P(peer-to-peer, P2P)等,试图解决用户如何快速获取内容的问题^[1]。这些演进式方法虽然在一定程度上缓解了当前互联网所面临的压力,但是额外引入的管理和操作代价使得这些方法难以成为长久的解决之道。随着未来网络体系结构研究的不断深入,研究人员又提出了一种全新的革命式的未来网络体系结构——内容中心网络(content-centric networking, CCN)^[2]。CCN从根本上改变了网络内容获取的方式,使得内容分发和获取变得更加高效和便捷,CCN采用以内容为中心的模式,主要关注内容而不关心内容具体在哪。在CCN中,每个内容都有一个全局唯一的标识,标识结构可以是扁平或分级结构,内容将不再存储在某一个特定的位置,CCN中任何具有缓存功能的路由器都可以缓存内容。CCN中的数据分组分为兴趣分组和内容分组,数据分组携带内容标识而不再是源地址或目的地址。内容请求者发送携带内容标识的兴趣分组请求内容,而不需要指定内容的具体存储位置,任何节点收到兴趣分组后都会检查本节点是否缓存了相应内容,如果有相应内容缓存,则响应请求;如果没有,则将兴趣分组转发到下一个节点,直到有内容响应为止。CCN这种大规模分布式缓存的体系结构使得内容获取变得非常便捷和快速,极大地提高了网络中内容分发和传递的效率。

虽然CCN中内容的多缓存副本提高了内容的可用性和用户的灵活性,但同时也给CCN的路由设计带来了许多挑战。首先,分布式的内容缓存体系结构需要分布式的内容路由算法,以增强路由算法的强健性和可扩展性;其次,内容缓存的消退和增加要求路由算法能够灵活地适应内容缓存的动态变化,降低内容获取的时延;最后,内容服

务器或缓存节点有限的服务能力要求路由算法在计算路径时要考虑负载均衡,最大限度发挥网络性能。基于以上考虑,本文对CCN中的路由算法进行了研究。针对CCN对内容获取时延要求较高的特点设计了一种基于温度场的路由(temperature field based routing, TFBR)算法,该算法以最大限度发挥CCN性能为出发点,同时兼顾强健性和可扩展性要求,为CCN数据转发提供了一种解决方案。

2 相关工作

目前,CCN作为一种新型网络体系结构,其研究还处于初步阶段,尤其是支持CCN分布式缓存架构的路由机制研究,成果相对较少。参考文献[4]提出了两种数据转发策略:一种是全转发策略,即向内容通告的所有接口转发兴趣分组,这种策略能够使内容获取的时延最小化,但同时发出的多个兴趣分组将会导致多个响应的内容数据分组,产生大量的冗余流量,这些冗余流量将会消耗大量带宽和增加网络平均时延^[5];另一种转发策略是随机转发策略,即从内容通告的接口中随机选择一个接口转发兴趣分组,这种转发策略虽然不会产生冗余流量,但也不能保证内容获取的时延性能。

在以上两种转发策略的基础上,参考文献[6]提出了一种可扩展的内容感知路由算法SCAN,SCAN整合IP路由和内容路由的优势,在向内容原始存储节点请求内容的同时,每个中间节点都搜索自己的邻居节点是否缓存有相应内容,在提高内容可达性和有效性的同时,降低了内容获取的时延,但也会导致多个内容副本在网络中传输,产生大量的冗余流量^[7]。参考文献[8]分析了以服务为中心的网络和以内容为中心的网络各自的优缺点,提出在内容为中心网络之上增加一个控制层,在控制层中实现服务路由和服务选择算法,并基于蚁群算法给出了一种用于实现内容发现的服务路由算法SoCCeR。尽管SoCCeR为CCN中的内容路由问题提供了一种有效的解决方案,但SoCCeR没有考虑中间节点的内容缓存情况,没有最大限度地发挥内容分布式缓存的优势。参考文献[9]提出了一种基于势能的内容路由算法PBR,PBR利用最陡梯度搜索算法的思想,为内容缓存节点设定一个固定的势能值,其他节点根据到内容缓存节点的距离计算各自的势能值,形成势能场,内容请求沿着最陡梯度的方向转发,直到内容缓存节点。尽管PBR算法在缓存命中率及时延方面提高了CCN的性



