第 45 卷 第 1 期 计 算 机 工 程 2019 年 1 月
Vol. 45 No. 1 Computer Engineering January 2019

·移动互联与通信技术· 文章编号：1000-3428(2019)01-0073-05 文献标志码：A 中图分类号：TP393

SDN 中应用网络分区的控制器部署策略

赵季红[1,2]，蔡田杰[1]，曲 桦[2]，赵建龙[2]，罗 金[1]

（1. 西安邮电大学 通信与信息工程学院，西安 710061；2. 西安交通大学 软件学院，西安 710049）

摘 要： 鉴于大型软件定义网络中控制器部署的复杂性特点，以最小化控制时延为优化目标，提出一种改进的 K-均值网络分区算法。通过聚类划分建模控制器部署问题，考虑在真实网络环境中节点的连通性，采用节点间的最短路径代替传统的欧氏距离计算传输时延。实验结果表明，与基于 K-means 算法相比，该算法可以有效减小网络的最大时延和平均时延，准确部署控制器。

关键词： 软件定义网络；控制器部署；网络分区；控制时延；最短路径

中文引用格式： 赵季红，蔡田杰，曲桦，等. SDN 中应用网络分区的控制器部署策略[J]. 计算机工程，2019，45(1)：73-77.

英文引用格式： ZHAO Jihong，CAI Tianjie，QU Hua，et al. Controller deployment strategy for applying network partition in SDN[J]. Computer Engineering，2019，45(1)：73-77.

Controller Deployment Strategy for Applying Network Partition in SDN

ZHAO Jihong[1,2]，CAI Tianjie[1]，QU Hua[2]，ZHAO Jianlong[2]，LUO Jin[1]

（1. School of Telecommunication and Information Engineering，Xi'an University of Posts and Telecommunications，Xi'an 710061，China；
2. School of Software Engineering，Xi'an Jiaotong University，Xi'an 710049，China）

【Abstract】 In view of the complexity of controller deployment in large Software-Defined Network(SDN)，an improved K-means network partition algorithm is proposed with the goal of minimizing control delay. Through the clustering problem modeling controller deployment problem，considering the connectivity of nodes in the real network environment，the shortest path between nodes is used to replace the traditional Euclidean distance to calculate the transmission delay. Experimental results show that compared with the K-means algorithm，this algorithm can effectively reduce the maximum delay and average delay of the network and accurately deploy the controller.

【Key words】 Software-Defined Network(SDN)；controller deployment；network partition；control delay；shortest path

DOI： 10.19678/j.issn.1000-3428.0049579

0 概述

软件定义网络(Software-Defined Network，SDN)是一种将控制逻辑与数据转发功能解耦的新颖架构，由于其集中式控制、可编程性、开放性以及灵活的网络管理优势，受到各行业的广泛关注[1]。但在真实网络环境中，如何将控制器部署到适当的节点已成为一个亟待解决的问题[2]。研究者通常考虑时延[3-4]、可靠性、容错性、能耗和负载均衡[5-6]等指标，其中，时延在网络性能中具有至关重要的作用。文献[7]针对控制器的部署，定义平均时延和最坏情况时延的控制器部署方案，分析了传输时延对网络的影响。文献[8]强调控制器和交换机之间的时延和流量负载的重要性。文献[9]提出一种最小化流表安装时延，将时延视为控制器部署的约束。文献[10]建立一种控制器部署优化模型，把控制器之间的时延纳入约束条件。在研究控制器部署方案时，传统 SDN 单控制器部署方式和扩展的多控制器模式都在全局网络内部署[11]。全局部署控制器在部署成本和网络性能之间折中，以实现最优成本与性能的部署方案[12]，但在折中过程中会损失部分网络性能，损失的性能在大型网络中不容忽视[13]。网络分区能够解决多控制器的部署问题，减小控制器和交换机之间的传输时延，与全局部署相比，网络的负载均衡、容错性、可靠性和能耗等性能在子网内较容易实现，显著降低控制器部署的复杂性。

本文提出一种应用网络分区的多控制器部署策略。该策略利用聚类算法将网络划分为不同的子网络，并给出 I-K-means 算法，以减小网络的质心节点和关联节点间的最大时延。

