

基于改进多属性判决的异构网络接入选择算法

高秀娥^{1,2} 李克秋¹

(大连理工大学计算机科学与技术学院 大连 116024)¹ (大连大学信息工程学院 大连 116622)²

摘要 针对现有多属性切换算法没有考虑所切换的目标网络负载、难以保障网络服务质量的不足,提出基于改进多属性判决的异构网络接入算法。首先,采用万有引力模型简化了复杂多属性判决算法的计算过程,减少了网络接入切换执行时间;其次,在切换执行前,通过加入负载判决模块计算出最优目标网络、次优目标网络负载,从而选出最终切换的目标网络。采用 MATLAB 和 NS2 等仿真工具,搭建了 WLAN 和 UMTS 融合的异构网络仿真环境。仿真结果表明,算法明显提高了整体网络的负载均衡度和资源利用率,有效降低了移动终端的切换阻塞率。

关键词 异构网络,接入选择算法,万有引力模型,改进多属性判决,负载均衡

中图法分类号 TP393.0 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.06.017

Research on Heterogeneous Network Access Selection Algorithm Based on Improved Multiple Attribute

GAO Xiu-e^{1,2} LI Ke-qi¹

(School of Computer Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)¹

(School of Information Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China)²

Abstract Aiming at the problem that the existing multi attribute handoff algorithm doesn't consider the load balancing of the target network and can not guarantee the quality of network service, the heterogeneous network access algorithm based on improved multi attribute decision was put forward. Firstly, the gravity model is used to simplify the complicated calculation process of multiple attribute decision algorithms, reducing the execution time of network access handoff. Secondly, the optimal target network and suboptimal target network load are calculated by adding the load decision module before switching, to select the final target handoff network. Using MATLAB, NS2 simulation tools, etc, a heterogeneous network simulation environment for WLAN and UMTS fusion was built. The simulation results show that the algorithm significantly improves the load balancing degree and resources utilization rate of the whole network, and reduces the handoff blocking rate of the mobile terminal effectively.

Keywords Heterogeneous network, Access selection algorithm, Gravity model, Improved multiple attribute, Load balancing

1 引言

随着无线通信技术的发展,层出不穷的无线通信网络为移动终端用户提供了异构网络环境,异构网络融合越来越受到人们的广泛关注。重叠覆盖的异构无线网络融合在一起可以提供覆盖范围广、带宽大、移动性高且廉价的服务。为了实现移动终端的灵活通信,未来的移动终端必须具备多种无线网络接口,终端的控制软件根据设定的切换规则来决定接入哪个网络^[1]。为了充分利用网络资源,发挥无线网络各自的优势,实现对移动终端在异构网络环境下的无缝漫游,在保证端到端服务质量(QoS)的前提下实现网络负载均衡^[2-3]。因此,需要设计合理的网络接入选择算法,实现对移动终端网络资源的合理分配。

常见网络接入选择算法有基于 RSS、代价函数、多属性、模糊逻辑、博弈论等判决算法。文献[4]根据不同业务类型及移动性的贡献程度,提出了 Q 学习算法来选择合适的网络接入方式,有效提升了网络在频谱效用和阻塞率方面的性能。但该方法为在线学习方法,算法复杂度高,同时需要充分考虑状态准确性。文献[5-6]针对不同业务类型的用户到达两个网络重叠覆盖区域的情况,提出了马尔可夫过程的接入选择算法,降低了阻塞概率,有效提升了异构网络的无线资源利用率。该方法依赖于网络状态和用户业务类型,对网络状态获取的实时性要求高。文献[7]针对无线资源管理问题,提出了基于 QoS 的联合无线资源管理(JRRM)方案,意在节约能源的同时,又能满足 QoS 的性能要求。文献[8-9]针对网络负载均衡方法未能综合考虑重载网络业务转移和新业务接入控制