能,但PBR算法没有考虑中间节点的流量情况,可能会导致非内容缓存节点的拥塞,而且当网络中有多个内容缓存副本时,非内容缓存节点势能为内容缓存形成势能场的简单叠加,这可能会导致路由环路产生,影响CCN的性能。

3 基于温度场的分布式路由算法

3.1 基于温度场路由的思想

由于其简单性和顽健性,基于势能场的路由算法在许多网络环境中进行了应用^[10-12]。这些算法的共同思想是在网络中构建一个物理学中的纯量场,为网络中每个节点分配一个纯量值,代表节点势能,为目的节点分配最大的势能值,数据分组的转发总是沿着最陡梯度的方向直到目的节点。虽然思想比较简单,但基于物理场的路由算法能够提供非常灵活和功能多样的路由决策机制。参考文献[12]已经证明了基于势能场的路由算法能够模拟最短路径优先算法,并基于物理场的基本性质,证明了基于单源场路由的无环路特性。

在物理学中,热能从温度较高的地方传导到温度较低的地方,在热源持续不断的情况下形成稳态温度场,稳态温度场中不同物体根据距离热源远近的不同形成不同的温度,温度梯度代表着温度传导的方向和变化的速率。受物理学中热传导形成温度场的启发,本文将CCN模拟为温度场,内容源为热源,具有最高的温度,其他节点的温度由热源形成的稳态温度场计算得出,兴趣分组沿着温度场中最陡温度梯度的方向转发,直到内容源,内容源可以是内容缓存节点也可以是内容原始提供节点。温度场中每个节点的温度只跟自己直接相连的邻居节点有关,节点温度的计算完全不受网络规模和内容源数量的影响。鉴于内容缓存节点有限的处理能力和网络负载均衡的需要,在设定

内容缓存节点的温度时,要考虑到节点本身的处理能力;在计算温度场中非内容源节点的温度时,要同时考虑节点自身的处理能力和热源传导形成的温度两部分。为此,定义节点 n 的拥塞度如下:

$$\Phi_n = \frac{spare_n}{total_n} \quad (1)$$

其中, $spare_n$ 表示节点 n 的空闲处理能力, $total_n$ 表示节点 n 总的处理能力。TFBR算法兼顾内容源的温度和节点自身的拥塞度,在保证快速获取内容的同时达到了网络流量自动负载均衡的效果,最大限度地发挥了网络的性能。

图1给出了基于温度场路由的图形化示例。节点R3和R5为某内容的缓存节点,缓存节点的温度分别为 T_3 和 T_5 ,形成稳定温度场以后,节点R1、R2和R4的温度分别为 T_1 、 T_2 和 T_4 ,且 $T_1 < T_2 < T_4$ 。因此,当节点R1发出该内容的请求兴趣分组时,选择邻居节点中温度最高的进行转发,兴趣分组转发到R4,R4先查找自己是否缓存该内容,如果没有,再选择自己与该内容相关的邻居节点中温度最高的节点进行转发,到达内容缓存节点R5,R5响应该兴趣分组并向节点R1发送该内容。

