

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.012

引用格式:郭娟,张森,姚远.一种软件定义无线网络负载均衡架构及算法[J].电讯技术,2017,57(1):72-77.[GUO Juan,ZHANG Sen,YAO Yuan.
A load balancing architecture and algorithm for software defined wireless networks[J].Telecommunication Engineering,2017,57(1):72-77.]

一种软件定义无线网络负载均衡架构及算法*

郭娟^a,张森^{**a},姚远^b

(西安邮电大学 a.通信与信息工程学院;b.电子工程学院,西安 710121)

摘要:软件定义网络(SDN)为实现异构无线网络中的负载均衡提供了新的思路。设计了一种软件定义的无线网络负载均衡架构,并提出对应算法。首先,根据接收信号强度构建候选网络列表;其次,根据各候选网络的可用负载比率标准差进行负载差异分级;再次,将服务质量匹配度函数和负载均衡指数线性组合成联合优化函数,并根据负载差异分级对联合优化的权重进行动态调整,合理设置门限进行接纳控制。与传统算法相比,所提算法一方面可使各类业务阻塞率明显降低大约 20%,另一方面使不同网络的归一化负载更加接近。该算法在进行网络负载均衡的同时,能够有效降低业务阻塞率,从而有效提升异构无线网络的整体性能。

关键词:软件定义网络;异构无线网络;负载均衡;接纳控制

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2017)01-0072-06

A Load Balancing Architecture and Algorithm for Software Defined Wireless Networks

GUO Juan^a,ZHANG Sen^a,YAO Yuan^b

(a. School of Communication and Information Engineering;b. School of Electronic Engineering,
Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Software defined network(SDN) provides a new way to achieve load balancing in heterogeneous wireless networks. A load balancing architecture and algorithm for software defined wireless network are proposed. First, the algorithm constructs a list of candidate networks based on the received signal strength (RSS). Secondly, by calculating the standard deviation of available load ratio in each available candidate network, the load differences among the candidate networks are classified. Then, a joint optimization function is proposed by linearly combining a quality of service(QoS) matching function and a load balancing index. In accordance with classification results, the weight of the joint optimization function is dynamically adjusted and admission control is realized by setting a reasonable threshold. Compared with traditional algorithm, the proposed algorithm can reduce blocking rate of different services by about 20%; on the other hand, the normalization load of different networks is closer. The algorithm can effectively reduce the traffic congestion rate while balancing the network load, thus effectively improving the overall performance of heterogeneous wireless network.

Key words: software defined network; heterogeneous wireless network; load balancing; admission control

* 收稿日期:2016-05-13;修回日期:2016-07-12 Received date:2016-05-13;Revised date:2016-07-12

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2014AA01A703);陕西省工业攻关项目(2014K09-14)

** 通信作者:763462905@qq.com Corresponding author:763462905@qq.com

1 引言

在 2G/3G/4G/WiFi 等无线网络并存的环境中,异构性导致接入网之间相互独立工作,资源得不到合理的分配,很容易出现某个网络过度使用而其他网络的资源利用率较低的负载不均衡现象,无线资源的分配和管理不够合理有效。

针对异构网络的负载均衡问题,已有一些研究成果。文献[1]通过定时计算各小区的负载效用,将部分业务从负载较高的小区强制转移,实现负载均衡。文献[2]将异构系统小区负载划分为轻载、平衡、过载和重载 4 种状态,并根据负载状态的不同提出了基于强制切换的负载均衡算法。文献[3]提出了负载度量指数,是将负载均衡的两阶段相结合的负载均衡算法。文献[4]中提出了基于模糊层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 的网络选择方法。文献[5]建立了动态的异构网络模型和相应的动态负载均衡算法。然而,以上研究主要是基于网络侧性能而言的,均不能兼顾用户的业务需求和全局资源分配,存在一定不足。

传统的基于硬件的异构无线网络架构存在体系复杂、更新换代速度慢等问题,导致无线资源紧缺,数据拥塞等问题变得更加突出,使移动用户在使用中体验变差。软件定义网络 (Software Defined Network, SDN) 通过控制面与数据面分离,将传统上垂直集成的网络堆栈分解开来,以提高网络灵活性和可管理性,可对网络运营进行大规模定制,从而为差异化服务提供更有效的支持^[6]。目前,SDN 概念在数据中心、计算机网络中的应用较多,但在无线网络中的研究还相对较少。

文献[7]分析了 SDN 在无线通信中的发展和可能面临的挑战。文献[8-10]将 SDN 引入无线网络,并给出了相应的开放、可编程的无线通信网络架构。文献[11]提出了分布式的无线网络架构。SDN 网络以灵活的架构、可编程的特性及开放的接口为异构无线网络的负载均衡提供了新的解决思路。

