

DOI: 10.7667/PSPC171862

基于资源限制的融合网络 QoS 模型优化

李巍¹, 王鸥¹, 郑善奇¹, 杨明钰¹, 张晶²

(1. 国网辽宁电力有限公司信息通信分公司, 辽宁 沈阳 110006; 2. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 为提高公共通信网络的规范性和安全性, 考虑基于云平台技术, 将数据通信网与信息内网进行融合和统一部署。随着通信数据量的增长, 对融合网络 QoS 服务质量和基站与用户的资源消耗提出了更高要求。针对融合机制中的 QoS 需求, 提出将分布式 Caching 与 D2D 结合的节点间通信机制引入到两网融合中。并针对基站和用户对于资源的限制, 提出在现有模型基础上, 引入传输消耗和 D2D 信令消耗作为约束条件, 以求解一个更为合理的缓存分布。将所提方法应用于国网公司网络融合案例中, 其使得融合网络的通信机制更加符合实际需求, 取得了较好成效。

关键词: 网络融合; 云平台; QoS; 分布式 Caching; D2D

Optimization of QoS model of integrated network based on resource constraints

LI Wei¹, WANG Ou¹, ZHENG Shanqi¹, YANG Mingyu¹, ZHANG Jing²

(1. Information and Communication Branch, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to improve standardization and safety of the public communication network, the data communication network and information network are supposed to be integrated and deployed together based on the cloud platform technology. The growth of communication data raises higher demands for the QoS service quality of the fused network, and also for the resource consumption of the base station and users. According to the QoS demand of the integration mechanism, a mechanism of communication between nodes, which combines distributed Caching with D2D, is proposed for the integration of two networks. According to the resource constraints to the base station and users, it is proposed to add transmission consumption and D2D signaling cost as constraints to the existing model to obtain a more reasonable distribution of the cache. The proposed approach is applied to the network integration case of the State Grid Corporation of China. It makes the communication mechanism of the integrated network more consistent with actual demand, and achieves good results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61371068).

Key words: network integration; cloud platform; QoS; distributed Caching; D2D

0 引言

随着通信网络信息化建设的逐年发展, 大量生产、营销等应用系统推广至各县区、营业网点及变电站^[1]。由于现有数据通信网和信息内网存在网络结构不合理、安全性不足等问题, 严重影响网络安全性及健壮性^[2-4]。为了解决以上问题, 考虑将数据通信网与信息内网进行融合和统一规划部署。随着通信数据量呈现出爆发性的增长^[5-6], 不同通信网络

之间的融合与互联互通成为亟需解决的问题^[7-8]。

云平台技术可通过建立云平台将所有的异构网络与其互联, 实现全网数据资源的共享。因此, 本文提出将云平台技术应用到数据通信网和信息内网两网融合中, 对其进行统一规划部署。

QoS 是网络的一种安全机制, 当网络过载或拥塞时, QoS 能够确保重要业务不受延迟或丢弃, 同时保证网络的高效运行^[9]。文献[10]从理论上对云资源调度进行了建模, 给出了多维 QoS 优化的目标函数。文献[11]根据用户对数据服务的 QoS 需求, 提出基于模糊综合评判的副本选择算法 FCE-RS。以

上两种方法均是针对云计算场景下的 QoS 提出的, 现有的文献中尚无基于云平台的多网络融合 QoS 优化方法。为降低多网络融合带来的延迟和阻塞等问题, 需针对基于云平台的多网络融合机制 QoS 进行考虑和设计。

为满足高速率、高可靠性、低时延、低功耗的通信要求, 5G 网络中引入无线直连(Device-to-Device, D2D)技术作为其关键技术之一, 并将分布式 Caching 技术与 D2D 通信相结合^[12-14]。将分布式 Caching 技术与 D2D 通信相结合, 在网络节点设备中提前存储热门文件, 可以有效减轻在服务请求峰值时基站的传输压力, 提高文件获取速度等^[15]。为提高基于云平台的融合网络 QoS 服务质量, 本文提出将分布式 Caching 与 D2D 结合的邻近节点间通信机制引入到多网络融合模型中来, 以应对各地市终端用户的增加以及融合网络的数据业务需求急剧增长等问题。

