

文章编号:1007-5321(2021)02-0075-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-274

NDN 数据提供者移动支持策略能耗建模与分析

王国卿

(华北水利水电大学 信息工程学院, 郑州 450045)

摘要: 基于数据提供者的移动节点在网络中的不同位置及不同移动速度,结合命名数据网络(NDN)请求者驱动的数据传输模式,提出了3类NDN移动支持策略的网络能耗解析表达式,为NDN移动网络的研究提供了形式化的建模方法。对这3类移动支持策略在不同场景下能耗的分析与比较结果表明,数据流行度分布、移动节点所处位置及移动速度对策略的能耗影响不尽相同,为后续探求最优能效的移动支持策略提供了理论参考。

关键词: 数据提供者移动支持策略; 能耗; 移动速度; 建模

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Energy Consumption Modeling and Analysis of NDN Data Provider Mobile Support Strategies

WANG Guo-qing

(College of Information Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Based on different locations and speeds of mobile nodes of data providers in network, combined with named data networking(NDN) requester driven data transmission mode, analytic expressions of network energy consumption of 3 types of NDN mobile support strategies are proposed, which provide a formal modeling method for the study of NDN mobile network. By analyzing and comparing the energy consumption of these 3 mobile support strategies in different scenarios, data popularity distribution, location of mobile nodes and moving speed have different effects on energy consumption of the 3 strategies. It provides a theoretical reference for exploring the optimal energy efficiency mobile support strategies in the future.

Key words: data provider mobility support strategy; energy consumption; mobile speed; modeling

思科公司发布的全球移动数据流量预测报告(2018—2023)^[1]显示,2023年,全球移动用户数将从51亿增长到57亿(71%),移动支持已经成为下一代互联网的核心问题之一。随着因特网的发展,网络能耗占据了全球总能耗越来越大的比重^[2]。在移动场景下,由电池提供能量的移动节点具有有限的能量并不易于共享,电池技术的发展速度慢于移动设备处理器、无线技术及移动应用的发展速度。能效研究的重要性不亚于网络的鲁棒性、可靠性和

安全性等性能指标对网络建设的重要性^[3]。因此,能量也是新型网络架构急需考虑的性能指标之一。

命名数据网络(NDN, named data networking)^[4]移动研究主要分为数据提供者(DP, data provider)和数据请求者(DR, data requester)移动两方面。笔者主要研究DP移动支持策略的能效。Zhang Y等^[5]把NDN的DP移动支持策略分为移动节点的定位和数据聚集两类。其中移动节点定位包括映射法(基于名字解析)和追踪法(留面包屑);数

据的聚集是将数据缓存至已知的固定仓库节点或区域。朴雪威等^[6]将 DP 移动分为类 DNS 转发预测方案、仿 mobile-IP 方案、仿 mobile-IP 跟踪方案、局部性方案等。

据此将 DP 移动支持策略按路由方式分为 3 类。1) 最短路径路由的映射法。把数据名字(稳定的)与位置(临时的)绑定,移动节点将信息发送到稳定不动的汇集点(RV, rendezvous)进行域名解析^[7],或通过接入点广播等方法实现^[8]。2) 追踪法。移动 DP 通过“面包屑”沿路修改邻节点的转发路径,让请求包依据修改的路径路由至移动 DP^[9-10]。3) 仓库法。移动者将数据主动缓存至其附近较稳定的内容路由器(CR, content route)或 RV^[9,11]。这些 DP 移动支持的研究文献中都涉及通信代价,如文献^[10]中所述的仿真数据表明,通信代价受移动速度影响。因此,能耗与 DP 节点的移动速度有关。

NDN 的网络能耗是指网络成功服务单位数据量的平均网络能耗。网络能耗主要由传输能耗、缓存能耗^[12]以及额外能耗 3 部分组成。已有研究大都致力于非移动场景的能效优化,主要包括:研究新的缓存策略以优化能效^[13-14];建立节点或链路休眠机制减少能耗^[15];设计路由转发机制优化能效^[16]。而移动场景下的网络能效研究仍然较少。最新的研究主要是基于 NDN 的移动自组织网络(MANET, mobile Ad hoc networks)的能效^[3,17-18]。

