

# 基于复杂网络内容场的 ICN 能效优化策略

赵 磊 周金和

(北京信息科技大学信息与通信工程学院 北京 100101)

**摘 要** 目前的网络体系结构依然采用基于位置的端到端通信,随着网络数据、负载的迅速增长,由于传统的 TCP/IP 网络体系结构存在诸多问题(如互联网的传输效率低、实时处理数据的能力低下等),主要体现在网络的用户服务质量得不到保证、网络能耗大等方面,信息中心网络(Information-Centric Networking, ICN)将成为下一代互联网体系结构的研究热点。文中利用复杂网络对 ICN 进行建模,提出了一种基于内容场的能效优化策略(CFS)。该策略根据邻居节点的内容场场强大小寻找最佳路径,并利用所提的基于内容流行度的缓存策略决定是否在请求路径上进行内容缓存,缓存策略同时考虑了内容热度以及内容与用户之间的距离。仿真结果表明,与现有 ICN 策略相比,CFS 在网络吞吐量、平均请求时延、网络平均能耗以及数据包分布情况方面都具有相对的优势,特别是当网络具有较大数据量时,该算法将优先选择距离内容近且通畅的路径,表现更加优秀。

**关键词** 信息中心网络,内容场,复杂网络,路由算法,缓存策略,能效优化

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.09.019

## ICN Energy Efficiency Optimization Strategy Based on Content Field of Complex Networks

ZHAO Lei ZHOU Jin-he

(School of Information Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China)

**Abstract** The current network architecture still adopts end-to-end communication based on location. With the rapid growth of network data and load, there are many problems in the traditional TCP/IP network architecture, such as the low transmission efficiency of the Internet and the low ability of real-time data processing, which are mainly reflected in the lack of guaranteed quality of service for network users, large network energy consumption, etc. Information-Centric Networking (ICN) will become the research hotspot of the next generation Internet architecture. This paper used complex networks to model ICN, and proposed a content-field-based energy efficiency optimization strategy (CFS) to find the best path according to the content field strength of neighbor nodes, and decide whether to cache content on request path by using the proposed caching strategy based on content popularity. The caching strategy takes into account both the content popularity and the distance among users. The simulation results show that compared with the existing ICN strategies, CFS has relative advantages in network throughput, average request delay, average network energy consumption and data packet distribution, especially when the network has a large amount of data, because this algorithm will choose the path close to the content and with low congestion firstly, and its performance is more outstanding.

**Keywords** Information center network, Content field, Complex networks, Routing algorithms, Caching strategy, Optimization of energy efficiency

## 1 引言

思科的视觉网络指数预测全球移动数据流量在 2015—2020 年间将增长 8 倍, 互联网的视频和语音流量将增长 4 倍<sup>[1]</sup>, 随着互联网的数据量(特别是语音和视频的业务量)的激增, 传统 TCP/IP 网络体系结构的服务质量已经逐渐无法满足用户的需求, 主要体现在网络资源利用低、传输效率低、时延大、能耗高等方面。人们开始根据未来网络的传输特点设计新的网络体系架构, 因此 ICN 应运而生。ICN 的典型代

表有 Content-Centric Networking (CCN), Publish-Subscribe Internet Routing Paradigm (PSIRP), Network of Information (NetInf), Data-Oriented Network Architecture (DONA)。它们共同的特点都是将内容与位置相剥离, 将互联网从基于主机的通信模式转变为以内容为中心的模式, 将内容的名字作为网络传输数据的唯一标识, 无需 IP 地址进行定位, 解决了传统网络 IP 地址有限等问题。其中, ICN 的一个重要特性是支持路由器的内容缓存, 除了内容发布者(内容管理器)可以发布内容外, 具有存储功能的路由器可以缓存内容, 这种分布

到稿日期: 2018-10-17 返修日期: 2019-01-11 本文受国家自然科学基金项目(61872044)资助。

赵 磊(1994—), 男, 硕士生, 主要研究方向为绿色网络, E-mail: 1227630171@qq.com; 周金和(1966—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为绿色网络与通信, E-mail: zhoujinhe@bistu.edu.cn(通信作者)。