在现有基于 D2D 的分布式 Caching 研究中, 如何求解一个更合理的缓存分布是需要解决的重点问题。文献[16]指出 Zipf 分布适合描述分布式 Caching 中热门内容的存储和请求分布。在此基础上, 文献[17-18]进一步分析了内容存储分布指数对系统干扰情况的影响, 但是分析中没有考虑信道噪声对 D2D 通信质量的影响。文献[19]分析了小区内最大 D2D 链路数与分布指数的关系, 但是文中假设的情况没有考虑 D2D 用户之间的干扰问题。文献[20]针对 5G 网络中 D2D 通信过程建立了业务传输成功概率模型, 但是却忽略了回程链路消耗以及 D2D 信令消耗等因素。若不考虑这部分消耗限制, 在业务密集地区缓存大量文件时, 可能增大传统蜂窝通信业务时延, 无法达到网络的综合性能最优化, 同时 D2D 通信信令资源占用过多会导致信令风暴等问题^[21-22]。

针对基于云平台的两网融合机制中, D2D 设备的信令资源和基站的传输资源受限等问题, 本文提出在现有缓存分布模型的基础上, 引入传输消耗和 D2D 信令消耗等约束条件, 以求解一个更为接近实际需求的缓存分布和邻近节点间通信机制, 进而满足两网融合机制中基站和用户设备对于资源的限制需求。

1 系统模型

本文采用的基于分布式分簇的多网络融合系统模型如图 1 所示, 网络中用户节点服从密度为 λ 的同构 PPP 分布, 节点地位对等, 且随机发送或接收信息。

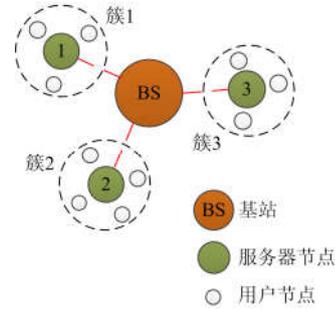


图 1 多网络融合系统模型图

Fig. 1 Model diagram of multi-network fusion system

假设共有 m 个文件, 文件请求概率服从 Zipf 分布, 则文件 i 的请求概率为

$$p_r(i) = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{j^{\gamma_r}}}, \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

式中, γ_r 为 Zipf 分布系数。假设对于不同用户, 文件请求具有相同的概率分布。

对于 D2D 系统模型, 首先介绍所要引入的传输消耗, D2D 模型的回程链路消耗 C_{Backhaul} 定义为 D2D 通信开始之前基站向所有用户传输数据产生的消耗, 其形式如式(2)。

$$C_{\text{Backhaul}} = \lambda \sum_{i=1}^m c_{\text{BS},i} p_c(i) \quad (2)$$

式中: $c_{\text{BS},i}$ 为 BS 发送第 i 个文件所产生的消耗; $p_c(i)$ 为 D2D 设备存储文件 i 的概率; m 为总的业务数。

假设 C_{max} 为回程链路所能承受的最大数据传输容量, 则 $p_c(i)$ 的取值需满足 $C_{\text{Backhaul}} \leq C_{\text{max}}$, 即

$$\sum_{i=1}^m p_c(i) \leq \frac{C_{\text{max}}}{\lambda c_{\text{BS},i}}.$$

接下来, 对 D2D 信令消耗进行介绍, 单对 D2D 设备在进行实际的数据传输前, 都需要信令交互以便建立连接。假设一对 D2D 设备在一个调度周期内产生的信令消耗为 s_c , $S_{c\text{max}}$ 为 s_c 的最大值, 则有