NDN DP 移动的各移动支持策略的网络能耗的建模研究需要综合考虑:NDN 的数据分发模式、移动节点 DP 所处网络位置、移动速度、移动支持策略的数据传输方式等问题。针对这些问题,提出 4 种解决方法。

1) NDN 的数据分发模式。基于 NDN 的网内缓存、请求包聚合及分布式的架构,参考已有研究^[19]得到 DR 在各个 CR 节点的未命中率,据此算出 DR 获取单位数据的平均跳数,进而得到缓存传输能耗。

2) 移动节点 DP 所处网络位置。拟用 DP 距离 DR 的跳数建模 DP 所处的网络位置。

3) DP 移动速度。拟用移动节点移动后的新路径中增加的路由节点数,来抽象建模速度的大小和方向 2 个变量。

4) 移动支持策略的数据传输模式。在数据平面抽象 NDN 的 3 类 DP 移动支持策略。

综上,NDN 中的 DP 移动支持策略是学术界的

研究热点,部分研究在仿真中考虑到信号开销,但是与信号开销息息相关的能耗研究却比较少。能耗作为一个综合指标,反映了数据分发时延、通信代价和丢包率等,在能量敏感网络(如 MANET)中尤为重要。NDN 移动支持策略的能耗数学模型,将为 NDN 移动网络能效的优化及策略选择提供参考,具有一定的研究意义。

1 系统模型

在 DP 移动的网络中,考虑 3 类节点:①DR;②具有缓存转发功能的内容路由器或接入点 CR,其中有一个移动节点,记作 DP;③稳定不动的汇集点 RV。另有距离 DR 较远的存储所有数据的服务器。假设 CR 的缓存策略采用全缓存的决定策略(LCE, leave copy everywhere)和最近最少使用替换策略(LRU, least recently used)。

下面以距离请求者 4 跳的 CR4(也用 DP 表示,以示区分其他不移动的 CR)移动为例,分别介绍这 3 类 DP 移动支持策略的数据传输模式。

1.1 映射法

将稳定的数据名字与暂时地址绑定的映射法通常支持最短路径路由,该策略需要汇集点 RV 支持,其数据传输方式如图 1 所示。DP 移至新位置后,向 RV 注册,绑定其新位置与其可服务的数据前缀,DR 请求数据时,先在 RV 处查询数据位置,若该数据在 DP 中,则 DR 用最短路径路由到 DP 处获取数据。DR 曾在 DP 中请求过的数据可能在途中命中,与数据流行度及新路径和旧路径重合的节点数有关,取新路径和旧路径重合的节点数的最大值,即 CR4 移动后的最短路径经过 CR1~CR3。

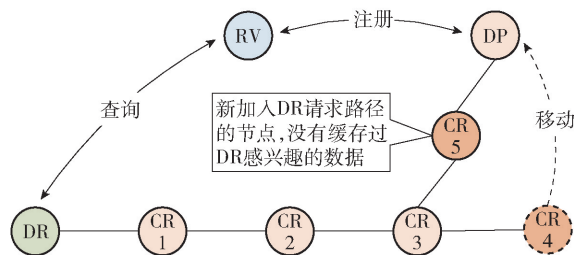


图 1 映射法的数据传输方式

1.2 追踪法

通过修改路径,跟踪 DP 移动轨迹的追踪法通常用非最短路径路由,对于没有汇集点 RV 的架构,数据的传输方式如图 2 所示。DP 在移动过程中,一边移动一边与其位置附近的 CR 节点建立连接,以

便后续数据请求包路由至 DP. 在 NDN 中, DP 通过发送跟踪兴趣包的方式主动与附近节点建立连接. 在 CR1 ~ CR3 均未命中的兴趣包到达 CR3 后, 发现 FIB 中接口已失效, 然后采用 Map-Me^[10] 的通知发现协议寻找 DP.