本文基于 SDN 网络,设计了一种无线软件定义网络负载均衡架构 (Load Balancing in Wireless Software Defined Network, LB-W-SDN),通过综合定量考虑用户的业务需求及网络的负载情况,提出了一种应用于该架构的基于剩余负载比率差异分级的联合优化负载均衡算法 (Combined Optimal Load Balancing algorithm based on the Difference of residual

Load Ratios, COLB-DLR)。通过对不同小区的剩余负载的差异分级,同时考虑业务的服务质量 (Quality of Service, QoS) 需求和负载均衡目标,对提出的联合优化函数权重进行调整,对请求接入的业务进行动态接纳控制,实现负载均衡。

2 LB-W-SDN 架构

LB-W-SDN 架构如图 1 所示,分为 3 层。第三层为应用软件层,其中装载的是定制化可编程的负载均衡软件,通过开放的北向接口与下一层相连接。第二层为控制层,即负载均衡控制器,通过 OpenFlow 等南向接口协议与 SD-CN 以及 SD-CN 相连的无线接入点 (LTE BS, UMTS BS 以及 WLAN AP 等) 连接,可以实时进行负载均衡策略的制定和执行。第一层由 SD-CN、SD-RAN 等物理基础设备组成,它们进行数据流的传输和转发,通过南向接口与负载均衡控制器相连。该架构的具体运行流程如图 2 所示。

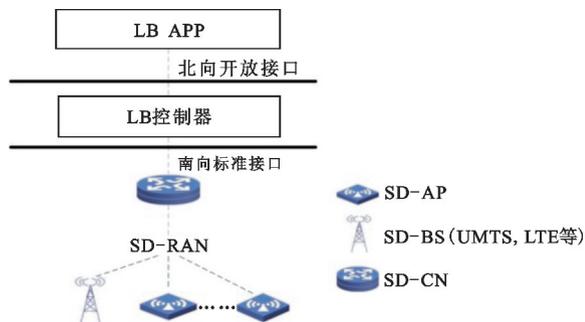


图 1 基于 SDN 的无线网络负载均衡架构
Fig. 1 Architecture of LB-W-SDN

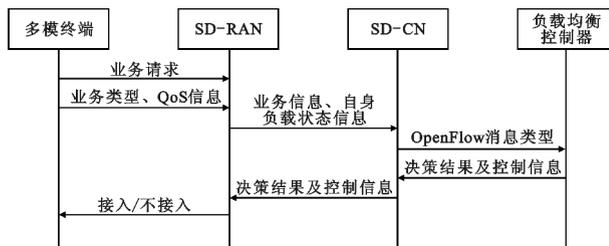


图 2 负载均衡架构运行流程
Fig. 2 Operation process of LB-W-SDN

3 负载均衡算法

基于上述 LB-W-SDN 架构,我们提出 COLB-DLR 算法。首先,基于系统内各种接入技术的平均可用资源剩余率对系统内不同小区间的负载差异状态进行分级;其次,根据层次分析法计算不同业务

QoS 指标的权重,建立请求接入业务的 QoS 匹配度函数;第三步根据 Jain's 公平指数(Jain's Fairness Index, JFI)^[12]定义的负载均衡函数进行网络选择。

3.1 构建候选网络列表

在新/切换呼叫到达的时候,需要对当前位置所有网络的接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)进行判断,如果 RSS 强度高于门限,则该网络属于可用网络,如公式(1)所示:

$$Network_list = Network\{RSS_i > RSS_{th}\}, i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (1)$$

同时,若终端速度不超过 30 km/h,则可以包含无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN),否则将 WLAN 从列表中删除。

3.2 负载差异程度的状态分级

在所有可用无线接入技术(Radio Access Technology, RAT)中,计算剩余可用带宽资源与总带宽资源的比值,以及各 RAT 资源剩余率之间的标准差,以此对系统的负载差异状态进行分级,从而执行不同的负载均衡策略。

假设当前区域内有 k 个 RAT,第 i 个系统的剩余带宽资源、总带宽资源分别为 V_{left_i} 和 V_{total_i} ,则可用带宽的剩余比率 $R_{left_i} = \frac{V_{left_i}}{V_{total_i}}$,系统的平均资源剩余率 $V_{left_avg} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k R_{left_i}$ 。计算负载差异状态的标准差,如公式(2)所示:

$$Diff_{v_left} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (R_{left_i} - V_{left_avg})^2}. \quad (2)$$

$Diff_{v_left}$ 越大,则代表系统各 RAT 间的剩余带宽资源比率越接近,系统的负载状态较为均衡;反之,则说明负载状态较为不均。容易得出 $Diff_{v_left}$ 的取值范围为 $0 \leq Diff_{v_left} \leq (k-1)^{1/2}/k$,根据 $Diff_{v_left}$ 的取值不同,将不同 RAT 间负载差异化程度分为低、中、高 3 个等级,编号分别为 1、2、3。