到稿日期:2016-11-29 返修日期:2017-02-08 本文受国家杰出青年基金(61225010),国家基金重点项目(61432002)资助。

高秀娥(1976—),女,博士生,副教授,主要研究方向为异构网络,E-mail: gaoxiue510@126.com;李克秋(1971—),男,博士,教授,主要研究方向为计算机网络,E-mail: keqiu@dlut.edu.cn。

的网络负载动态变化问题,提出了负载均衡算法,有效降低了系统阻塞率和业务切换概率。文献[10]依据 QoS 要求和网络资源的可用性,提出多路径负载均衡方案,有效满足了用户服务分配到不同网络的需求,减少了网络超载。这些方法的效果与各类业务的最优截止门限值紧密相关,各类业务的最优截止门限值很难精确得到。文献[11]利用图模型分析 HetNet, MBS, SBSS 等不平等用户优先级的用户关联性,分析负载不平衡对系统性能的影响。文献[12-14]探索了基于软件定义网络(SDN)的负载均衡和接入选择方法,取得了一定的效果,但该方法需要充分考虑软件定义网络(SDN)的安全性,否则将进一步影响整个网络。

根据以上分析,已有方法大多存在算法复杂度高、对网络状态实时性要求高等问题;同时,对目标切换网络的负载变化分析不够。尤其在多用户多网络的异构网络环境下,需要深入研究异构网络的多属性接入算法,进一步考虑移动终端网络的资源分配问题和负载失衡问题。因此,提出一种基于改进多属性判决的异构网络接入算法,以提高网络资源利用率与负载均衡性。

2 基于改进多属性判决的异构网络接入算法

异构无线网络接入与融合时会出现移动终端用户群体移动的现象,且网络接入时存在大量的群体移动用户。用户群体移动对网络接入影响的主要体现如下:1)由于异构网络区域的部署不规则,干扰环境变得更加复杂,用户群体移动会改变网络容量;2)异构网络中,基站的密集、不规则部署对网络优化效率要求更高。

异构网络出现群体移动且新用户接入时,直接以群体用户为单位计算实时负载,可大大降低算法的复杂度,并提高网络资源利用率。群体移动不依赖于单个用户 QoS,现有用户 QoS 优先的异构网络判决算法并不能保证接入网络后的效益最大化。

多属性判决算法用于计算被选方案与理想方案的距离最小值以及与最差解决方案的距离最大值,从而选择最优策略接入网络。理想方案是由所有候选网络的最优属性值构成的,最差解决方案则由所有候选网络的最差属性值构成。由于多属性切换算法在移动终端选择最优目标切换网络时,没有考虑到当前最优目标网络的负载,可能会造成网络服务质量下降,即使在判决属性矩阵中引入网络负载这一决策参数也并不能很好地解决这一问题。此外,现有文献很少将负载因素作为决策因素考虑,如果一个重要的实时性业务出现网络负载过大而造成业务服务被拒绝,则移动终端用户非常难以忍受,因此,在多个移动终端存在的异构网络场景下选取最优目标网络时一定要考虑目标网络的负载情况。由于不同的无线网络对网络负载指标的判决有所不同,因此需要通过统一的定义来评判各网络的负载情况。

无线网络容量用网络总带宽来表示,而将所有移动终端用户已连接到网络所占用的带宽与网络的总带宽的比值作为网络负载,如式(1)所示。

$$load = \sum_i bw_i / bw_{\text{总}} \quad (1)$$

为减少切换算法的执行判决时间,引入万有引力模型来提高网络切换判决的性能,该模型的具体计算如式(2)所示:

$$F = G \cdot \frac{M_1 \cdot M_2}{R^2} \quad (2)$$

其中, F 表示物体质量 M_1 和物体质量 M_2 之间的作用力大小, R 表示两个物体之间的距离, G 为常数。将候选网络和移动终端分别类比为物体 M_1 和物体 M_2 , 网络综合性能类比为物体 M_1 和物体 M_2 之间的引力大小, 则定义候选网络 N 对移动终端 T 之间的引力 F_N 如式(5)所示:

$$F_N = K \cdot \frac{M_N \cdot M_T}{R^2} \quad (3)$$

其中, M_N 表示网络质量, M_T 表示移动终端质量, R 表示移动终端到无线网络的距离, K 为常数。选取可用带宽 B_N 、接收信号强度 RSS_{rate} 、端到端时延 D_N 、抖动 E_N 、网络资费 C_N 等 5 个判决属性来衡量候选网络的综合性能。其中接收信号强度 RSS_{rate} 表示为:

$$RSS_{\text{rate}} = \left| \frac{RSS_{\text{current}} - RSS_{\text{threshold}}}{RSS_{\text{threshold}}} \right| \quad (4)$$