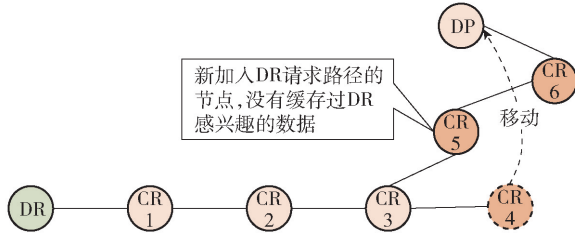


图2 追踪法的数据传输方式

1.3 仓库法

仓库法的数据传输方式如图3所示。DP 维护一张邻居信息表, 在即将移动之前将数据推送至附近的 CR5 节点, 后续 CR1 ~ CR3 未命中的请求在 CR3 处通过广播从 CR5 处获取数据, 在 CR5 处仍未命中的请求包将按照 CR4 原来的转发路径转发出去, 即 CR5 完全替代了移动前的 CR4.

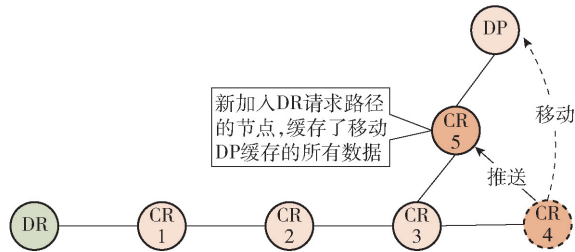


图3 仓库法的数据传输方式

2 能耗建模

假设按请求流行度将 DR 可能请求的数据分为 K 种, 将第 k 种 ($k=1, 2, \dots, K$) 内容标记为 k , DR 请求数据 k 的概率为 λ_k , 服从参数为 α 的 Zipf 分布, 即 $\lambda_k = c/k^\alpha$, 其中 $c = \left(\sum_{k=1}^K 1/k^\alpha \right)^{-1}$. 获取数据 k 的能耗包含缓存能耗 E_k^{ca} 和传输能耗 E_k^{tr} . 网络中部署有缓存所有数据的服务器, 设 DR 所在的域到该服务器需要 D 跳, 各节点转发的邻居节点数为常数 N_b , 符号及意义如表1所示.

DP 移动之前, 数据请求者 DR 的请求路径上有 N 个内容路由器 (按距离 DR 的跳数编号为 CR1 ~ CRN). 为简化描述, 假设所有数据的大小相等, 均为 1 个单位的数据量, 请求单位数据量所需请求包

的数据量为 I , CR 均可缓存 C 个数据.

表1 符号及意义

符号	意义
K	网络中数据的种类
λ_k	数据 k 的请求概率
D	DR 所在域到服务器的跳数
h_k	获取数据 k 的平均跳数
I	请求包的大小
$C/\text{个}$	CR 缓存的数据量
$N/\text{个}$	服务 DR 的 CR 的总数量
$N_b/\text{个}$	CR 广播的邻居节点数
p_{ca}/J	缓存单位数据量的缓存电功
p_l/J	传输单位数据量 1 跳的链路电功
p_r/J	查找转发单位数据量 1 跳的处理电功
p/J	汇集点 RV 的运行能耗
E_k^{ca}/J	获取内容 k 的缓存电功
E_k^{tr}/J	获取内容 k 的传输电功
E^{ca}/J	单位数据量的缓存电功
E^{tr}/J	单位数据量的传输电功
E^{ex}/J	单位数据量的额外电功

服务单位数据量网络需要的平均能耗为

$$E^{\text{tot}} = E^{ca} + E^{tr} + E^{ex} \quad (1)$$

DR 获取单位数据量的缓存能耗为

$$E^{ca} = \sum_{k=1}^K \lambda_k E_k^{ca} \quad (2)$$

其中 DR 获取单位数据量的缓存能耗为各种数据的缓存能耗加权和.

DR 获取单位数据量的传输能耗为

$$E^{tr} = \sum_{k=1}^K \lambda_k E_k^{tr} = \sum_{k=1}^K \lambda_k (p_l + p_r) (1 + I) h_k \quad (3)$$

DR 获取单位数据量的传输能耗为各种数据的传输能耗加权和, 传输单位数据量需要 $1 + I$ 的数据包和兴趣包, 传输能耗包括链路能耗和处理能耗, 都与跳数成正比.