$$\lambda \sum_{i=1}^m p_c(i) \cdot s_c \leq S_{c\text{max}} \quad (3)$$

即

$$\sum_{i=1}^m p_c(i) \leq \frac{S_{c\text{max}}}{\lambda s_c} \quad (4)$$

在文献[20]中, 系统模型为求解使得总的业务传输成功概率 P_{sum} 最高的文件存储分布 $p_c(i)$, 即优

化目标表示为

$$P_c^* = \arg \max_{P_c} P_{\text{sum}} \quad (5)$$

其中

$$P_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^m \lambda p_r(i) p_{\text{cov}}(T, \lambda p_c(i), \alpha) \quad (6)$$

$$p_{\text{cov}}(T, \lambda p_c(i), \alpha) = \pi \lambda p_c(i) \int_0^{\infty} e^{-\pi \lambda p_c(i) r \beta(T, \alpha) - \mu T \sigma^2 r^{\alpha/2}} dr \quad (7)$$

$$\beta(T, \alpha) = \frac{2(\mu T)^{\frac{2}{\alpha}}}{\alpha} E[g^{\frac{2}{\alpha}} (\Gamma(-2/\alpha, \mu T g) - \Gamma(-2/\alpha))] \quad (8)$$

约束条件表示为

$$\sum_{i=1}^m p_c(i) = 1 \quad (9)$$

式中： T 为 SINR 门限； α 为路径损耗指数； σ^2 为噪声功率； μ 为恒定传输功率的倒数； r 为接收的 D2D 用户与发送 D2D 设备的距离； p_{cov} 为网络中缓存业务节点的覆盖率。

在此基础上，本文引入基站传输消耗和 D2D 信令消耗约束，建立优化模型。在系统传输消耗不超过回程链路容量，即 $\sum_{i=1}^m p_c(i) \leq \frac{C_{\text{max}}}{\lambda c_{\text{BS},i}}$ 以及 D2D 信令消耗不超过网络所能承载的最大的信令消耗，即 $\sum_{i=1}^m p_c(i) \leq \frac{S_{\text{cmax}}}{\lambda s_c}$ 的前提下，求解使得总的业务传输成功概率 P_{sum} 最高的文件存储分布 $p_c(i)$ ，即将上述约束条件(9)转化为

$$\sum_{i=1}^m p_c(i) \leq 1 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m p_c(i) \leq \frac{C_{\text{max}}}{\lambda c_{\text{BS},i}} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^m p_c(i) \leq \frac{S_{\text{cmax}}}{\lambda s_c} \quad (12)$$

2 最优分布式 Caching 分布

针对噪声受限的网络场景，对本文提出的理论模型进行最优解的求解，即在基站传输消耗和 D2D 信令消耗等约束条件下，求解出使总的业务传输成功概率最大的缓存分布 $p_c(i)$ 。

当 σ^2 趋近于 0 时，利用展开式 $\exp(-x) = 1 - x + o(x)$ ($x \rightarrow 0$)，得到

$$p_{\text{cov}}(T, \lambda, \alpha) = \frac{1}{\beta(T, \alpha)} - \frac{\mu T \sigma^2 (\lambda \pi)^{-\alpha/2}}{\beta(T, \alpha)^{\alpha/2+1}} \Gamma(1 + \frac{\alpha}{2}) + o(\sigma^2) \quad (13)$$

因此，优化问题(5)变为以下形式：

$$P_c^* = \arg \max_{P_c} \lambda \left[\frac{1}{\beta(T, \alpha)} + o(\sigma^2) \right] - \Gamma(1 + \frac{\alpha}{2}) \left[\frac{\mu T \sigma^2 (\lambda \pi)^{-\alpha/2}}{\beta(T, \alpha)^{\alpha/2+1}} \right] P_{\text{rel}} \quad (14)$$