其中, RSS_{rate} 为接收信号强度, RSS_{current} 为移动终端当前接收信号, $RSS_{\text{threshold}}$ 为接收信号门限值。

式(5)~式(8)为各属性归一化处理,网络可用带宽和接收信号强度越大,表示网络质量越好,其他属性均属于成本型属性,即其值越大,则说明网络质量越差。

$$B_N = \frac{B_n}{\max(B_1, B_2, \dots, B_m)} \quad (5)$$

$$D_N = \frac{\frac{1}{D_n}}{\max(\frac{1}{D_1}, \frac{1}{D_2}, \dots, \frac{1}{D_m})} \quad (6)$$

$$E_N = \frac{\frac{1}{E_n}}{\max(\frac{1}{E_1}, \frac{1}{E_2}, \dots, \frac{1}{E_m})} \quad (7)$$

$$C_N = \frac{\frac{1}{C_n}}{\max(\frac{1}{C_1}, \frac{1}{C_2}, \dots, \frac{1}{C_m})} \quad (8)$$

定义网络 N 的质量 M_N 如式(9)所示:

$$M_N = B_N + RSS_{\text{rate}} + \frac{1}{D_N} + \frac{1}{E_N} + \frac{1}{C_N} \quad (9)$$

移动终端对各个候选目标网络的引力大小比较没有影响,故为了提高运算速度,设移动终端的质量 M_T 为 1。因此,网络 N 对移动终端 T 的引力计算如式(10)所示。

$$F_N = \frac{B_N + RSS_{\text{rate}} + \frac{1}{D_N} + \frac{1}{E_N} + \frac{1}{C_N}}{R^2} \quad (10)$$

通过执行新的接入算法可得到最优目标网络和次优目标网络。移动终端选择目标接入网络的具体计算步骤如下:

(1)通过万有引力模型计算得到最优目标网络和次优目标网络。

(2)计算两个目标网络的负载状况,该步骤具体阐述为:

1)如果最优目标网络的当前负载小于预先设定的负载门限 α ($0 < \alpha < 1$),则将当前移动终端直接接入到最优目标网络。

2)如果最优目标网络的当前负载大于设定的负载门限 α ,并且次优目标网络的当前负载小于负载门限 α ,则直接选择目标负载较低的次优网络接入。

3)如果最优目标网络和次优目标网络的当前负载均大于设定的负载门限 α ,则直接比较两个网络的负载值来选择接入网络。如果最优目标网络的网络利用率达到 1,则说明最优目标网络已经饱和,新的移动终端用户切换请求将进入次优目标网络中;如果次优目标网络的网络利用率也达到 1,则拒绝为之服务。将移动终端用户转移到次优目标网络是为了降低业务阻塞率,降低移动终端用户的掉线率。

3 仿真分析

3.1 网络数学模型设置及参数计算

主要考虑语音业务和数据业务两种应用业务类型。假设语音业务和数据业务移动终端用户的切换呼叫到达率均服从泊松分布,则在 t 时间内 m 移动终端用户数发起呼叫的概率密度函数如式(11)所示,参数分别设为 λ_1 和 λ_2 。

$$P(X=m)_{(t)} = \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t} \quad (11)$$