缓存和传输能耗公式中的跳数在不同的策略下有不同的计算方法, 依据已有研究成果^[19], DR 在第 i 个 CR 处获取数据 k 的未命中概率 $m_k(i)$ 的闭式解为

$$m_k(i) = \begin{cases} 1, & i = 0 \\ e^{-1/k^\alpha \Gamma(1-1/\alpha)^\alpha}, & i = 1 \\ m_k(l) \prod_{l=1}^{i-1} m_k(l), & i > 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $i=0$ 表示 DR 节点. 下面对 3 类 DP 移动支持策略能效的关键因子跳数和额外能耗建模.

2.1 映射法

如 1.1 节所述, 新加入的 CR 个数受移动速度的影响. 设新加入的 CR 为 n_1 个 (图 1 中的 $n_1 = 1$), 数据 k 在节点 i 的未命中概率为 $m_k^a(i)$, 则有

$$m_k^a(i) = \begin{cases} m_k(i), & i=0, 1, 2, 3 \\ 1, & i=4, \dots, 3+n_1 \\ m_k(4), & i=4+n_1 \end{cases} \quad (5)$$

$$h_k = \sum_{i=1}^3 i[1-m_k(i)] \prod_{j=0}^{i-1} m_k(j) + (4+n_1)[1-m_k(4)] \prod_{i=1}^3 m_k(i) + D \prod_{i=1}^4 m_k(i) \quad (6)$$

DR 获取单位数据量的额外能耗为

$$E^{\text{ex}} = 3(p_r + p_1)I + p \quad (7)$$

额外能耗主要包括汇集点 RV 处理注册及查询告知的能耗及 RV 运行能耗 p , 假设注册查询及告知包的大小与兴趣包的大小同样为 I , 传输单位数据量的电功与 CR 处理数据包或兴趣包的电功相同, 为 $p_r + p_1$. 共需要发送 1 次处理注册包和 1 对查询告知包, 因此乘以 3.

2.2 追踪法

如 1.2 节所述, 新加入 DR 请求路径的 CR5 和 CR6 没有缓存 DR 感兴趣的数据, 新加入的 CR 个数受移动速度和网络拓扑结构的影响, 设新加入的 CR 为 n_2 个, 数据 k 在节点 i 的未命中概率为 $m_k^b(i)$, 则有

$$m_k^b(i) = \begin{cases} m_k(i), & i=0, 1, 2, 3 \\ 1, & i=4, \dots, 3+n_2 \\ m_k(4), & i=4+n_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$h_k = \sum_{i=1}^3 i[1-m_k(i)] \prod_{j=0}^{i-1} m_k(j) + (4+n_2)[1-m_k(4)] \prod_{i=1}^3 m_k(i) + D \prod_{i=1}^4 m_k(i) \quad (9)$$

DR 获取单位数据量的额外能耗为

$$E^{\text{ex}} = n_2(N_b + 2)(p_r + p_1)I \quad (10)$$

移动 DP 需要与 CR 建立连接的次数等于新加入 DR 请求路径的 CR 节点数 n_2 (见图 5 中 $n_2 = 2$), 每次连接建立需要发送一对跟踪包, 因此移动 DP 需要与 CR 建立连接的能耗为 $2n_2(p_r + p_1)I$; 兴趣包

广播 n_2 次主动寻找 DP 的能耗为 $n_2 N_b(p_r + p_1)I$.