式缓存可以带来很多优点:由于缓存的内容更接近用户,可以使用户得到更低的时延体验;与此同时,可以降低网络的传输能耗与拥塞程度<sup>[2-4]</sup>。

ICN 的主要挑战的是设计高效、合理的路由和缓存策略,可以使用户以最好的用户体验获取内容。文献[5]将内容势场和 ICN 相结合,提出了一种基于势场的 ICN 路由策略(PBR);文献[6]提出了一种适用于 ICN 的特征时间路由(CTR),为每个请求节点记录请求过的内容路径信息,并设置信息的保存时长,实现对缓存内容的高效利用;文献[7]提出了一种具有内容空间分区和散列路由的协作网络内缓存方案(CPHR),以有效约束散列路由产生的路径拉伸,当兴趣包抵达路由器时,通过散列函数决定哪个路由器可以提供需要的内容,在一定程度上提高了请求的命中率;文献[8]根据内容的流行度分布以及用户的请求服从 Zipf 分布,将用户访问最多的(流行度高)内容缓存至用户节点附近,同时尽可能让更多不同的内容分布在路径上,可以有效减少用户请求时延和请求跳数;文献[9]提出了一种 ICN 下的最佳协作路由策略(OCRP),该策略在流守恒约束、缓存争用约束以及路径长度约束下可使每个请求传输路径的代价函数最小,代价函数主要与链路的带宽、时延以及路由器的缓存空间有关,可以在一定程度上提高传输性能和缓存利用率。

自从人们发现了复杂网络的小世界以及无标度特性,针对复杂网络的研究逐渐成为了人们的研究热点,它被广泛应用于互联网、交通、生物、物理等领域<sup>[10-11]</sup>,人们开始利用复杂网络的结构特性和功能特性之间的关系优化现实的网络性能,如提高网络吞吐量和缓解网络拥塞状况等。由于互联网符合复杂网络中的无标度特性,因此可以考虑利用复杂网络的无标度特点来优化网络传输,可以从优化网络拓扑结构和设计高效的路由算法两方面考虑。有研究证明,网络的吞吐量与网络中的最大介数呈反比关系,即若网络的最大介数越小,则网络的吞吐量越大,由此,文献[12]提出了网络最大介数最小化的策略,通过减小网络的最大介数来提升网络的吞吐量。而对于一个已知网络,网络的节点数量和连接方式一般都是固定的,因此对于确定的网络这种方法有时并不适用。文献[13]利用复杂网络中无标度网络的结构特点,利用引力场对网络进行建模,采取合理的引力模型可以很大程度上缓解网络拥塞,提升网络吞吐量。

如今大多数对 ICN 的研究都是分开讨论路由与缓存策略的,而且绝大多数 ICN 采用的都是最简单的最短路由策略,把重点放在了缓存策略,随着网络规模以及网络流量的剧增,有时仅仅考虑缓存策略并不能满足用户的需求。本文将缓存内容看作点电荷  $Q$ <sup>[14]</sup>,传输数据包时优先选择距离内容近且通畅的路径,同时在请求路径上根据缓存策略缓存流行度高的内容,在保证用户 QOS 的同时降低网络能耗,达到网络传输和缓存优化的目的。

## 2 ICN 概述

### 2.1 ICN 传统路由转发机制

ICN 中每个路由器节点需要维护 3 张数据结构表:内容存储表(Content Store,CS)、待定信息表(Pending Information

Table,PIT)以及信息转发表(Forwarding Information Base,FIB)。其中 CS 表用于存储经过该节点的内容,PIT 表用于记录用户的上行请求信息,如请求数据包名称和请求入口等,FIB 表为请求提供转发接口和路由信息。

ICN 路由的转发过程如图 1 所示。用户发出请求信息后,首先查找邻居节点的 CS 表项,若存在用户需要的内容,则直接将内容返回给用户,否则继续查找 PIT 表,根据最长内容名称匹配原则进行查找,若 PIT 中已经存在与请求数据相同的内容,则只需将请求接口添加至 PIT 表项,否则继续查找 FIB 表项,根据提供的转发接口转发兴趣包,与此同时将请求信息以及请求接口添加至 PIT 表。对于传统的 ICN 路由转发机制,一般会采用查表的方式找到转发接口,而且绝大多数采用的都是最简单的最短路径路由算法进行内容定位。