其中, λ 表示移动终端用户业务的平均到达率,即单位时间内网络中呼叫到达的个数;移动终端用户到达的平均时间间隔为 $1/\lambda$ 。其中, $\lambda_1 \in [0.01, 0.1], \lambda_2 \in [0.01, 0.1]$ 。两种移动终端应用业务的平均服务时间均服从负指数分布,如式(12)所示,参数分别设为 μ_1 和 μ_2 ,即单位时间内服务完成的移动终端用户数,平均服务率即为其倒数。

$$f(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\mu t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (12)$$

3.2 性能指标

将从以下几个方面进行仿真分析和比较。

(1)网络切换次数

网络切换次数是指群体移动终端发生切换的总次数,通过比较算法的切换次数,可以说明算法的判决准确性,减少乒乓效应问题。

(2)切换呼叫掉话次数

切换呼叫掉话是指移动终端在切换过程中发生掉话的切换次数,该值越小,表示失败率越低,说明采用的算法性能越优。

(3)网络负载均衡度

网络负载均衡度能很好地衡量网络的资源利用率,其计算方法如式(13)所示。

3.3 仿真模型

建立如图 1 所示的异构网络群体移动性仿真场景模型,该模型包含 UMTS 和 WLAN 两种无线网络,有 1 个 UMTS、3 个 WLAN 网络。其中,UMTS 网络覆盖小区半径为 1500m,可用带宽为 20M;WLAN 网络的覆盖小区半径为 500m,可用带宽为 22M。在实验仿真的过程中,假定有 200 个移动终端。移动终端均为多模终端,即具有接入 UMTS 和 WLAN 两种网络的能力,其中,可用带宽、端到端时延、抖动是在一定范围内不断发生变化的,置负载门限 $\alpha=0.8$,设 $\mu_1=\mu_2=120s$ 。依然采用松耦合方案的异构网络融合方式,

两种移动终端用户的应用业务切换呼叫到达率均服从泊松分布。平均服务时间服从负指数函数分布,初始仿真时,多模移动终端用户随机分布在如图 1 所示的异构网络融合环境中,并在每个方向上随机移动。通过 NS2 软件进行仿真实验,并从网络切换次数、移动终端用户掉线次数、用户平均吞吐量以及负载均衡度 4 个方面对本文提出的算法和文献[15]提出的 MASVM 算法进行仿真对比分析。

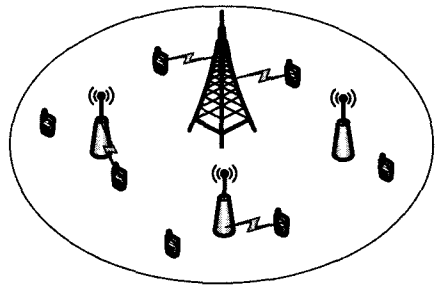


图 1 异构网络融合场景图

相应的仿真参数设置如表 1 所列。

表 1 仿真参数设置

网络类型	UMTS	WLAN
带宽/MHz	20	22
小区半径/m	1500	500
峰值速率/Mbps	100	54
工作模式	TDD1	DCF
移动终端速度/m/s	1~5	1~5
发射功率	30W	100mW

3.4 仿真结果与分析

(1)网络切换次数分析

网络切换次数是衡量垂直切换算法最主要的性能指标,在移动终端业务运行期间,大量的网络切换次数将导致网络系统资源的浪费,因此,网络切换次数成为了衡量切换算法设计合理性的必要条件。图 2 给出了两种算法在不同业务到达率下的网络切换次数仿真分析。

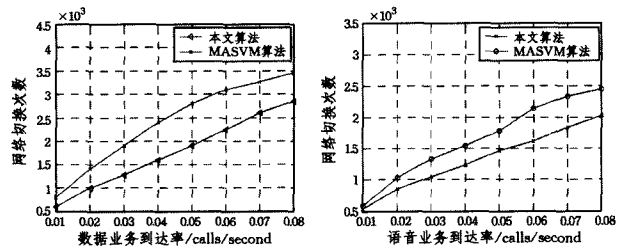


图 2 数据业务、语音业务在两种算法下的切换次数对比图

由图 2 可以看出,在数据业务和语音业务方面,本文算法的总体切换次数小于 MASVM 的,这说明本文算法的准确度较高,主要是因为本文算法综合考虑了更多的判决因素,从而减少了网络切换的次数,表明算法能够达到抑制乒乓效应的效果。