基金项目： 国家自然科学基金(61371087，61531013)。

作者简介： 赵季红(1963—)，女，教授、博士、博士生导师，主研方向为无线宽带通信网、5G 关键技术、基于内容网络和 SDN 网络的管理与控制；蔡田杰(通信作者)，硕士研究生；曲 桦，教授、博士、博士生导师；赵建龙，博士；罗 金，硕士研究生。

收稿日期： 2017-12-05 **修回日期：** 2018-01-09 **E-mail：** 15771761899@163.com

1 问题模型

在大型 SDN 网络 $G(V,E)$ 中，V 表示 OpenFlow 交换机集合，E 表示网络节点之间的链路集合。假设将 G 划分为 K 个分区，每个分区的 SDN 网络为 $SDN_i(V_i,E_i)$，其中，SDN_i 是一个连通的分区，$i=1,2,\cdots,k$。

为确保在分区遍历整个网络 G 中所有的节点和链路，定义式(1)[11]如下：

$$\begin{cases}\bigcup_{i=1}^{k} V_i = V\\ \bigcup_{i=1}^{k} E_i = E\end{cases} \tag{1}$$

为确保每个子网络的唯一性，每个节点和链路只能被分配到唯一的网络域，定义式(2)为：

$$SDN_i \cap SDN_j = \varphi \tag{2}$$

其中，$i\neq j$，且 $i,j\in\{1,2,\cdots,k\}$。

基于 I-K-means 分区控制器部署模型在网络 G 中有 Φ、V 和 E。其中，$\Phi=\{\varphi_1,\varphi_2,\cdots,\varphi_k\}$ 表示在网络 G 中控制器集合，φ_i 为在子网 SDN_i 中控制器集合，$V=\{V_1,V_2,\cdots,V_k\}$表示在网络 G 中的交换机节点集合，V_i 为在子网 SDN_i 中交换机节点的集合，$E=\{E_1,E_2,\cdots,E_k\}$，$E_i=\{(v_s,v_t)\mid v_s,v_t\in V_i\}$表示节点之间的时延，$E_i$ 为在子网 SDN_i 中节点之间时延的集合。

为保证网络的分区平衡，分区的原则是：分区的 SDN 域间差异性最大，SDN 域内相似度最大。例如，若把 G 分割为 SDN_i 和 SDN_j 2 个自治域，则节点 u 和节点 v 之间的相似度是两点之间的最短路径(传播时延)，大小映射在 0～1 之间，值越大相似度则越大。2 个节点的相似度可以表示如下：

$$sim(u,v)=\frac{1}{1+dist(u,v)} \tag{3}$$

2 个子网 SDN_i 和 SDN_j 之间的相似度定义为 $sim(SDN_i,SDN_j)$，把相似度映射到 0～1 之间，计算公式为：

$$sim(SDN_i,SDN_j)=\frac{1}{1+\sum dist(u,v)} \tag{4}$$

其中，$u\in V_i$，$v\in V_j$。

单子网 SDN_i 的相似度定义为 $sim(SDN_i,SDN_i)$，把相似度映射到 0～1 之间，表示子网 SDN_i 内的相似度为网络内所有链路权重(传播时延)之和，计算公式为：

$$sim(SDN_i,SDN_i)=\frac{1}{1+\sum dist(u,v)} \tag{5}$$

其中，$u\in V$，$v\in V$。

网络划分的主要目标是优化控制器与交换机之间的最大时延，优化目标定义为：

$$\min\{\max\{d(v_i,\varphi(v_i))\}\},\ \forall i\in(1,k)\quad v_i,\varphi(v_i)\in SDN_i \tag{6}$$