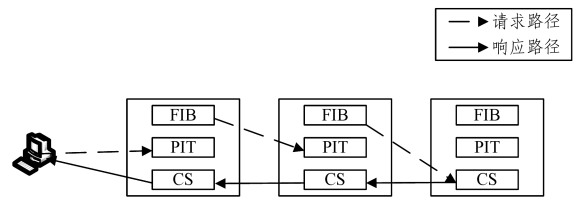


图 1 ICN 路由转发机制

Fig. 1 ICN routing and forwarding mechanism

### 2.2 ICN 传统缓存策略

在 ICN 中一个重要的特性就是每个路由器都具有缓存功能,此后该路由器同样可以为请求者提供内容副本,而请求数据包无需从较远的内容源获取信息,这样可以在一定程度上降低网络的请求时延以及服务器被请求的数量。因此,合理的缓存策略可以提高网络的内容分发效率,在提高用户服务质量的同时尽可能降低网络的开销;相反,不合理的网络缓存策略不仅空间利用率低下,而且用户的服务质量同样得不到保证。

LCE<sup>[15]</sup>(Leave Copy Everywhere)在请求路径上的每一个节点都缓存用户请求的内容,这种缓存方式可能会造成大量的资源浪费,网络中会存在大部分冗余内容。LCD<sup>[16]</sup>(Leave Copy Down)在请求抵达内容缓存时,会在当前节点的第一个下游节点缓存命中的内容,需要多次对同一内容多次请求才会逐渐将内容复制到用户附近,潜在考虑了内容的访问频率。MCD<sup>[16]</sup>(Move Copy Down)在缓存命中后,将缓存节点的内容复制到下游节点,并在 LCD 的基础上删除了命中节点的缓存内容,相比 LCD 进一步减少了缓存的冗余。但是 LCD 和 MCD 的前期表现往往不佳,需要消耗一定的时间来提高性能。ProbCache<sup>[17]</sup>(Probabilistic Cache)以一定的概率对内容进行缓存,而且此概率值会随着内容到内容服务器距离的增加而增加。但是此种缓存策略没有考虑当前内容的热度,然而人们总是希望将热度高的内容缓存至离用户近的位置。

### 2.3 基于内容场的路由转发机制

对于传统以及现在的 ICN 体系架构,绝大多数都会采用最简单的最短路由策略,将主要的精力放在优化缓存策略上;但是对于传统的最短路径路由策略,虽然它们的应用最为广泛,但是这种策略总是选择距离目的节点最短的路径,而不考

虑节点拥塞状况,由于通过介数较大节点的最短路径数目多,这就导致介数大的节点首先发生拥塞,然后逐渐蔓延到整个网络,使整个网络由自由流通状态转变为拥塞状态,此时网络吞吐量急剧减小,网络时延和网络平均能耗也随之上升。而且最短路径路由算法一旦使得网络进入拥塞状态,网络也很难恢复自由流通状态。因此,最短路径路由算法在数据量较大时是不适用于 ICN 网络的。如果可以在网络数据量较小时采用最短路径算法,那么当网络数据量达到一定值后,能够在分析路径长度的同时将每个节点的拥塞程度考虑在内,并避开那些拥塞概率大(介数较大)的节点为每个节点定义一个基于内容的势点强度,当前节点根据邻居节点的势点强度选择最大势点强度的邻居节点作为下一跳节点,如图 2 所示。

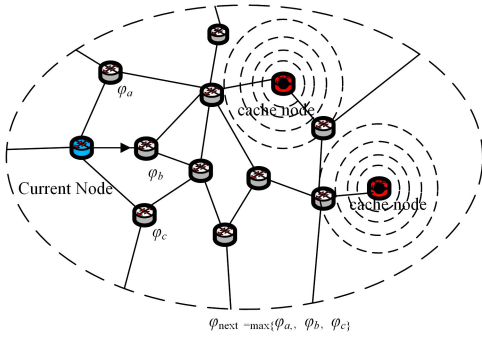


图 2 内容场路由示意图

Fig. 2 Diagram of content field routing

由此,本文在最短路径算法的基础上进行了改进。ICN 网络根据一定的缓存策略选择合理的节点进行内容缓存,以缓存节点为中心形成内容场,其中缓存节点定义为含有请求内容的节点, $m$  代表具有相同缓存内容的节点的个数,这些节点分别用  $(n_c^1, n_c^2, \dots, n_c^m)$  表示,然后每个节点根据邻居节点场强大小进行路由,其中节点的场强大小和节点到达内容的距离及节点拥塞程度等有关。将 ICN 网络定义为一个无向图,并将网络的节点分成缓存节点和请求节点两部分,对于单一缓存节点,每个节点的场强具体定义为:

$$\varphi_n = \begin{cases} Q_{n_c}, & n = n_c^j \\ \frac{Q_{n_c} (c_n)^\alpha}{(d_{n n_c} + 1) B(n)^\beta}, & n \neq n_c \wedge q_n = 0 \\ \frac{Q_{n_c} (\frac{c_n}{q_n})^\alpha}{(d_{n n_c} + 1) B(n)^\beta}, & n \neq n_c \wedge q_n \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$B(n) = \sum_{s \neq t} \frac{\sigma_{st}(n)}{\sigma_{st}} \quad (2)$$