(2)移动终端用户掉话次数分析

在终端切换过程中,由于网络信道资源繁忙,请求切换的移动终端用户得不到信道资源,因此产生了掉话现象。图 3 给出了两种算法在切换掉话次数方面的仿真分析。

由图 3 可以看出,相对于 MASVM 算法,本文算法在掉

话次数方面有所改善。

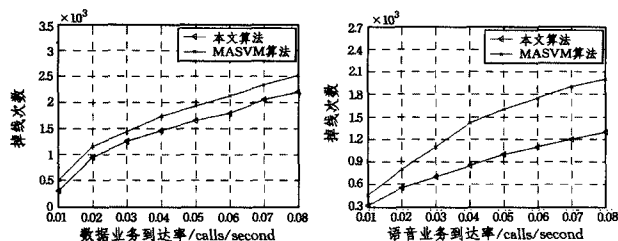


图3 数据业务、语音业务在两种算法下的掉线次数对比图

(3) 用户平均吞吐量分析

随着用户数的增加,用户平均吞吐量不断增加。当用户数增大到最高点后,资源被完全占用,网络会出现一定的阻塞,从而使每个用户获得的吞吐量呈略微的下降趋势,最终趋于稳定。图4给出两种算法在用户平均吞吐量方面的仿真分析。

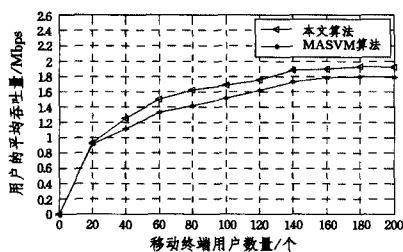


图4 用户平均吞吐量在两种算法下的对比图

由图4可以看出,相对于MASVM算法,本文算法在用户平均吞吐量方面有所提高。

(4) 整体网络系统的负载均衡度分析

网络负载均衡度是对整个网络系统资源利用率的一个很好的衡量。数据业务和语音业务的移动终端用户的数量分别由20个扩大到200个时,整体网络系统的负载均衡度计算如式(13)所示:

$$d = \sum_{i=1}^n |1 - (B_{i,occupied} / B_{i,total}) - (B_{o,occupied} / B_{o,total})| \quad (13)$$

其中, d 表示网络负载均衡度, B 表示带宽, i 表示第 i 网络, $B_{i,occupied}$ 表示第 i 网络已用带宽, $B_{i,total}$ 表示第 i 网络总带宽。