3.2 基于温度场的路由算法

以有向无环图 $G=(V,E)$ 表示网络, V 代表节点的集合, E 表示节点之间链路的集合,节点之间的链路是对称的,每个节点 v 都有一个邻居节点集合 $Z(v)$,其中 $v \in V$ 。在自然界中,热能通过热传导形成温度场,稳态温度场由泊松方程表示,泊松方程在物理学中代表着自然稳定的状态,泊松方程如式(2)所示。其中 T 代表温度, λ 表示热传导系数, $\bar{Q}$ 表示物体内部热源密度。

$$\nabla^2 T = -\frac{\bar{Q}}{\lambda} \quad (2)$$

为了将温度场的特性映射到网络拓扑中,假设内容节

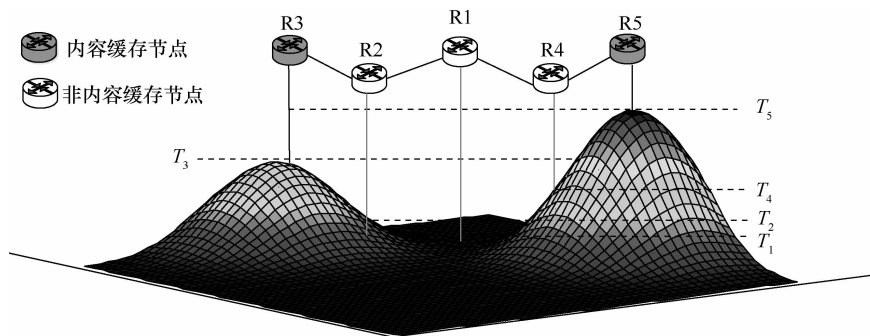


图1 基于温度场路由的图形化示例

点(缓存节点和原始提供节点)为热源,其他节点为温度场中的粒子,粒子的温度根据热源形成的温度场计算得出。为此,需要首先定义热源的温度,热源温度的定义要同时体现内容温度和节点拥塞度;然后求解其他节点的温度,节点温度是在稳态温度场的假设下采用有限元法进行求解的;最后在所有节点温度已知的前提下构建和维持稳态温度场。

3.2.1 热源温度定义

初始状态下,非内容节点温度被置为零,内容节点的温度定义如式(3)所示。在式(3)中, T 表示内容本身的温度,可以设置为固定值; Φ_n 代表内容缓存节点的拥塞度,已在式(1)中进行了定义。作为热源,一方面,内容节点的温度要预先设定,这样才能形成温度场;另一方面,CCN中具有多个缓存节点,每个节点的处理能力都是有限的,因此需要在多个内容缓存节点之间进行负载均衡,以保证内容请求的快速响应。通过使用节点拥塞度对内容节点温度进行定义,内容请求能够自动沿着温度场到达当前处理能力最强的内容缓存节点。

$$T_n = \Phi_n T \quad (3)$$

以上只是给出了热源节点温度的一种定义方法,实际应用中可以根据需要为内容节点定义其他有意义的温度值,如节点输出链路速率大小等。通过定义具有自己专属意义的热源温度值来获得自己所需服务质量的内容。初始状态下,完成热源节点的温度定义以后,需要在稳态温度场的假设条件下求解其他节点的稳态温度值,以构建整个稳态温度场。

3.2.2 稳态温度场求解

由于稳态温度场是受泊松方程控制的,为了求解稳态温度场中节点的温度,需要求解泊松方程。泊松方程为偏微分方程,一般采用有限元法^[13,14]进行近似求解。有限元法是一种求解微分方程组或积分方程组数值解的数值技术,其主要思想是用有限元的代数方程解近似表示微分方程的解,这一解法基于完全消除微分方程,即将微分方程转化为代数方程组(稳定情形)或将偏微分方程改写为常微分方程的逼近,这样就可以用标准的数值技术求解。根据有限元模型,每个节点都可以基于邻居节点构建有限元。如图2所示,节点 v 和 m 个邻居节点可以分解为 m 个有限元 $E_{0,v}, E_{1,v}, \dots, E_{k,v}, E_{k+1,v}, \dots, E_{m-1,v}, T_v(x_v, y_v)$ 表示节点 v 的温度, $T_{k,v}(x_{k,v}, y_{k,v})$ 表示邻居节点的温度, (x_v, y_v) 表示节点 v 在真实空间中的位置, $\vec{r}_{k,v}$ 表示节点 v 和第 k 个邻居节点之间的