以上公式等价于求解 P_{rel} 的最小值，其中 P_{rel} 可表示为如下形式：

$$P_{\text{rel}} = \sum_{i=1}^m p_r(i) p_c(i)^{-\alpha/2} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{j^{\gamma_j}}} \sum_{i=1}^m \frac{1}{i^{\gamma_i}} p_c(i)^{-\alpha/2} \quad (15)$$

利用拉格朗日乘法定义可以得到

$$\Lambda(p, \eta) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{i^{\gamma_i}} p_c(i)^{-\alpha/2} + \eta \left(\sum_{i=1}^m p_c(i) - C \right) \quad (16)$$

式中： η 为拉格朗日乘数； $C = \min(1, \frac{C_{\text{max}}}{\lambda c_{\text{BS},i}}, \frac{S_{\text{cmax}}}{\lambda s_c})$ 。

把 $\Lambda(p, \eta)$ 对 $p_c(i)$ 进行求导，并令导数为零得

$$(-\alpha/2) \frac{1}{i^{\gamma_i}} p_c(i)^{-\alpha/2-1} + \eta = 0 \quad (17)$$

求解得

$$p_c(i) = \alpha/2+1 \sqrt[\alpha/2]{\eta i^{\gamma_i}} \quad (18)$$

即求得在基站传输消耗和 D2D 信令消耗等约束条件下，使总的业务传输成功概率最大的缓存分布 $p_c(i)$ 。

3 算例分析

本文结合基于云平台的国网公司数据通信网与信息内网两网融合案例，具体分析所提出模型的适用性和使用成效。

为充分利用现有信息内网网络设备资源，满足信息 VPN 业务的容灾要求，全面提升数据通信网对信息 VPN 的业务承载能力，国网公司考虑将数据通信网与信息内网进行两网融合。案例中考虑采用“双信息 VPN”的双网融合总体技术路线，即使用一路原有的 VPN 用于地市公司上连省公司，并新建一路 VPN 用于地市内部接入层、汇聚层与核心层之间的

信息业务网络通信。除信息子网专用设备和通道外, 设备线路冗余和自动恢复机制完全交给数据通信网进行, 信息子网不必参与, 把数据网看成一个云平台。随着通信数据量的增长, 对融合网络中设备的传输资源和信令资源提出了新的挑战, 同时也带来了 QoS 需求无法满足等问题。因此本文提出将分布式 Caching 和 D2D 通信结合的邻近节点间通信机制引入到此案例中, 并针对基站和 D2D 节点设备对于资源的限制, 提出在现有模型基础上, 引入传输消耗和 D2D 信令消耗作为约束条件, 以求解一个更为合理的缓存分布, 并将其应用于国网公司数据通信网与信息内网两网融合的案例中。

基于以上案例提出的设备资源受限的需求, 本部分通过比较缓存节点的覆盖率、基站的传输资源和 D2D 设备的信令消耗, 将本文提出的模型与仅带有约束条件(9)的原模型进行分析对比。

3.1 参数设置

为将本文提出的模型与原模型进行对比分析, 首先对模型参数进行统一设定, 如表 1 所示。

表 1 参数设定

Table 1 Parameter setting

参数	意义	取值
λ	网络节点密度	10
m	文件数目	[4, 6]
T	干扰门限	-10 dB
α	路径衰落指数	4
γ_γ	文件的流行度服从的 Zipf 指数	2
s_c	单对 D2D 进行通信产生的信令消耗	8(RB)
$c_{BS,i}$	基站下发业务产生的数据传输消耗	$1/i$ (bit)