2.3 仓库法

如 1.3 节所述, CR5 缓存了移动 DP 的所有数据, 设数据 k 在节点 i 的未命中概率为 $m_k^c(i)$, 则有

$$m_k^c(i) = m_k(i), i=1, 2, \dots, 4 \quad (11)$$

$$h_k = \sum_{i=1}^4 i[1-m_k(i)] \prod_{j=0}^{i-1} m_k(j) + D \prod_{i=1}^4 m_k(i) \quad (12)$$

DR 获取单位数据量的额外能耗为

$$E^{\text{ex}} = (2 + 3N_b)(p_r + p_1)I + (p_1 + p_r + p_{ca}) \quad (13)$$

该策略下的额外能耗包括推送数据时产生的建立连接的能耗 $2(p_r + p_1)I/s$ 、推送单位数据的链路能耗和处理能耗 $p_1 + p_r$ 、缓存在 DP 中数据的缓存能耗 p_{ca} 、兴趣包广播 1 跳和 DP 维护邻居信息表的能耗 $3N_b(p_r + p_1)I$.

将式(6)(9)(12)分别代入式(3)可得到 DR 在映射法、追踪法和仓库法下获取单位数据的平均传输能耗, 再将式(2)(3)(7)[(2)(3)(10)或(2)(3)(13)]代入式(1)得到映射法、追踪法或仓库法下 DR 获取单位数据的平均能耗.

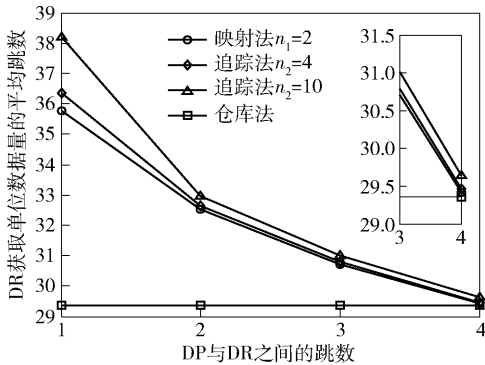
3 仿真与分析

上述内容含有大量的数值型公式, 因此, 采用擅长数值仿真的工具 Matlab 进行仿真. CR 需要广播时, 每次向 3 个节点广播. 数据种类为 1 万, DR 请求路径共有 4 个 CR, 服务器需 50 跳. 请求单位数据量所需请求包的数据量 $I=0.1$, CR 均可缓存 $C=10$ 个数据. 电功相关参数的比值参考文献[20-21], $p_{ca}=0.5, p_1=1, p_r=1, p=6$.

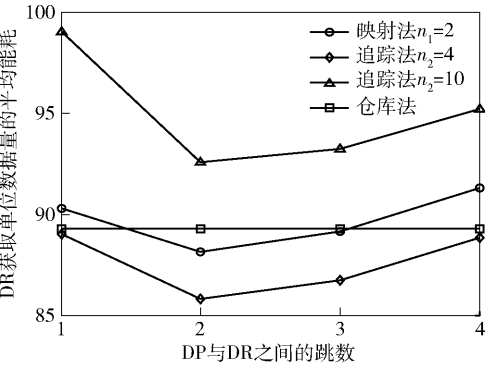
数据流行度的 Zipf 分布参数 $\alpha=1.2$ 时, 以移动 DP 与 DR 之间的跳数为自变量 (x 轴), DR 请求单位数据量需要的平均跳数和能耗如图 4 所示. 图 4(a)说明 DP 与 DR 之间的跳数对仓库法的性能没有影响, 这是因为仓库节点 CR5 完全替代了移动节点 DP, 即 DR 在各 CR 的命中率完全没有改变. 在 LCE + LRU 缓存策略下, 距离 DR 越近的 CR 缓存 DR 越感兴趣的数据, 因此映射法和追踪法下 DR 获取单位数据量的平均跳数随着移动 DP 与 DR 之间跳数的增加而减少.

从图 4(b)可见, 仓库法下各个位置的 CR 移动对 DR 获取单位数据的能耗没有影响. 这是因为仓库法的额外能耗与移动节点的位置无关. 由图 4

(a)可知,DR 获取单位数据的跳数不变,即缓存传输能耗也是恒定不变的,因此,仓库法下移动 DP 位置对 DR 获取单位数据的能耗没有影响. 映射法和追踪法的能耗随着移动 DP 的位置先减小后增大,这是因为:当移动 DP 与 DR 的距离较近时,缓存利用率较低,平均跳数较大,传输能耗比较大;当移动 DP 与 DR 的距离较远时,参与缓存的节点 CR 数量增加,使得缓存能耗增加.