图5给出语音业务和数据业务在两种算法下的整体负载均衡度的仿真结果。

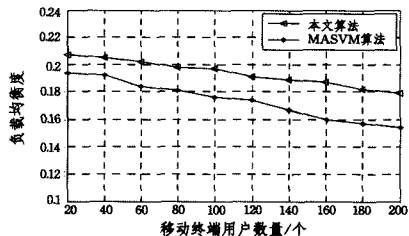


图5 网络负载均衡度在两种算法下的对比图

由图5可知,本文算法在负载均衡度方面优于MASVM算法。

上述仿真表明,所提算法有效减少了不必要的切换次数,提高了网络资源利用率,有效地降低了移动终端切换阻塞率以及掉线次数,提高了网络负载均衡度。

结束语 针对移动终端网络资源分配问题,提出了一种基于改进多属性判决的异构网络接入算法,减少了网络切换次数、终端用户掉线次数,有效提高了整个网络系统的网络资

源利用率。下一步将结合实际无线异构网络系统,对算法进行进一步的检验和改进。

参考文献

- [1] ZHANG Y, LIU S M. Network Selection Algorithm Based on Multi-attribute Decision[J]. Computer Science, 2015, 42(6): 120-124. (in Chinese)
张钰,刘胜美.基于多属性判决的网络选择算法[J].计算机科学,2015,42(6):120-124.
- [2] SHENG J, MA D. Multi-objective Optimal Based Service Access Control Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 42(2): 282-288. (in Chinese)
盛洁,马冬.异构无线网络业务接入多目标优化控制算法[J].电子学报,2016,42(2):282-288.
- [3] MIAO J, HU Z, YANG K, et al. Joint Power and Bandwidth Allocation Algorithm with QoS Support in Heterogeneous Wireless Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(4): 479-481.
- [4] FENG C W, ZHANG L. A Network Access Control Algorithm Based on Q-learning[J]. Computer Engineering, 2015, 41(10): 99-104. (in Chinese)
冯陈伟,张璐.一种基于Q学习的网络接入控制算法[J].计算机工程,2015,41(10):99-104.
- [5] ZHANG S, YU M, ZHU X R. An Access Selection Algorithm Based on Markov Process for LTE-A/WLAN Heterogeneous Network[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014, 34(6): 16-21. (in Chinese)
赵凤,余梅,朱晓荣. LTE-A/WLAN中基于马尔可夫过程的接入选择算法研究[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2014,34(6):16-21.
- [6] NAVARATNARAJAH S, HAN C, DIANATI M R, et al. Adaptive stochastic radio access selection scheme for cellular-WLAN heterogeneous communication systems[J]. IET Communications, 2015, 10(15): 1986-1994.
- [7] CARVALHO GLAUCIO H S, WOUNGANG I, ANPALAGAN A, et al. QoS-Aware Energy-Efficient Joint Radio Resource Management in Multi-RAT Heterogeneous Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6343-6365.
- [8] SHENG J, TANG L R, HAO J H. Hybrid Load Balancing Algorithm Based on Service Transformation and Admission Control in Heterogeneous Wireless Networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2): 321-328. (in Chinese)
盛洁,唐良瑞,郝建红.异构无线网络中基于业务转移和接入控制的混合负载均衡[J].电子学报,2013,41(2):321-328.
- [9] TANG L R, YANG Z, ZHAO L. Effective Access Selection Algorithm for Load Balance in Heterogeneous Wireless Networks[J]. Journal of Applied Sciences, 2013, 31(5): 441-447. (in Chinese)
- [10] LOZANO-GARZON C, MOLINA M, DONOSO Y. A Multi-Objective Approach for a Multihoming Load Balancing Scheme in WHN[J]. INT Journal Of Computers of Communications & Control, 2016, 11(2): 259-272.
- [11] CHEN Y J, LI J, LIN Z H, et al. User Association With Unequal

- User Priorities in Heterogeneous Cellular Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7374-7388.
- [12] YANG S N, KE C H, LIU Y B, et al. Mobility management through access network discovery and selection function for load balancing and power saving in software-defined networking environment[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2016, 9: 1687-1499.
- [13] FAHIMI M, GHASEMI A. Joint spectrum load balancing and handoff management in cognitive radio networks; a non-cooperative game approach [J]. Wireless Networks, 2016, 22 (4): 1161-1180.
- [14] HAN T, ANSARI N. A Traffic Load Balancing Framework for Software-Defined Radio Access Networks Powered by Hybrid Energy Sources[J]. Transactions on Networking, 2016, 24(2): 1038-1051.
- [15] LIU S M, MENG Q M, PAN S, et al. A Simple Additive Weighing Vertical Handoff Algorithm Based on SINR and AHP for Heterogeneous Wireless Networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(1): 235-239. (in Chinese)
刘胜美, 孟庆民, 潘苏, 等. 异构无线网络中基于 SINR 和层次分析法的 SAW 垂直切换算法研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 235-239.