可以将缓存节点看作中心点电荷  $Q$ ,缓存节点的场强大小为  $Q_{n_c}$ , $Q_{n_c}$  的大小与缓存节点的内容数量和缓存节点可以接收的访问数量成正比。 $Q_{n_c}$  越大说明该缓存节点可以提供的内容质量越高,可以接收的请求数量越多。与电场不同,此时数据包只能沿着网络的边移动。 $B(n)$  为复杂网络的统计特性介数; $\sigma_{st}$  表示节点  $s$  到节点  $t$  的最短路径数目; $\sigma_{st}(n)$  表示节点  $s$  到节点  $t$  的最短路径中经过节点  $n$  的数目,在复杂网络中,节点的介数越大,数据包经过该点的概率越大; $d_{n n_c}$  表示当前节点到缓存节点的最短路径距离; $c_n$  表示当前节点的数据包处理能力; $q_n$  代表当前节点的缓存队列长度; $\frac{c_n}{q_n}$

示节点的通畅程度,该值越大,说明当前节点越通畅。 $\alpha$  和  $\beta$  相当于调节因子,分别调节对于拥塞程度和路径长度的依赖程度。当网络中存在多个缓存节点时,每个节点的场强定义如下:

$$\varphi_n = \begin{cases} Q_{n_c^i} + \sum_{n_c \neq n_c^i} \frac{Q_{n_c^i}}{d_{n n_c} + 1}, & n = n_c^i \\ \sum_{j=1}^m \frac{Q_{n_c^j} (c_n)^\alpha}{(d_{n n_c^j} + 1) B(n)^\beta}, & n \neq n_c \wedge q_n \neq 0 \\ \sum_{j=1}^m \frac{Q_{n_c^j} (\frac{c_n}{q_n})^\alpha}{(d_{n n_c^j} + 1) B(n)^\beta}, & n \neq n_c \wedge q_n = 0 \end{cases} \quad (3)$$

当  $m=1$  时的情况如式(1)所示,当  $m>1$  时的情况如式(2)所示,此时某个节点的场强强度是多个缓存节点的场作用和。请求总是沿着场强最大的方向传播,直到到达缓存内容的节点。对于下一跳  $next(n)$ ,其会选择当前节点的邻居节点集合  $NB(n)$  中场强最大的节点:

$$next(n) = x : [\text{Max } \varphi_x \mid \forall x \in NB(n)] \quad (4)$$

当请求到达节点  $n$  时,节点  $n$  会根据式(3)选择下一跳节点,以此类推,直到到达内容缓存节点,缓存内容通过请求路径原路返回给用户,其中  $next(n)$  下一跳节点由邻居节点的最大场强  $\varphi_x$  决定, $NB(n)$  为当前节点的邻居节点集合,请求数据包将当前节点的数据包发送给邻居节点集合中场强最大的节点。

#### 2.4 基于内容流行度的 ICN 缓存策略

基于内容场的路由转发机制在对内容请求进行路由的同时会在沿路返回的某些节点以一定的概率进行内容的缓存。一般而言,节点都倾向于存储那些流行度高(被请求次数多的内容)、距离用户近的内容,这样可以降低网络的响应时延。将节点  $n$  的缓存内容  $c$  的概率具体表示为:

$$P_{(n,c)} = \frac{n_{(req,c)}}{n_{(req,sum)}} \cdot \frac{h_{(n,s)}}{h_{(u,s)}} \cdot \frac{f_n}{f_{sum}} \quad (5)$$

其中, $P_{(n,c)}$  代表内容  $c$  在节点  $n$  缓存的概率。 $n_{(req,c)}$ 、 $n_{(req,sum)}$  分别代表内容  $c$  和所有内容被请求的次数, $n_{(req,c)}$  可以一定程度地体现内容的流行度,该值越大说明内容  $c$  的热度越高。 $h_{(n,s)}$ 、 $h_{(u,s)}$  分别代表当前节点和用户请求节点与内容源节点之间的跳数, $h_{(n,s)}$  越大说明内容距离用户的位置越近。 $f_n$ 、 $f_{sum}$  分别表示经过当前节点  $n$  的请求次数和用户总的请求次数。