其中，$\varphi(v_i)$ 表示节点 v_i 映射的控制器。在式(6)中，网络分区可以优化子网中质心与其映射交换机之间的最大时延。

2 I-K-means 算法

2.1 I-K-means 算法分析

K-means 算法是一种高效基准聚类算法，以其通用性和时间复杂度的优势在图像切割、数据集划分和大数据等领域被广泛应用[14-15]。

网络分区类似数据聚类，可把网络分区看作一个聚类问题分析。传统 K-means 使用欧氏距离的相似度，直接应用到网络分区过程中存在较大误差。对误差分析如下：

1)传统 K-means 算法具有较强的随机性，初始中心节点不同得到质心也不同。

2)选择初始中心节点不能保证子网中的质心和其他节点之间的时延被减小。

3)在传统 K-means 中使用的欧氏距离可能没有在网络中物理连接的路径。

4)质心的更新应从节点集合中选择，以保证质心与其他节点之间存在连接。

本文给出 I-K-means 算法，提高其在网络分区中的适用性。具体思路如下：

1)网络节点集合 V 改进中心节点更新过程，在迭代过程中，质心节点和最大时延(最短路径)节点更新中心集合，保证分区过程最小化控制时延。

2)改进 K-means 算法，采用网络中存在的节点链路数据聚类，以便网络分区。

3)使用最短距离代替欧氏距离，克服 K-means 算法中的随机性，提高算法的稳定性。

4)提出 I-K-means 算法进行网络分区，K 值从 1 迭代到 K，把整个网络通过迭代逐步划分成 K 个子网络。

2.2 I-K-means 算法步骤

本文在 K-means 算法基础上提出 I-K-means 算法，主要包括质心计算更新算法和网络分区算法。

2.2.1 质心计算更新算法

在算法初始化时，由于网络 G(网络未分区)只有一个质心，算法 1 用于寻找网络的质心。

算法 1 质心算法

输入 网络 $G(E,V)$，拓扑节点集合 V，数据链路的集合 E

输出 网络分区质心节点 $\varphi(v_i)$

1. 初始化网络状态，V(拓扑节点状态集合)；E(拓扑节点时延的集合)；dist(u,v)(拓扑节点之间的最短时延)；

2. 初始化网络中心，随机选取一个节点作为网络中心 v_i，

v_i 和 $v_j \in SDN_i$ 计算网络质心;
　　for　i = 1 to k do
　　{
　　for j = 1 to k;
　　do{E = dist(v_i ,v_j);}
　　end for;
　　While(j = k);
　　}
　　end for;
　　if (dist(v_i ,v_j) = min)
　　$\varphi(v_i) \leftarrow v_i$;
　　3. 输出质心节点$\varphi(v_i)$;

2.2.2　网络分区算法

I-K-means 算法实质是将整个网络从 1 个逐渐分配到 K 个子网络,优化 K-means 的第一步是计算最短路径,然后从节点集合 V 中随机选择一个节点来调用算法 1,选择具有到质心的最大距离的节点和更新的质心作为初始中心,以进行下一次分区的迭代,直到网络被划分为 K 个子网络。

3　仿真结果与分析

3.1　仿真环境

本文采用 Matlab 2014a 进行仿真,为保证实验数据的真实可靠,利用文献[7]的网络拓扑模型 Internet2 OS3E,仿真重复 100 次,从 4 个方面对I-K-means 算法进行评价,分别是:1)网络内节点到控制器部署节点的平均时延(延迟为 5 μs/km);2)最大时延;3)累积分布函数(Cumulative Distribution Function,CDF);4)算法的累积误差。

平均时延是在网络节点和链路无故障时交换机到控制器之间传播时延的均值[16],计算公式如下:

$$latency_{av} = \frac{1}{|V|}\sum_{s,\varphi(s)\in V} dist(s,\varphi(s)) \qquad (7)$$

最大时延是在网络节点和链路无故障时交换机到控制器之间传播时延的最大值[16],计算公式如下:

$$latency_{max} = \max\ dist(s,\varphi(s)), s,\varphi(s) \in V \qquad (8)$$

3.2　结果分析

为验证 I-K-means 算法有效性,本文选取 K-means算法进行对比。

根据式(7)平均时延的定义,图 1 显示网络划分为 1 ~ 10 时 I-K-means 算法与 K-means 算法平均时延对比结果。从图 1 可以看出,在分区子网内部署控制器可以有效地降低控制发送时延,2 种算法均表现优化时延的性能。与 K-means 算法的网络分区结果对比,I-K-means 算法在降低网络平均时延方面优势明显。当网络分为 4 个子网时(K = 4),I-K-means 算法时延为 4.127 2 ms,而 K-means 算法时延为 4.319 5 ms。