文献[20]中的模型最终得到的文件最优缓存分布为 Zipf 分布, 如式(19)所示。

$$p_c(i) = \frac{1}{\sum_{j=1}^m j^{\gamma_c}}, 1 \leq i \leq m \quad (19)$$

式中, $\gamma_c = \frac{\gamma_\gamma}{\alpha/2+1} = \frac{2}{3}$ 。

考虑基站传输消耗和 D2D 信令消耗后的模型最终得到的文件缓存分布如式(18)所示, 由 $\alpha=4, \gamma_\gamma=2$, 进一步求解得

$$p_c(i) = \sqrt[3]{\frac{2}{\eta i^2}} \quad (20)$$

3.2 结果分析

在 Matlab 软件中对缓存分布优化模型与原模型进行仿真和对比分析。首先, 分别在不同的总业务数 m 条件下, 将缓存节点覆盖率 p_{cov} 随缓存分布

概率之和 C 的变化进行仿真分析, 如图 2 所示。其中 $C = \sum p_c(i)$, $C=1$ 为未引入约束条件时的情况, $C<1$ 为引入约束条件后的情况, C 越小, 表示对缓存空间的占用率越低。由图 2 可以看出, 当 $m=4$ 时, 缓存节点的覆盖率 p_{cov} 随缓存分布概率之和 C 的增大而增大, 即为随着缓存分布概率之和 C 的增大, 缓存业务能够覆盖的节点数越多。 $m=4$ 和 $m=5$ 时的变化规律与 $m=6$ 时相同, 但随着 m 的增大, 缓存节点覆盖率的下降越来越剧烈。由此看出, 当缓存分布概率之和 C 下降, 对缓存空间的占用率降低, 缓存节点的覆盖率随之下降, 分布式 Caching 业务所覆盖的节点数随之变少, 但在缓存业务数较少的情况下, 仍在可以接受的范围内。

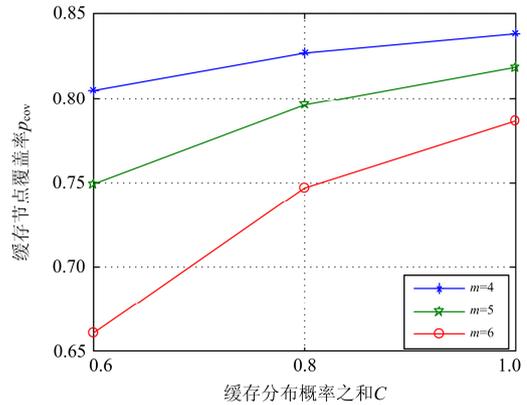


图 2 缓存节点覆盖率 p_{cov} ($T=-10$ dB)

Fig. 2 Coverage percentage p_{cov} of Cache node ($T=-10$ dB)

D2D 信令消耗和基站下发业务的数据消耗随 C 的变化关系分别如图 3 和图 4 所示。

由图 3 和图 4 可以看出, 随着缓存分布概率之和 C 的下降, D2D 设备的信令消耗 s_c 和基站下发业务数据的传输消耗都随之减少, 即随着对缓存空间和缓存节点的占用率的降低, 基站和 D2D 设备的资源消耗压力明显降低。