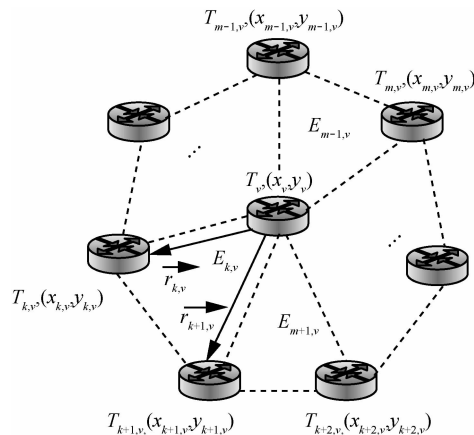


图2 节点有限元分解模型

位置向量。采用参考文献[13,14]中给出的泊松方程典型的有限元表达式,可以得出节点 v 的温度和有限元 $E_{k,v}$ 之间的关系如式(4)所示。

$$T(v) \|\vec{r}_{k,v} - \vec{r}_{k+1,v}\|^2 = (T_{k+1,v} \vec{r}_{k,v} - T_{k,v} \vec{r}_{k+1,v}) (\vec{r}_{k,v} - \vec{r}_{k+1,v}) + \frac{1}{\lambda} \Delta_k \bar{Q}(v) \quad (4)$$

其中, Δ_k 表示节点内部热源对单个有限元的影响,节点内部热源对所有有限元的影响之和为1。为模拟温度场,用节点拥塞度 Φ_v 代表节点内部热源密度 $\bar{Q}$,对所有有限元求和,可以得出节点 v 的温度 $T(v)$ 的表达式,如式(5)所示。

$$T(v) = \frac{\left\{ \sum_{k=0}^{m-1} (T_{k+1,v} \vec{r}_{k,v} - T_{k,v} \vec{r}_{k+1,v}) (\vec{r}_{k,v} - \vec{r}_{k+1,v}) + \frac{1}{\lambda} \Phi_v \right\}}{\|\vec{r}_{k,v} - \vec{r}_{k+1,v}\|^2} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,节点温度由两部分组成,一部分是由于邻居节点温度的影响而产生的温度,另一部分是由于节点本身拥塞度的影响。在实际网络中,节点的位置和节点之间的位置向量比较难度量,而且这两个量在网络中意义不大。因此,根据式(5),在计算节点的温度值时可以用节点之间具有实际物理意义的值(如链路代价、链路拥塞等)代替位置向量。这不仅可以避免度量节点位置和节点之间位置向量产生的额外开销,也可以使得温度的计算更加符合网络的特点。根据式(5),每个节点需要周期性地迭代独立计算自身的温度值,经过几次迭代计算过程以后,温度场能够汇聚到一个相对稳定的状态^[15]。

3.2.3 温度场的构建和维持

一旦稳态温度场建立以后,内容请求兴趣分组以逐跳



转发的方式到达内容节点,每跳都转发到温度最高的邻居节点,形成最陡梯度路由。为了构建和维持稳态温度场,每个节点需要周期性向邻居节点广播自己的温度值,所有节点都建立和保持一个邻居节点温度表,记录所有邻居节点的温度,温度表中表项包括 IP 地址、上次通告温度和通告时间戳。当有新节点加入、离开或节点温度值改变时,所有节点都需要根据式(5)重新计算本节点温度。为了减少不必要的路由扰动,为每个节点的温度值都设定一个计算触发门限,节点收到邻居节点的温度值以后,首先判断邻居节点相邻两个周期的温度改变是否大于门限,如果有邻居节点的温度改变大于计算触发门限,则根据式(5)计算本节点温度,否则只更新邻居节点温度。TFBR 计算路由由节点温度的算法流程如算法 1 所示。