基于复杂网络内容场的具体路由与缓存过程如下所示。

1) 获取当前请求所在节点的邻居节点集合  $NB(n)$ ,查找每个邻居节点的 CS 表,若存在需要的内容则直接返回给用户,否则继续查找 PIT 表。

2) 查找 PIT 表中是否已经有请求数据的名字,若已经存在,则将请求接口添加至 PIT 表项,并丢弃兴趣包,否则继续查找 FIB 表项。

3) 根据式(1)和式(2)(若  $m=1$ ,根据式(1);若  $m>1$ ,根据式(2)),在 FIB 表中选取请求内容场强  $\varphi_n$  最大的节点转发兴趣包,并为 PIT 创建一个新的内容名称和请求接口。

4) 获取请求内容后沿原路返回,并在沿路节点按照式(5)进行缓存决策,确定缓存的节点并将内容名称添加至 CS 表项。

说明:当网络中的数据包量不大时,或者当网络处于流量低峰时,将式(1)和式(3)的调整因子 $\alpha$ 和 $\beta$ 设置为0,此时的路由转发机制近似等同于最短路由策略;而当网络处于流量高峰时,可以将 $\alpha$ 和 $\beta$ 设置为可行域范围内的数值,可以有效缓解网络拥塞,增加网络吞吐量,降低网络响应时延。

### 3 网络流量模型及网络性能评价指标

#### 3.1 网络流量模型

近年来的研究表明,互联网的增长以及度分布都表现为很强的无标度特性,Barabási-Albert (BA)无标度网络是一种介于规则网络和随机网络的网络模型,即新增加的节点更倾向于连接网络中度比较大的节点,这就导致了网络的无标度特性。由于ICN属于未来互联网体系架构,因此本文利用BA无标度网络对ICN进行网络仿真。假设所有的网络节点都具有收包和发包的功能,网络初始状态负载为0,每个请求产生 $R$ 个数据包并随机选取节点作为请求节点,每个节点在每个时间步最多可以处理 $c_i$ 个数据包,节点的缓存数据包队列长度没有限制,且采用先进先出的方式。每个节点将数据包发送给相应的邻居节点,若数据包已经到达内容缓存节点,则将数据包删除。

#### 3.2 网络评价指标

##### 3.2.1 有序状态参数

网络吞吐量是衡量一个网络性能的重要指标,随着网络发包速率 $R$ 的增加,网络中数据包的流通状态会从自由流通状态转变为拥塞状态,为了描述网络的吞吐量大小,为此引入有序状态参数<sup>[18]</sup>:

$$\eta(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{R} \frac{Q(t)}{t} \quad (6)$$

其中, $Q(t)$ 代表 $t$ 时刻网络中的数据包的停留量。 $R$ 为单位时间步产生的数据包数量,为了描述网络的吞吐量,定义相变临界值 $R_c$ ,当 $R \leq R_c$ 时, $\eta(R) = 0$ ;当 $R > R_c$ 时, $\eta(R)$ 迅速增大产生相变,网络从自由流通状态转变为拥塞状态。可将 $R_c$ 视为网络的吞吐量。

##### 3.2.2 ICN 能耗模型

随着网络流量的剧增,网络的能耗也不断增加,因此网络平均能耗值的大小也是衡量网络质量和路由策略好坏的关键指标。在ICN中,网络能量主要消耗在内容的缓存和传输上,将网络平均能耗定义为网络传输所有数据包花费的总能耗与请求数量的比值,即每次请求所消耗的能量,平均能耗越小,说明网络的节能效果越好。其中,网络的传输能耗采用基于速率的能耗模型<sup>[19]</sup>:

$$P_{n_i} = \begin{cases} 0, & v = 0 \\ \sigma + \mu v^\epsilon, & v > 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{L_{i,j}} = \begin{cases} 0, & v = 0 \\ \eta v^\mu, & v > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$E_{(n_i, L_{i,j})_{\text{总}}} = \sum_{i=0}^N \int_0^t P_{n_i} dt + \sum_{i=0, j \in \text{NB}(i)}^N \int_0^t P_{L_{i,j}} dt \quad (9)$$