3.3 QoS 匹配度函数

不同业务具有不同的 QoS 需求,根据 3GPP 标准对业务性能的要求,匹配度函数选取了两大类共 6 种 QoS 参数:一类是网络预置的信息,如价格(P)和安全性(S)等,这些预置信息一定程度上能够反映发起该业务请求的用户的使用偏好;另一类是在不同时刻动态变化的时变信息,包括吞吐量(T)、时延(R)、时延抖动(RJ)、分组丢失率(B)等,这些信

息由于不同接入技术的差异而在不同范围内变化。

由于不同业务类型的 QoS 需求的数值大小和单位不一致,因此需将这些参数进行归一化处理。有些 QoS 参数属于“越高越好”的参数类型,例如吞吐量、带宽等;而有些参数则属于“越低越好”的参数类型,例如时延、时延抖动、分组丢失率等。还有一些与用户偏好相关的 QoS 指标,例如安全性、价格便宜程度等因素则可以用“很高、高、中、低、非常低”等模糊值来表示,这里利用层次分析法将这些模糊值量化为 0.09、0.28、0.5、0.72、0.9。显然,用户倾向于选择安全性高、电池能耗低、价格便宜的 RAT,然而这些用户偏好的选网指标之间很有可能是相互矛盾的。故需要综合考虑这些选网因素,正确合理地选择 RAT。

根据以上分析,定义业务理想的 n 维 QoS 指标向量 $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$,同时将第 n 个网络的 QoS 实测值记作向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$,记权重向量为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$,可以定义基于 QoS 的匹配度函数,如公式(3)所示:

$$sim(W, A) = 1 - \frac{\sqrt{(w_1 s_1 - w_1 a_1)^2 + (w_2 s_2 - w_2 a_2)^2 + \dots + (w_n s_n - w_n a_n)^2}}{\sqrt{(w_1 s_1)^2 + (w_2 s_2)^2 + \dots + (w_n s_n)^2}}, \quad 0 \leq sim(W, A) \leq 1. \quad (3)$$

由上式容易看出,业务的理想 QoS 与网络实际 QoS 越接近, $sim(W, A)$ 越大,业务的 QoS 需求与接入网络实际 QoS 状况的匹配度越高。并且由 $sim(W, A)$ 的取值范围容易得出,当其值为 0 时,表明当前网络仅能满足该项业务能够容忍的最低 QoS 需求,而当其值为 1 时,表明对应的网络能为该业务提供最好的服务。

3.4 负载均衡函数

为了描述异构网络系统总体的负载情况,根据 Jain's 公平指数^[12],定义如公式(4)所示的负载均衡函数:

$$B(i) = \frac{\left[\sum_{j=1, j \neq i}^K \frac{x_j}{W_{T,j}} + \frac{x_i + W_{i,s}}{W_{T,i}} \right]^2}{K \left[\sum_{j=1, j \neq i}^K \left(\frac{x_j}{W_{T,j}} \right)^2 + \left(\frac{x_i + W_{i,s}}{W_{T,i}} \right)^2 \right]}. \quad (4)$$

假设当前业务 s 请求接入到编号为 i 的网络中,则 x_j 代表该业务成功接入到网络 i 时编号为 j 的网络的负载, x_i 指业务 s 接入当前网络 i 的负载。 $W_{i,s}$ 代表网络 i 当前能够为业务 s 提供的带宽, $W_{T,j}$ 则是网络 j 的最大负载, K 为当前时刻当前区域内候选网络列表内的网络总数,其值范围为 $1/K \sim 1$,

其物理意义是,系统各网络之间的负载越均衡,则均衡函数计算出的均衡值越大。

3.5 COLB-DLR 算法

为了综合考虑用户的 QoS 需求和网络的负载情况,联合优化指数由上述 QoS 匹配度函数和负载均衡函数线性组合而成,如公式(5)所示:

$$J(m) = m \times sim(W, A) + (1 - m) \times B(i). \quad (5)$$

式中: $0 \leq m \leq 1, 0 \leq J(m) \leq 1$; W, A 分别为经过归一化处理的业务的理想以及实际的 QoS 指标加权向量。根据区域内各个网络之间负载差异程度的不同, m 的取值也不相同。当各小区间剩余可用负载的差异程度为低等级时,主要通过 QoS 优选来分配接入网络;当差异程度为中等级时,需要同时兼顾请求接入业务与网络的 QoS 匹配度以及不同网络间的负载均衡因素;而当差异程度为高等级时,则主要考虑负载均衡的因素,在仅提供业务最低的 QoS 需求时,将负载差异化的程度降低。不同小区间剩余负载的差异程度的分级,有不同的 m 值与其对应,如表 1 所示。同时, $m = 0.5$ 时,为联合优化函数设定了接入门限值 G 。