算法 1 温度场构建算法。

$T = t_{\text{threshold}}$

$z_k = [t_0, t_1, \dots, t_m]$

$z_{k+1} = [t_0, t_1, \dots, t_m]$

$i = 0$

while $i < m$ do

if $|z_k[i] - z_{k+1}[i]| > T$

break

else

$i++$

end while

if $i < m \mid \text{num}(z_k) \neq \text{num}(z_{k+1})$

$v = \text{spare}_v / \text{total}_v$

$$t_v = \frac{\left\{ \sum_{i=0}^{m-1} (z_{k+1}[i+1] \vec{r}_{i,v} - z_k[i] \vec{r}_{i+1,v}) (\vec{r}_{i,v} - \vec{r}_{i+1,v}) + \frac{1}{\lambda} \Phi_v \right\}}{\|\vec{r}_{i,v} - \vec{r}_{i+1,v}\|^2}$$

end

3.3 性能分析

随着网络规模和内容数量的不断增大以及网络和内容的动态变化特性越来越明显,CCN 对路由算法的要求越来越高,要求路由算法具有良好的可扩展性和顽健性,能够适应网络变化快速收敛。本节从可扩展性、收敛性和顽健性 3 个方面对 TFBR 算法进行分析,说明 TFBR 算法能够很好地满足 CCN 的需求。

一方面,从温度场的构建算法可知,TFBR 算法中节点温度的计算仅仅依赖直接邻居节点的温度信息,算法的计

算复杂度与邻居节点的数量成正比;另一方面,TFBR 算法是一种分布式算法,只需邻居节点之间交换信息就能维持路由协议的正常运行,能够很好地适应网络规模的不断增大,具有良好的扩展性。而关于收敛性的问题,参考文献[15]对基于有限元模型的分布式迭代方法的收敛性进行了分析和证明,基于有限元模型的分布式迭代方法能够快速收敛到稳定状态。因此,基于有限元模型的 TFBR 算法也具有较好的收敛性能。另外,在 TFBR 算法中,路由节点记录了多个邻居节点的温度值,天然地存在多条路径到达内容源,不仅很容易实现多径传输,而且,当具有最高温度值的邻居节点出现故障时,还能够快速地切换到具有次高温度的邻居节点,通过冗余的邻居节点温度信息实现了较好的顽健性。

4 性能仿真

为了评估 TFBR 算法的有效性,本节从网络平均时延性能、缓存命中比例和负载均衡性能 3 个方面对 TFBR 算法进行了实验仿真。为便于对比分析,在相同的实验设置条件下同时对 PBR^[9]和 OSPFN^[16]算法进行了仿真。OSPFN 是 OSPF 路由协议经过拓展以后应用到 CCN 中的路由协议,目前,已经部署到 CCN 的实验床中,是 CCN 正在应用的路由协议。

4.1 实验环境

为了验证 TFBR 算法的性能,本文采用 ndnSIM^[17]分别对 TFBR、PBR 和 OSPFN 中所使用的路由算法的平均网络时延性能、缓存命中比例和链路利用率进行了仿真实验。ndnSIM 是基于 NS-3^[18]开发的针对 CCN 的仿真平台,实现了 CCN 的基本协议和要素。用户可以根据自己的需要使用 ndnSIM 仿真不同的应用场景,也可以实现自己的路由算法和转发策略进行仿真验证。

在本次实验中,实验验证环境采用具有 14 个节点 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 3 所示。NSFNET 拓扑中每条边上的数字代表相邻节点实际的物理距离。实验仿真时,链路带宽设置为 100 Mbit/s,链路时延为 10 ms,分别采用 3 种路由算法计算内容获取的最优路径,按照计算获得的转发表转发兴趣分组和数据分组验证路由算法的实际性能。

实验环境设置如下:图 3 中节点 14 为内容提供节点,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报文服从泊松到达特性,平均发送速率为每秒 10 个