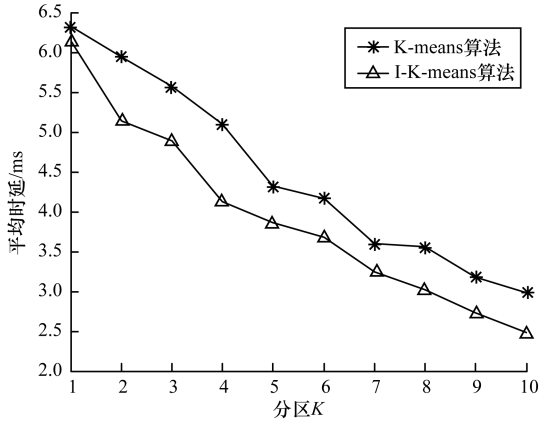


图 1　I-K-means 与 K-means 算法平均时延对比结果

图 2 描述 2 种算法在拓扑 Internet2 中仿真得到的最大时延随网络分区数量变化的对比结果。本文以优化最大时延进行网络分区,网络划分为 K 个子网络,网络中控制消息的最大时延减小。从图 2 可以看出,I-K-means 算法相比于 K-means 算法可以获得较小的最大时延,在解决控制消息最大时延问题方面性能表现优越。

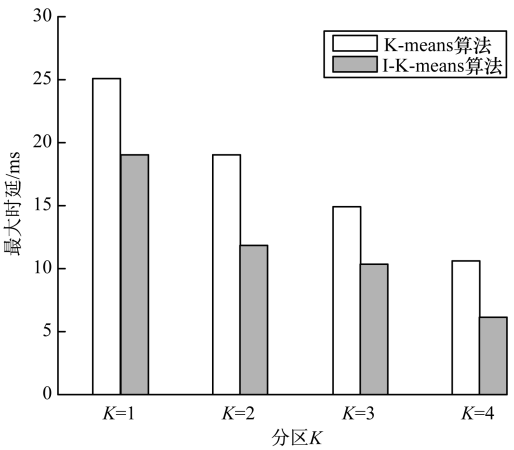


图 2　I-K-means 与 K-means 算法最大时延对比结果

图 3 表示当分区数为 4 和 5 时,在 OS3E 网络拓扑上执行 100 次时 2 种算法获得平均时延的累积分布函数。从图 3可以看出,K-means 算法平均时延分布范围为4.15 ms ~ 12.79 ms,在 5 ms 内时延占比小于 30% 。K-means算法稳定性较差,受初始节点影响,初始节点不同迭代引起质心节点差异较大,K-means算法提供了不稳定和不准确的控制器部署。而 I-K-means 算法当 K = 5 时,平均时延小于 4.48 ms,约占 90% ,当 K = 4 时,平均时延小于 5 ms 的概率为 60% 。因此,与K-means算法相比,本文算

法稳定性较好,且精确度高,能够为控制器部署提供准确的部署方案。

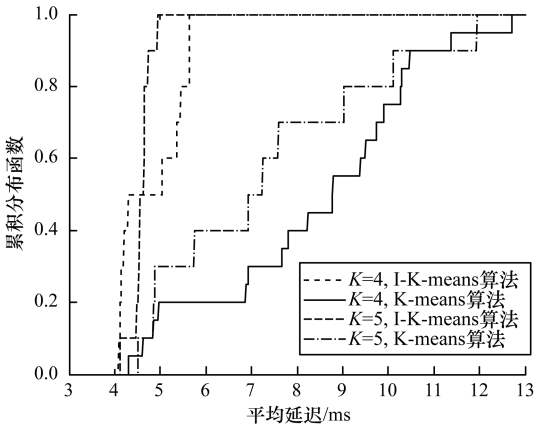


图 3 平均时延的累积分布函数对比结果

为进一步验证 I-K-means 算法的稳定性和准确性,本文将最大时延迭代结果的累积分布函数进行对比,如图 4 所示。当 $K=4$ 时,最大控制消息时延为 6.119 237 ms;当 $K=5$ 时,最大控制消息时延为 5.963 943 ms。K-means 算法结果分布范围为 6.620 211 ms ~ 18.733 442 ms,不能提供稳定的网络分区策略。I-K-means 算法不仅可以为网络分区提供稳定精确的方案,而且在降低最大控制消息时延方面有明显的优势。