其中, $P_{n_i}$ , $P_{L_{i,j}}$ 分别为某个节点和某条链路的功耗, $\sigma$ 为基础能耗, $v$ 为数据包的传输速率, $\epsilon$ 和 $\mu$ 为调节因子, $E_{(n_i, L_{i,j})_{\text{总}}}$ 为传输总能耗。

在ICN中,除了传输能耗以外,还有基于缓存策略产生的缓存能耗,具体定义如下:

$$E_{\text{cache总}} = n_c e_{\text{cache}} \quad (10)$$

其中, $n_c$ 表示需要缓存的内容数量, $e_{\text{cache}}$ 表示每个内容缓存所产生的能耗,这里忽略不同内容之间所产生的缓存能耗差别。

ICN的平均请求能耗为网络总能耗与用户请求数量的比值,具体定义为:

$$E_{n_i, L_{i,j}} = \frac{E_{(n_i, L_{i,j})_{\text{总}}} + E_{\text{cache总}}}{n_{\text{req}}} \quad (11)$$

### 4 算法验证及分析

由于互联网的无标度特性,本文采用networkx库构建复杂网络中的BA无标度网络以对ICN进行建模,假设网络节点数 $N=100$ , $m=m_0=2$ ,其中 $m_0$ 和 $m$ 分别代表初始节点个数以及生成网络时每次增加的节点个数,每个节点的数据包处理能力 $c=1$ ,如图3所示。其中3号节点设置为初始内容提供者。网络随机选取用户进行请求,并且请求模式服从Zipf分布,将 $\alpha$ 设置为2。

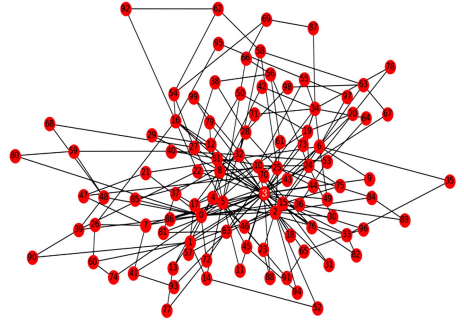


图3 网络拓扑图

Fig. 3 Network topology

为了证明本文提出的基于内容场的ICN优化策略优于其他ICN策略,将本文策略与LCE,LCD,OCRP几种策略进行了对比,结果如表1所列。

表1 策略对比

Table 1 Strategy comparison

策略名称	路由转发机制	缓存策略
LCE	Dijkstra 最短路路由	沿路处处缓存
LCD	Dijkstra 最短路路由	命中节点的第一个下游节点缓存
OCRP	协作路由	固定概率缓存
CFS	内容场路由	动态概率缓存

图4显示了随着网络数据包的增加,不同策略的 $\eta$ 变化趋势,其中LCE,LCD,ProbCache 3种策略底层采用的都是基于Dijkstra的最短路路由转发机制<sup>[20]</sup>,OCRP采用的是协作路由转发机制,而网络吞吐量在很大程度上取决于路由策略。图4(a)显示了在不同的参数下基于内容路由算法的吞吐量情况,可以看出当网络处于高峰期时,采用不同的 $\alpha$ 和 $\beta$ 不影响算法的表现情况。因此可以得出结论,如果调整因子 $\alpha$ 和 $\beta$ 在可行域范围内,则几乎不影响网络的性能,表明本文提出的策略较稳定。图4(b)中,从有序状态参数可以看出,最短路路由策略在 $R=6$ 之后开始发生相变,因此最短路路由策略的 $R_c=6$ ,而协作路由策略和内容路由策略的 $R_c$ 分别为16和23。也就是说,本文提出的内容路由在吞吐量方面也优于最短路路由策略和协作路由策略,即网络可以注入更多的数据包而不发生拥塞。