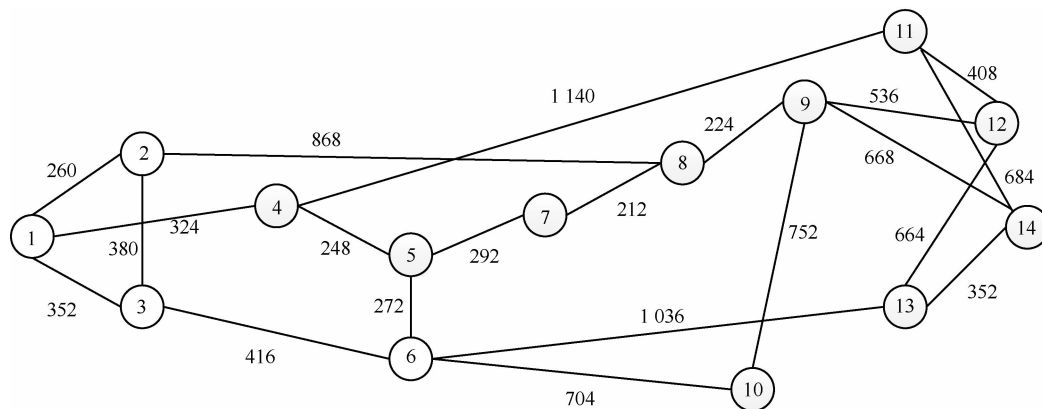


图 3 美国科学基金骨干网络拓扑结构

报文,内容提供节点共存储有 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。节点最多能够缓存 100 个内容,即节点 CS 表大小为 100,CS 表的缓存替换策略为 LRU (least recently used) 替换。PBR 算法中势能场的构建范围为 3 跳,仿真时间设定为 30 s。

4.2 网络平均时延

网络平均时延反映了网络的整体时延性能,是某一时刻各个节点从发送兴趣分组到收到数据分组之间时延的平均值。网络平均时延性能的大小直接决定了路由算法性能的优劣。为了进行对比分析,本文在同一种网络拓扑结构下分别对 OSPFN、PBR 和 TFBR 算法下的网络平均时延性能进行了实验仿真,仿真结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,TFBR 算法的网络平均时延性能优于 OSPFN 和 PBR 算法。与 OSPFN 和 PBR 路由算法,TFBR 算法降低了约 10% 的网络平均时延,这是因为 TFBR 路由算法统筹考

虑内容节点(包括原始内容节点和内容缓存节点)建立稳态的温度场,内容请求直接到达最近的内容缓存节点,降低了内容请求发送的平均距离和网络整体流量;而且,内容节点温度的设定同时考虑到节点利用率的大小,有效地均衡了网络流量,进一步降低了网络平均时延。

4.3 缓存命中比例

缓存命中比例是指由内容缓存响应的内容请求与总的内容请求之比,反映了网络对缓存的利用情况。缓存命中比例越高,说明网络路由算法对缓存的利用越好,越能发挥 CCN 的优势。

图 5 给出了同一种网络拓扑下 3 种路由算法的缓存命中比例随着内容请求数量的增加变化的情况。从图 5 中可以看出,TFBR 算法的缓存命中比例明显高于 OSPFN 和 PBR 算法。相比于 OSPFN 算法和 PBR 算法,TFBR 算法的缓存命中比例分别提高了 35.4% 和 3.76%。这是因为,OSPFN 算法只考虑到到达原始内容节点的最短路径上的内容缓存情况;而 PBR 算法为降低势能场的构建开销,将势