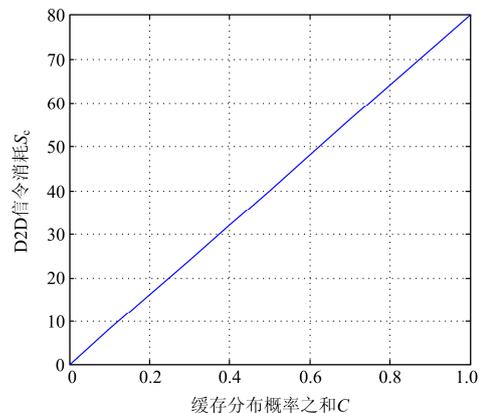


图 3 D2D 信令消耗

Fig. 3 D2D signaling consumption

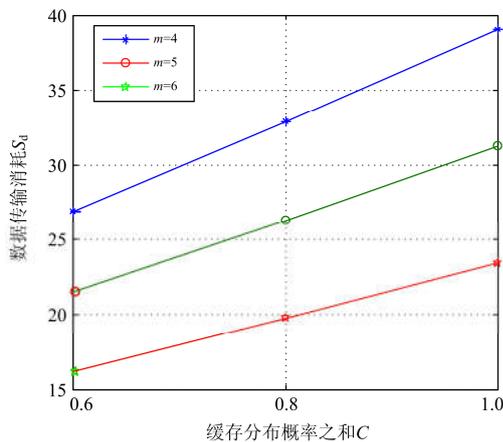


图4 基站下发业务的数据消耗

Fig. 4 Data consumption of transmit service from base station

从以上分析可看出,在总的缓存业务数较少的情况下,本文所建立模型对于国网公司两网融合案例中,基站对传输消耗的限制和D2D设备的信令消耗限制具有更好的适用性,同时没有浪费过多的缓存空间和缓存节点资源,最终使得到的缓存分布相对于文献[20]的结果更加符合基于云平台的两网融合机制对传输消耗和信令消耗的限制和实际需求。

4 总结与展望

本文针对基于云平台的多网络融合机制所带来的QoS需求,将分布式Caching与D2D结合的邻近节点间通信机制引入到多网络融合的机制中来,并针对国网公司融合网络案例中基站的传输资源和D2D用户设备的信令资源的限制,在现有模型基础上引入基站传输消耗和D2D信令消耗作为约束条件,求解出一个更为合理的缓存分布,进而得到更加符合实际需求的邻近节点间通信机制,并将其应用于国网公司基于云平台的数据通信网与信息内网两网融合案例中。通过仿真分析看出,在引入传输消耗和D2D信令消耗作为约束条件后,基站传输消耗和D2D信令消耗均有明显下降,得到的缓存分布相对于原模型的结果更加符合基站和D2D用户设备的资源限制需求,缓存分布概率虽有所下降,但在缓存的业务数较少的情况下,缓存分布概率的降低仍然在可以接受的范围内。最终使得在QoS服务质量得到保障的同时,融合网络的通信机制更加符合基于云平台的多网络融合机制中传输消耗和信令消耗的实际需求。

在下一步的工作中,将进一步针对实际应用中的场景需要进行研究和模型的优化设计,得到更为通用的基于D2D的分布式Caching通信机制,使得

多网络融合的应用更为广泛,数据业务承载能力更强大,同时结合多网络融合中的不同网络之间负载均衡问题进行分析和研究,为互联网和物联网的应用奠定基础。

参考文献

- [1] 尼俊红, 赵云伟, 申振涛. 基于业务流量的配电通信网可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 148-153.
NI Junhong, ZHAO Yunwei, SHEN Zhentao. Reliability analysis of distribution communications network based on traffic flow[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 148-153.
- [2] 马睿, 何海洋, 李长水. 国网数据通信网跨域VPN的设计与兼容性实现[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(12): 80-84.
MA Rui, HE Haiyang, LI Changshui. Design and compatibility implementation of state grid data communication network cross-domain VPN[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(12): 80-84.
- [3] 尹薇薇. 杭州电力数据通信网建设方案研究[J]. 电力信息与通信技术, 2014, 12(10): 31-36.
YIN Weiwei. Research on construction of hangzhou power data communication network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2014, 12(10): 31-36.
- [4] 连亦承, 喻鹏, 亓峰, 等. 一种面向负载均衡的电力OTN路由优化算法[J]. 广东电力, 2018, 31(5): 42-48.
LIAN Yicheng, YU Peng, QI Feng, et al. A load balance oriented optimization algorithm for electric power OTN route[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(5): 42-48.
- [5] 狄立, 郑征, 夏旻, 等. 基于快速密度聚类的电力通信网节点重要性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 90-95.
DI Li, ZHENG Zheng, XIA Min, et al. Node importance evaluation of electric power communication network based on fast density clustering[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 90-95.
- [6] 朱国威, 代荡荡, 郭岳, 等. 基于电网控制业务的路由策略[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 84-89.
ZHU Guowei, DAI Dangdang, GUO Yue, et al. Routing strategy based on power grid control business[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 84-89.
- [7] 李映雪, 朱文广, 黄超, 等. 基于自组织临界性的电力异构通信网络稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 118-122.