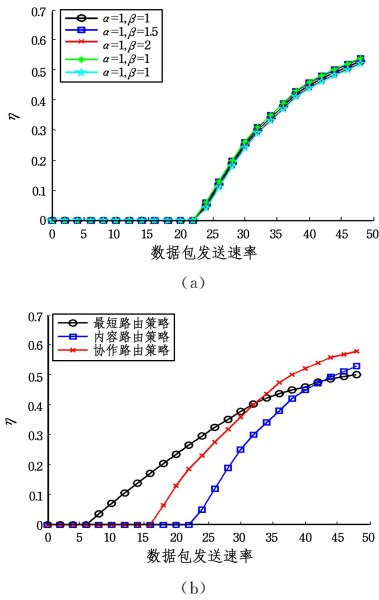


图 4 网络有序状态参数对比

Fig. 4 Comparison of network order parameters

图 5 显示了在不同的请求数量下,不同的 ICN 策略对应的平均请求时延,图 5(a)和图 5(b)分别对应不同的用户数据包发送速率,可以看出,随着请求数量的不断增加,每种策略的平均请求时延都呈下降趋势,最后达到相对稳定,而本文提出的 CFS 算法在平均响应时延上优于其他策略,特别是当用户数据包速率较大时,这是由于 CFS 在网络自由流通状态下采用了最短路由算法,随着网络请求数目的增加,该算法可以智能地选择距离内容较近且通畅的节点,同时将流行度高的内容放置离用户较近的位置。

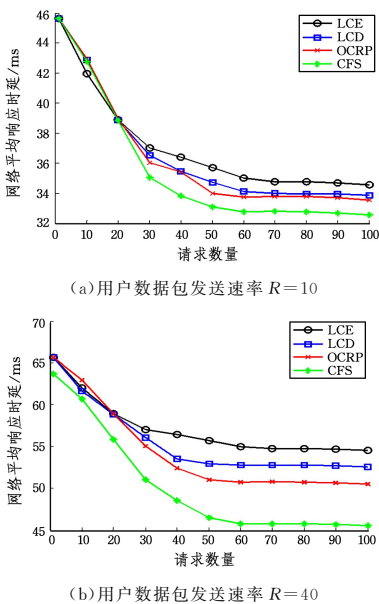


图 5 网络平均请求时延

Fig. 5 Network average request delay

图 6 显示了在不同的请求数量下,不同策略对应的网络平均能耗,图 6(a)和图 6(b)分别对应不同的用户数据包发送速率,所有策略的平均能耗都会随着网络请求数量的增加而降低,最后趋于稳定。这是由于随着用户对内容的不断请求,

内容可以逐渐移动至用户附近,进而使网络的平均能耗降低,而当网络处于稳定状态后,平均请求能耗几乎不再变化。而本文所提策略产生的平均请求能耗低于其他 ICN 策略,特别是当用户发包速率较大时,产生的节能效果更加明显。

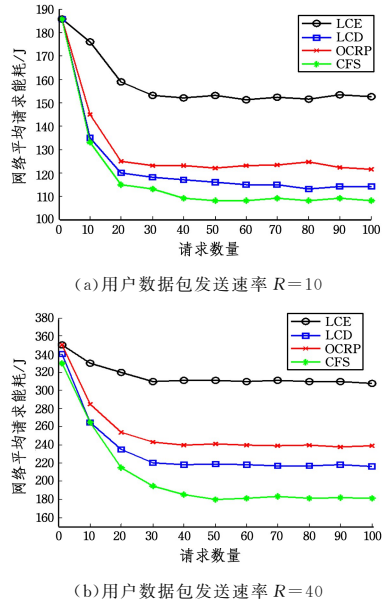


图 6 网络平均请求能耗

Fig. 6 Network average request energy consumption

为了进一步说明本文所提路由策略缓解拥塞的能力,对比了其与最短路由转发机制中每个节点的数据包队列长度,如图 7 所示,其中横坐标代表节点编号,纵坐标  $N(P)$  代表当前节点的数据包队列长度。由仿真结果可以看出,最短路由策略的数据包分布很不均匀,几乎集中在某几个节点,而大多数节点处于闲置状态,网络节点利用率低。而对于内容路由算法,数据包分布相对均匀,从而提高了网络的利用率,降低了网络拥塞状况。