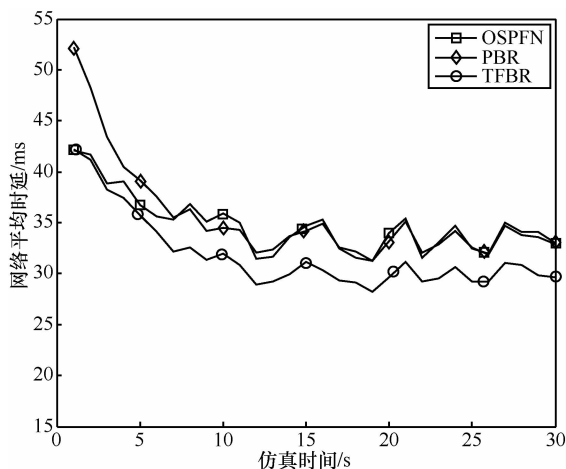


图 4 网络平均时延性能

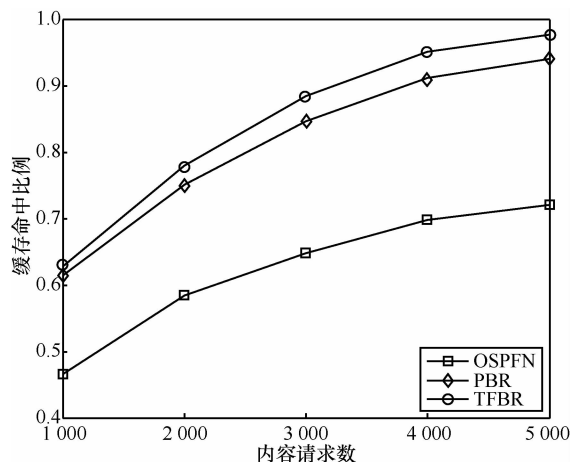


图 5 缓存命中比例性能



能场的构建范围限定为3跳,虽然能显著提高缓存命中比例,但仍然低于稳态温度场中缓存的命中比例。

4.4 负载均衡性能

负载均衡包括节点的负载均衡和链路的负载均衡,缓存命中比例在一定长度上反映了节点的负载均衡性能。本节从链路利用率的角度对3种路由算法的链路负载均衡性能进行实验分析,链路利用率定义为一段时间内经过该链路的流量与链路总带宽之比。为了便于分析,实验只测量了3种路由算法下各自链路流量排名前十的链路利用率情况。

图6给出了3种路由算法下流量排名前十的链路利用率对比情况。从图6中可以看出,TFBR算法的流量排名前十的链路利用率更加平均。在构建稳态温度场的同时考虑整个网络范围的内容缓存和节点剩余处理能力。TFBR算法有效地将网络流量均衡分布于整个网络之中。而PBR算法在构建势能场时广播到3跳范围内的邻居节点,链路的负载均衡性能相比于OSPFN算法也有明显的提高。

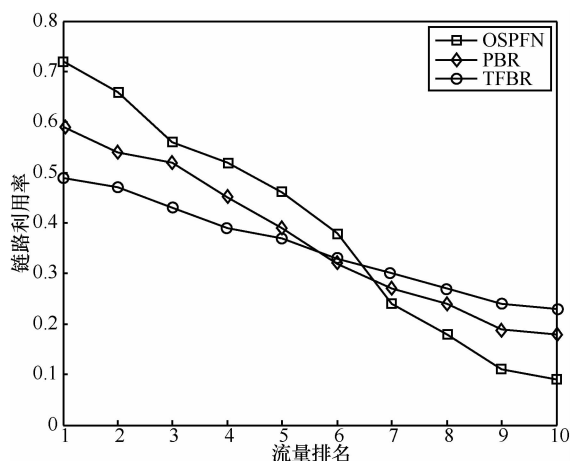


图6 链路利用率性能

5 结束语

本文以最大限度发挥CCN的性能为出发点,同时兼顾顽健性和可扩展性的要求,设计了一种针对CCN的基于温度场的路由算法——TFBR算法。TFBR算法综合考虑原始内容节点和内容缓存节点构建温度场,并采用有限元法求解稳态温度场,形成路由转发决策。在保证快速获取内容的同时,达到了网络流量自动负载均衡的效果,最大限度地发挥了网络的性能。同时,TFBR算法是一种分布式算法,能够很好地适应网络规模的不断增大,具有良好的扩展性。当最高温度值的邻居节点出现故障