- LI Yingxue, ZHU Wenguang, HUANG Chao, et al. Research on power heterogeneous communications network stability with SOC[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(5): 118-122.
- [8] 张从武, 胡坚波. 异构无线网络融合关键问题和发展趋势探讨[J]. *信息通信技术*, 2012, 6(3): 13-17.
ZHANG Congwu, HU Jianbo. Key problems and the developing trend of heterogeneous wireless network convergence[J]. *Information and Communications Technologies*, 2012, 6(3): 13-17.
- [9] 孙岩, 马华东. 无线多媒体传感器网络 QoS 保障问题[J]. *电子学报*, 2008(7): 1412-1420.
SUN Yan, MA Huadong. The QoS guarantee problem for wireless multimedia sensor networks[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2008(7): 1412-1420.
- [10] 孙大为, 常桂然, 李凤云, 等. 一种基于免疫克隆的偏好多维 QoS 云资源调度优化算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(8): 1824-1831.
SUN Dawei, CHANG Guiran, LI Fengyun, et al. Optimizing multi-dimensional QoS cloud resource scheduling by immune clonal with preference[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2011, 39(8): 1824-1831.
- [11] 熊润群, 罗军舟, 宋爱波, 等. 云计算环境下 QoS 偏好感知的副本选择策略[J]. *通信学报*, 2011, 32(7): 93-102.
XIONG Runqun, LUO Junzhou, SONG Aibo, et al. QoS preference-aware replica selection strategy in cloud computing[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(7): 93-102.
- [12] WANG X F, CHEN M, TALEB T, et al. Cache in the air: exploiting content caching and delivery techniques for 5gsystems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 131-139.
- [13] JEON S W, HONG S N, JI M, et al. Caching in wireless multihop device-to-device networks[C] // *IEEE International Conference on Communication*, June 8-12, 2015, London, UK: 6732-6737.
- [14] KANG H J, KANG C G. Mobile device-to-device (d2d) content delivery networking: a design and optimization framework[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2014, 16(5): 568-577.
- [15] KANG H J, PARK K Y, CHO K, et al. Mobile caching policies for device-to-device (d2d) content delivery networking[C] // *IEEE Conference on Computer Communications Workshops*, April 27-May 2, 2014, Toronto, Canada: 299-304.
- [16] CHA M, KWAK H, RODRIGUEZ P, et al. Analyzing the video popularity characteristics of large scale user generated content systems[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 2009, 17(5): 1357-1370.
- [17] GOLREZAEI N, DIMAKIS A G, MOLISCH A F. Scaling behavior for device-to-device communications with distributed caching[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(7): 4286-4298.
- [18] GOLREZAEI N, DIMAKIS A G, MOLISCH A F. Wireless device-to-device communications with distributed caching[C] // *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, July 1-6, 2012, Cambridge, UK: 2781-2785.
- [19] GOLREZAEI N, DIMAKIS A G, MOLISCH A F. Device-to-device collaboration through distributed storage[C] // *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, December 3-7, 2012, Anaheim, USA: 2397-2402.
- [20] MALAK D, AL-SHALASH M. Optimal caching for device-to-device content distribution in 5g networks[C] // *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, December 8-12, 2014, Austin, USA: 863-868.
- [21] ZHANG H, XUE K, HONG P. Facing the signaling storm: a method with stochastic concept[C] // *2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, October 23-25, 2014, Hefei, China: 1-6.
- [22] ABDELRAHMAN O, GELENBE E. Signalling storms in 3g mobile networks[C] // *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, June 10-14, 2014, Sydney, Australia: 1017-1022.

收稿日期: 2017-12-24; 修回日期: 2018-02-21

作者简介:

李巍(1979—), 男, 副高级工程师, 研究方向为信息通信运行。E-mail: lndlliwei@163.com

(编辑 魏小丽)