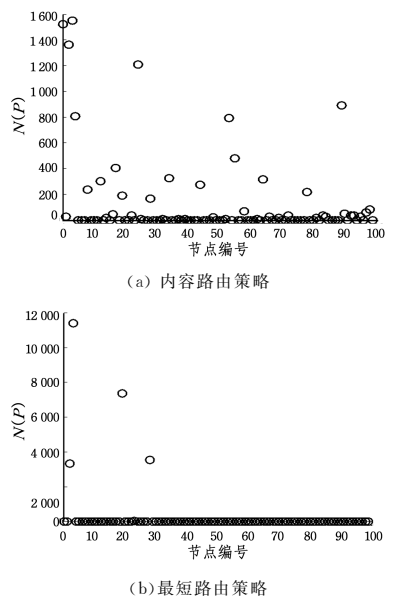


图 7 网络中节点的数据包分布情况

Fig. 7 Data packet distribution of nodes in network

结束语 ICN 是未来网络体系架构研究的热点,本文提

出了一种适用于 ICN 的能效优化路由和缓存策略,利用复杂网络对 ICN 进行建模,并使用复杂网络特性构建内容场模型,根据邻居节点场强寻找最佳路径,并根据内容流行度和内容用户之间的距离做出缓存决策。实验仿真结果表明,本文所提 ICN 策略可以在保证用户 QOS 的前提下一定程度上降低网络能耗,特别是在网络高峰期,CFS 可以高效利用链路以及缓存内容,达到更好的用户体验和节能效果。

### 参 考 文 献

- [1] FORECAST C V N I. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update 2015-2020 [EB/OL]. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>.
- [2] KUTSCHER D, EUM S, PENTIKOUSIS K, et al. Information-centric networking (icn) research challenges[R]. 2016.
- [3] DIN I U, HASSAN S, KHAN M K, et al. Caching in Information-Centric Networking: Strategies, Challenges, and Future Research Directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, PP(99): 1-1.
- [4] MORELLI A, TORTONESI M, STEFANELLI C, et al. Information-Centric Networking in next-generation communications scenarios[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2017, 80(C): 232-250.
- [5] EUM S, NAKAUCHI K, MURATA M, et al. CATT: potential based routing with content caching for ICN[C]//Edition of the Icn Workshop on Information-Centric Networking. ACM, 2012: 49-54.
- [6] BANERJEE B, SEETHARAM A, MUKHERJEE A, et al. Characteristic Time Routing in Information Centric Networks [J]. Computer Networks, 2016, 113: 148-158.
- [7] WANG S, BI J, WU J, et al. CPHR: In-Network Caching for Information-Centric Networking With Partitioning and Hash-Routing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(5): 2742-2755.
- [8] SUKSOMBOON K, TARNOI S, JI Y, et al. PopCache: Cache more or less based on content popularity for information-centric networking[C]//Local Computer Networks. IEEE, 2014: 236-243.
- [9] TARNOI S, KUMWILAISAK W, YUSHENG J. Optimal Cooperative Routing Protocol Based on Prefix Popularity for Content Centric Networking[C]//Proceedings-Conference on Local Computer Networks. IEEE LCN, 2014: 414-417.
- [10] NEWMAN M E J. The structure and function of complex networks[J]. Siam Review, 2003, 45(2): 167-256.
- [11] MITCHELL M. Complex systems: Network thinking[J]. Artificial Intelligence, 2006, 170(18): 1194-1212.
- [12] GUIMERÀ R, DÍAZGUILERA A, VEGAREDONDO F, et al. Optimal Network Topologies for Local Search with Congestion [J]. Physical Review Letters, 2002, 89(24): 248701.
- [13] SONG H Q, GUO J. Improved routing strategy based on gravitational field theory[J]. Chinese Physics, 2015, 24(10): 651-658.
- [14] LENDERS V, MAY M, PLATTNER B. Service discovery in mobile ad hoc networks: A field theoretic approach[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2005, 1(3): 343-370.
- [15] JACOBSON V, SMETTERS D K, THORNTON J D, et al. Networking named content[C]//International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. ACM, 2009: 117-124.
- [16] LAOUTARIS N, CHE H, STAVRAKAKIS I. The LCD interconnection of LRU caches and its analysis[J]. Performance Evaluation, 2006, 63(7): 609-634.
- [17] PSARAS I, WEI K C, PAVLOU G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks[C]//Edition of the Icn Workshop on Information-Centric Networking. ACM, 2012: 55-60.
- [18] ARENAS A, DÍAZ-GUILERA A, GUIMERÀ R. Communication in networks with hierarchical branching[J]. Physical Review Letters, 2001, 86(14): 3196-3199.
- [19] ZHANG F, ANTA A F, WANG L, et al. Network energy consumption models and energy efficient algorithms[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(3): 603-615. (in Chinese)  
张法, Anta A F, 王林, 等. 网络能耗系统模型及能效算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(3): 603-615.
- [20] SEETHARAM A. On Caching and Routing in Information-Centric Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, PP(99): 1-6.