时,还能够快速地切换到次高温度的邻居节点,通过冗余的邻居节点温度信息实现了较好的顽健性。实验结果表明,TFBR算法能够充分利用CCN中的路由节点缓存功能,在降低网络平均时延性能的同时,提高了CCN的负载均衡性能。

参考文献

- 1 Pallis G, Vakali A. Insight and perspectives for content delivery networks. *Communications of the ACM*, 2006, 49(1): 101~106
- 2 Dannewitz C. NetInf: an information-centric design for the future internet. *Proceedings of the 3rd GI/ITG KuVS Workshop on the Future Internet*, Munich, Germany, 2009
- 3 Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, *et al.* Networking named content. *Proceedings of International Conference on Emerging Networking Experiment & Technologies*, Rome, Italy, 2009
- 4 Named Data Networking(NDN)Project, 2010
- 5 Bari M F, Chowdhury S, Ahmed R, *et al.* A survey of naming and routing in information centric networks. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(12): 44~53
- 6 Lee M, Cho K, Park K, *et al.* SCAN: scalable content routing for content-aware networking. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Kyoto, Japan, 2011
- 7 UI Haque M, Willig A, Pawlikowski K, *et al.* Name-based routing for information centric future internet architectures. *Proceedings of International Conference on Ubiquitous and Future Networks*, Da Nang, Vietnam, 2013: 517~522
- 8 Shanbhag S, Schwan N, Rimac I, *et al.* SoCCeR: services over content-centric routing. *Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking*, Toronto, Canada, 2011: 62~67
- 9 Eum S, Nakauchi K, Murata M, *et al.* CATT: potential based routing with content caching for ICN. *Proceedings of the SIGCOMM 2012 ICN Workshop*, Helsinki, Finland, 2012
- 10 Jung S, Kserawi M, Lee D, *et al.* Distributed potential field based routing and autonomous load balancing for wireless mesh networks. *Communications Letters*, 2009, 13(6): 429~431
- 11 Toupis S. Mother nature knows best: a survey of recent results on wireless networks based on analogies with physics. *Computer Networks*, 2008, 52(2): 360~383
- 12 Basu A, Lin A, Ramanathan S. Routing using potentials: a dynamic traffic-aware routing algorithm. *Proceedings of ACM SIGCOMM*, Karlsruhe, Germany, 2003

- 13 Segerlind L J. Applied finite element analysis. Wiley, 1984, 109(3): 357
- 14 Volakis, John L, Chatterjee A, *et al.* Finite Element Method for Electromagnetics. Oxford: Oxford University Press, 1998
- 15 Li Z, Reed M B. Convergence analysis for an element-by-element finite element method. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 1995(123): 33~42
- 16 Wang L, Hoque A, Yi C, *et al.* OSPFN: an OSPF based routing protocol for named data networking. Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications Workshops, Orlando, Florida, USA, 2012
- 17 Afanasyev A, Moiseenko I, Zhang L. ndnSIM: NDN simulator for NS-3. PARC Technical Report, 2012
- 18 ns-3 project website. <http://www.nsnam.org/>, 2015

[作者简介]



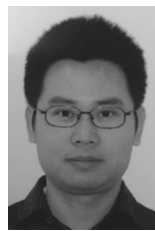
刘宗海,男,国家数字交换系统工程技术研究中心高级工程师,主要研究方向为新型网络体系及技术。



王鹏,男,博士,国家数字交换系统工程技术研究中心助理研究员,主要研究方向为新型网络体系结构、软件定义网络技术。



张校辉,男,博士,国家数字交换系统工程技术研究中心讲师,主要研究方向为软件定义网络技术。



金飞,男,中兴通讯股份有限公司工程师,主要研究方向为软件定义网络、新型IP 网络技术等。