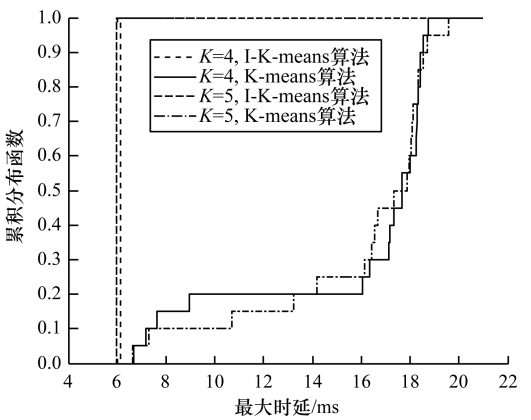


图 4 最大时延的累积分布函数对比结果

图 5 表示欧氏距离的 K-means 算法和最短路径的 I-K-means 算法随着迭代次数误差曲线对比结果。从图 5 可以看出,I-K-means 算法的精确度和收敛速度均优于 K-means 算法。当网络拓扑不变时,分区增加会导致收敛速度慢,会引起较大误差。本文将 I-K-means 算法应用到 OS3E 拓扑,直观地表现控制器的位置,如图 6 所示。I-K-means算法将 OS3E 拓扑划分为 4 个域,由三角形、正方形、圆形和六边形区分。其中,实心图形表示控制器位置。

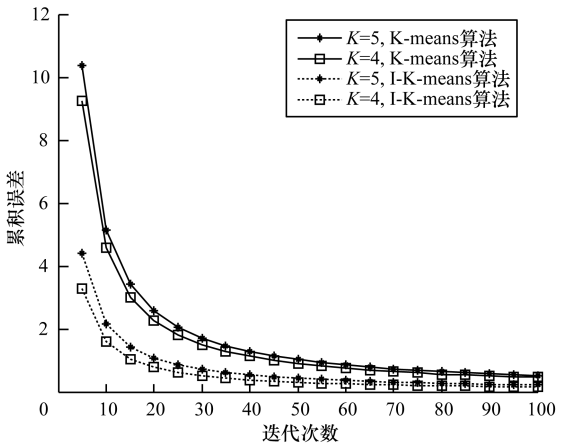


图 5 2 种算法累积误差对比结果

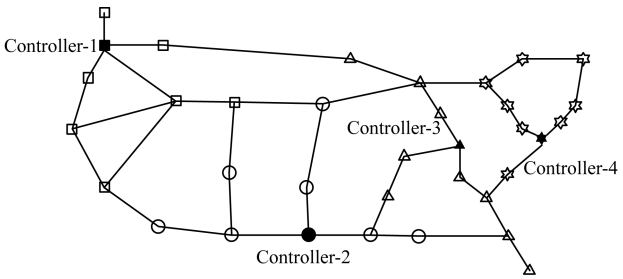


图 6 基于 I-K-means 算法分区的控制器部署位置

4 结束语

本文提出在 SDN 中应用网络分区的控制器部署策略。该策略利用基于最短路径的 I-K-means 算法,采用网络分区进行控制器部署。仿真结果表明,该策略能够减小网络的最大时延,降低控制器部署的复杂性。同时,在平均时延、算法精确度和收敛速度的评价标准下,该算法均优于传统的 K-means 算法。下一步将优化网络结构,研究面向载荷约束的控制器部署方案。

参考文献

[1] NUNES B A A,MENDONCA M,NGUYEN X N,et al. A survey of software-defined networking:past present and future of programmable networks [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials,2014,16(3):1617-1634.

[2] HUQUE M T I U,SI W,JOURJON G,et al. Large-scale dynamic controller placement [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management,2017,14(1):63-76.

[3] HU Y,WANG W,GONG X,et al. Reliability-aware controller placement for software-defined networks[C]// Proceedings of International Symposium on Integrated Network Management. Washington D. C.,USA:IEEE Press,2013:672-675.

[4] VESTIN J,KASSLER A,AKERBERG J. Resilient

software defined networking for industrial control networks[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Information, Communications and Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 1-5.