(a) DR 获取单位数据量的平均跳数



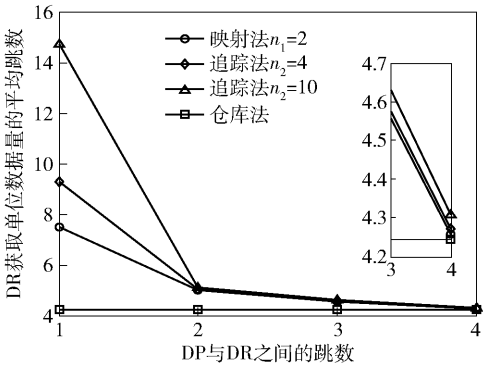
(b) DR 获取单位数据量的平均能耗

图 4 $\alpha = 1.2$ 时不同场景下的平均跳数和能耗的比较

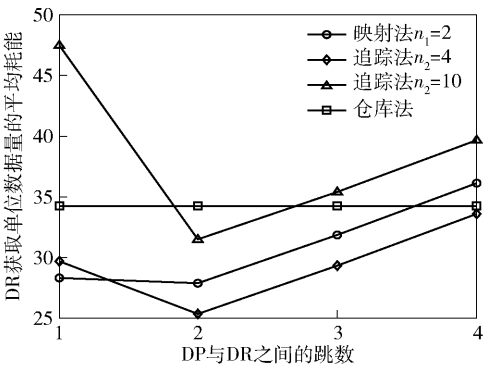
数据流行度的齐普夫分布参数 $\alpha = 2$ 时, DR 请求单位数据量需要的平均跳数和能耗如图 5 所示. 各策略平均跳数的大小关系与图 4 相同,跳数随移动节点的位置变化趋势与图 4 相似. 图 5 中的跳数和能耗都比图 4 中的小,因为齐普夫参数越大,数据流行度分布越集中,缓存利用率越高. 从图 5(b)可以看出,数据流行度分布越集中,DP 越靠近网络边缘移动,3 种策略在能耗方面的差异越明显.

由上述仿真数据得出各个场景下的相对最优策略,如表 2 所示.

仿真结果表明,节点移动速度、移动者与请求者的相对位置对映射法和追踪法的能耗均有较大影响,而仓库法的能耗仅受数据流行度的影响.



(a) DR 获取单位数据量的平均跳数



(b) DR 获取单位数据量的平均能耗

图 5 $\alpha = 2$ 时基于移动速度和 DP 位置的平均跳数和能耗比较

表 2 不同场景下能耗最优的策略

数据流行度分布	移动速度	移动 DP 的位置		
		边缘	边缘与中心之间	中心
流行度分布较均匀	快	仓库法	映射法	仓库法
	慢	追踪法	追踪法	追踪法
流行度分布较集中	快	映射法	映射法	仓库法
	慢	追踪法	追踪法	追踪法

4 结束语

由于 3 种策略针对的数据时间敏感度不同,没有考虑策略是否支持无缝移动,即因移动产生的丢包重传的问题. 尤其是映射法中,所有兴趣包都需要先到 RV 解析,没有考虑到 DP 移动之后、注册之前丢失重传兴趣包的能耗. 此外,难以找到映射法中最短路径与原路径重合节点数的规律,这将在后续建模中改进.

本建模方法可以扩展到其他 NDN 移动支持策略的建模,依据具体策略进行微调,有利于设计者在实现策略之前预估其能效,为下一步研究最优能效的 NDN 移动支持策略奠定了基础. 另一方面,解析表达式中的参数都是可配置的,有利于设计者在部署移动策略之前依据不同应用场景预估这 3 类 DP

移动支持策略的能效,选择部署合适的移动支持策略。

参考文献:

- [1] Cisco public. Cisco white paper: cisco visual networking index: forecast and trends, 2018—2023 [R/OL]. (2020-03-09) [2020-11-27]. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>.
- [2] Lambert S, Van H W, Vereecken W, et al. Worldwide electricity consumption of communication networks [J]. Optics Express, 2012, 20(26): 513-524.
- [3] Muchtar F, Abdullah A H, Al-Adhaileh M, et al. Energy conservation strategies in named data networking based MANET using congestion control: a review [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2020, 152: 102511.
- [4] Zhang L, Afanasyev A, Burke J, et al. Named data networking [J]. Acm Sigcomm Computer Communication Review, 2014, 44(3): 66-73.
- [5] Zhang Y, Afanasyev A, Burke J, et al. A survey of mobility support in named data networking [C] // IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). San Francisco: [s. n.], 2016: 83-88.
- [6] 朴雪威, 郑亦哲, 雷凯. 命名数据网络中的移动管理技术综述[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(4): 961-964.
Pu Xuewei, Zheng Yizhe, Lei Kai. Survey of mobility management technologies based on named data networking [J]. Application Research of Computers, 2017, 34(4): 961-964.
- [7] Afanasyev A, Yi C, Wang L, et al. SNAMP: secure namespace mapping to scale NDN forwarding [C] // 34th IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). Hong Kong: [s. n.], 2015: 281-286.
- [8] Hussaini M, Nor S A, Ahmad A. Optimal broadcast strategy-based producer mobility support scheme for named data networking [J]. International Journal of Interactive Mobile Technologies (ijim), 2019, 13(4): 1-16.
- [9] Zhang Y, Xia Z, Mastorakis S, et al. KITE: producer mobility support in named data networking [C] // 5th ACM Conference on Information-Centric Networking (ICN18). Boston: [s. n.], 2018: 125-136.
- [10] Auge J, Carofiglio G, Grassi G, et al. MAP-me: managing anchor-less producer mobility in content-centric networks [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2018, 15(2): 596-610.
- [11] Araújo F R C, De Sousa A M, Sampaio L N. SCaN-Mob: an opportunistic caching strategy to support producer mobility in named data wireless networking [J]. Computer Networks, 2019, 156(19): 62-74.
- [12] Mandal U, Chowdhury P, Lange C, et al. Energy-efficient networking for content distribution over telecom network infrastructure [J]. Optical Switching & Networking Special Section Photonics in Switching a Computer Networks Journal, 2013, 10: 393-405.
- [13] Rahel S, Jamali A, Kafhali S. Energy-efficient on caching in named data networking: a survey [C] // 3rd International Conference of Cloud Computing Technologies and Applications (CloudTech). Rabat: [s. n.], 2017: 185-192.
- [14] Dehghani F, Movahhedinia N. CCN energy-delay aware cache management using quantized hopfield [J]. Journal of Network and Systems Management, 2018, 26(4): 1-21.
- [15] Wu F, Yang W, Ren J, et al. Named data networking enabled power saving mode design for WLAN [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(1): 901-913.
- [16] Wang X, Lü J, Huang M, et al. Energy-efficient ICN routing mechanism with QoS support [J]. Computer Networks, 2018, 131: 38-51.
- [17] Sepahkar M, Khayyambashi M R. Improving energy efficiency in information centric mobile Ad-hoc networks using places of interest while respecting privacy [J]. International Journal of Communication Systems, 2019, 32(9): 1-13.
- [18] 张天魁, 单思洋, 许晓耕, 等. 信息中心网络缓存技术研究综述 [J]. 北京邮电大学学报, 2016, 39(3): 1-15.
Zhang Tiankui, Shan Siyang, Xu Xiaogeng, et al. Survey on caching techniques of information centric networking [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016, 39(3): 1-15.
- [19] Muscariello L, Carofiglio G, Gallo M, et al. Bandwidth and storage sharing performance in information centric networking [C] // Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking (ICN11). New York: ACM, 2011: 26-31.
- [20] Zhang Y, Chowdhury P, Tornatore M, et al. Energy efficiency in telecom optical networks [J]. Communications Surveys and Tutorials, 2010, 12(4): 441-458.
- [21] Fang C, Yu F R, Huang T, et al. An energy-efficient distributed in-network caching scheme for green content-centric networks [J]. Computer Networks the International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2015, 78(26): 119-129.