(上接第 67 页)

参考文献

- [1] ZHAO Y F. Development in Satellite TT&C Network[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2002, 21(3): 1-4. (in Chinese).
赵业福. 卫星测控网的技术发展[J]. 飞行器测控学报, 2002, 21(3): 1-4.
- [2] 杨维垣, 张培志. 航天专家系统需求、现状、特点和发展战略的初步研究[J]. 航天器工程, 1993(1): 11-19.
- [3] 周训文. 人工智能及其专家系统在航空航天测控中应用[J]. 测控技术, 1991(3): 10-13.
- [4] LI H, YANG X H, LI H B. Study on Distributed Hierarchical Fault Management Paradigm of Satellite Network[J]. Journal of Chinese Computer System, 2009, 30(7): 1341-1345. (in Chinese)
李航, 杨雪华, 李鸿彬. 卫星网络的分布式层次故障管理模式研究[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(7): 1341-1345.
- [5] WEN Y Y, ZHAO J L, WANG G X. A Network Management System Applying to Integrated Satellite Information Network [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(2): 231-235. (in Chinese)
闻英友, 赵建立, 王光兴. 一种面向卫星综合信息网的网络管理系统[J]. 兵工学报, 2005, 26(2): 231-235.
- [6] ZHAO Z G, GONG C Q, WANG G X. Identification of Dynamic Routing-Based Faulty Links in LEO/MEO Satellite Communication Networks[J]. Mini-Micro System, 2005, 26(6): 916-919. (in Chinese)
赵志刚, 拱长青, 王光兴. LEO/MEO 卫星网络基于动态路由策略的链路故障检测[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(6): 916-919.
- [7] WANG R Y, WU Q, XIONG Y, et al. Link failure localization algorithm based on Bayesian symptom explained degree[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(3): 712-714. (in Chinese)
王汝言, 吴晴, 熊余, 等. 基于贝叶斯征兆解释度的链路故障定位算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(3): 712-714.
- [8] ZHANG X J, WANG Z L. Autonomous identification based on correlation of faulty links for satellite communication networks [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2014(3): 10-13. (in Chinese)
张小娟, 王祖林. 基于关联性的卫星通信网链路故障自主识别[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014(3): 10-13.
- [9] ZHANG C K, CUI Y, TANG H Y, et al. State-of-the-Art Survey on Software-Defined Networking (SDN) [J]. Journal of Software, 2015, 26(1): 62-81. (in Chinese)
张朝昆, 崔勇, 唐嵩祎, 等. 软件定义网络 (SDN) 研究进展[J]. 软件学报, 2015, 26(1): 62-81.
- [10] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 69-74.
- [11] COMMITTEE O, et al. Software-defined networking: The new norm for networks[R]. Open Networking Foundation, 2012.
- [12] TANG Z, ZHAO B, YU W, et al. Software defined satellite networks: Benefits and challenges [C] // Computing, Communications and IT Applications Conference (ComComAp), 2014 IEEE. IEEE, 2014: 127-132.
- [13] GOPAL R, RAVISHANKAR C. Software defined satellite networks[C] // 32 nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), 2014.
- [14] RYU H. Welcome to RYU the Network Operating System (NOS) [EB/OL]. <http://ryu.readthedocs.org/>
- [15] <https://github.com/osrg/ryu/blob/master/ryu/topology/api.py>.
- [16] HOU L, WANG S, LIN Y K, et al. Link Failure Recovery Based on SDN[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(6): 18-23. (in Chinese)
侯乐, 汪硕, 林毅凯, 等. 基于 SDN 的链路故障恢复[J]. 电信科学, 2015, 31(6): 18-23.
- [17] SGAMBELLURI A, GIORGETTI A, CUGINI F, et al. Effective flow protection in open-flow rings [C] // National Fiber Optic Engineers Conference. Optical Society of America, 2013: JTh 2A. 01
- [18] Open vSwitch Homepage [EB/OL]. <http://openvswitch.org/>
- [19] LANTZ B, HELLER B, MCKEOWN N. A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks [C] // Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks. ACM, 2010: 19.
- [20] VAN ADRIKHEM N L M, VAN ASTEN B J, KUIPERS F A. Fast recovery in software-defined networks [C] // 2014 Third European Workshop on Software Defined Networks. IEEE, 2014: 61-66.