[5] ZHAO J, QU H, ZHAO J, et al. Towards controller placement problem for software-defined network using affinity propagation [J]. Electronics Letters, 2017, 53(14): 928-929.

[6] CANINI M, KUZNETSOV P, LEVIN D, et al. A distributed and robust SDN control plane for transactional network updates [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 190-198.

[7] HELLER B, SHERWOOD R, MCKEOWN N. The controller placement problem [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(4): 473-478.

[8] DIXIT A A, HAO F, MUKHERJEE S, et al. ElastiCon: an elastic distributed SDN controller[C]//Proceedings of the 10th ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems. New York, USA: ACM Press, 2017: 17-28.

[9] BARI M F, ROY A R, CHOWDHURY S R, et al. Dynamic controller provisioning in software defined networks [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Network and Service Management. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 18-25.

[10] SALLAHI A, ST-HILAIRE M. Expansion model for the controller placement problem in software defined networks [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 21(2): 274-277.

[11] YEGANEH S H, GANJALI Y. Beehive: simple distributed programming in software-defined networKs [C]//Proceedings of the Symposium on SDN Research. New York, USA: ACM Press, 2016.

[12] 王丽霞,曲桦,赵季红,等. 软件定义网络中应用二值粒子群优化的控制器部署策略[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 67-71.

[13] XIAO P, QU W, QI H, et al. The SDN controller placement problem for WAN [C]//Proceedings of International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 220-224.

[14] BOSE S, MUKHERJEE A, MADHULIKA, et al. Parallel image segmentation using multi-threading and K-means algorithm [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 1-5.

[15] KANG S H, SANDBERG B, YIP A M. A regularized K-means and multiphase scale segmentation[J]. Inverse Problems and Imaging, 2017, 5(2): 407-429.

[16] 谢娟英,高红超. 基于统计相关性与 K-means 的区分基因子集选择算法[J]. 软件学报, 2014(9): 2050-2075.

编辑　赵　辉

(上接第 72 页)

[12] HASSAN A, ALSHOMRANI S, ALTALHI A, et al. Improved routing metrics for energy constrained interconnected devices in low-power and lossy networks[J]. Journal of Communications and Networks, 2016, 18(3): 327-332.

[13] AWAD A M A, RAHIM R, HASHIM A H A. Queue backlog as a node metric for RPL protocol [C]// Proceedings of International Conference on Computer and Communication Engineering. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 246-250.

[14] SHENG Z, YANG S, YU Y, et al. A survey on the IETF protocol suite for the Internet of Things: standards, challenges, and opportunities[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(6): 91-98.

[15] LODHI M A, REHMAN A, KHAN M M, et al. Multiple path RPL for low power lossy networks[C]//Proceedings of Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 279-284.

[16] 张宗杰,刘彤,马晶源,等. 无线传感器网络 RPL 路由协议优化[EB/OL]. [2017-10-20]. http://www.docin.com/p-766814646.html.

[17] IOVA O, THEOLEYRE F, NOEL T. Exploiting multiple parents in RPL to improve both the network lifetime and its stability [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 610-616.

[18] IOVA O, THEOLEYRE F, NOEL T. Using multiparent routing in RPL to increase the stability and the lifetime of the network[J]. Ad Hoc Networks, 2015, 29: 45-62.

[19] 朱立才,王汝传,杨浩,等. 一种能量有效的 RPL 多路径数据分发机制[J]. 北京邮电大学学报, 2016, 39(6): 1-6.

[20] TANG W, MA X, HUANG J, et al. Toward improved RPL: a congestion avoidance multipath routing protocol with time factor for wireless sensor networks[EB/OL]. [2017-10-20]. https://www.hindawi.com/journals/js/2016/8128651/.

[21] 姚玉坤,杨及开. 低功耗有损网络中的能量均衡高效路由协议[J]. 计算机工程, 2016, 42(11): 8-14.

[22] ZHAO M, SHWE H Y, CHONG P H J. Cluster-parent based RPL for low-power and lossy networks in building environment[C]//Proceedings of Consumer Communications and Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 779-784.

[23] BHAT U N. An introduction to queueing theory modeling and analysis in applications [M]. Basel, Switzerland: Birkhauser Press, 2008.

编辑　吴云芳