表 1 与负载差异程度对应的 m 取值

负载差异程度编号	m 值
1	1.0
2	0.5
3	0.0

整个算法的流程如图 3 所示。

表 2 仿真网络参数值

Tab. 1 Simulation parameters value of different RATs

网络	D/km	$T/(Mb \cdot s^{-1})$	R/ms	RJ/ms	$B/\%$	P	S
LTE	0.40	15	5 ~ 20	5 ~ 14	0.05 ~ 0.10	0.72	0.72
UMTS	0.30	5	30 ~ 45	15 ~ 25	0.20 ~ 0.50	0.50	0.72
WLAN	0.15	15	110 ~ 150	35 ~ 60	0.15 ~ 0.45	0.09	0.28

业务请求的到达率服从参数 λ 的泊松分布,持续时间为指数分布。仿真中每个请求接入业务的终端都具有一定的速度,速度的范围为 $0 \sim 90$ km/h。新业务与切换业务的比率为 3 : 1,由于切换业务比新业务的被动拒绝接入更令用户难以接受^[13],所以在负载差异等级为 2 的时候,为切换业务和新业务的联合优化函数设置不同的判决门限,分别为 0.4 和 0.5,同时,切换业务相对新业务具有较高的优先级。

利用 Matlab 对 COLB-DLR 算法进行了仿真,对比算法为成熟的最小连接数负载均衡算法(Least

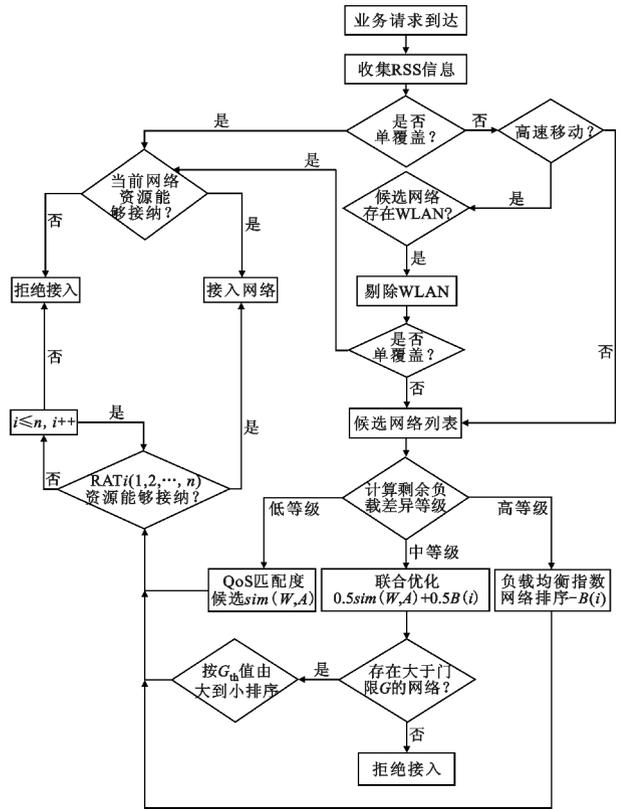


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the proposed algorithm

4 算法仿真及结果分析

在 Matlab 仿真环境中建立由 LTE、UMTS、WLAN 共 3 种接入技术组成的异构无线接入环境,各网络参数的值如表 2 所示。

Connections Load Balancing, LCLB)。此算法的核心思想是在所有当前请求接入的终端的候选列表中,将当前已接入业务的连接数最少的 RAT 作为首选网络,在有可用资源的情况下自动接纳该终端的业务请求。

图 4 为各 RAT 的归一化负载情况。由图可以看出,与 LCLB 相比,COLB-DLR 算法下不同接入技术的归一化负载曲线更为接近,说明整个异构网络环境的负载更加均衡,因为 COLB-DLR 算法不仅综合考虑了业务 QoS 需求和网络负载状况,并且根据

不同 RAT 之间剩余负载比率的差异等级对算法的参数做了动态的调整,从而有效提高了整个系统的资源利用率。图 5 为整个异构环境中的整体资源使用率,从此图可以更加直观地看出,由于资源的不均衡利用,LCLB 算法中的整体资源利用率较 COLB-DLR 算法低。

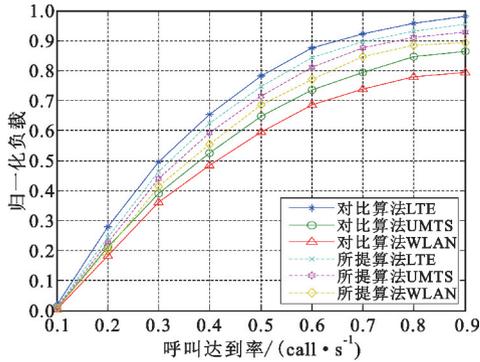


图 4 归一化负载
Fig. 4 Normalized load

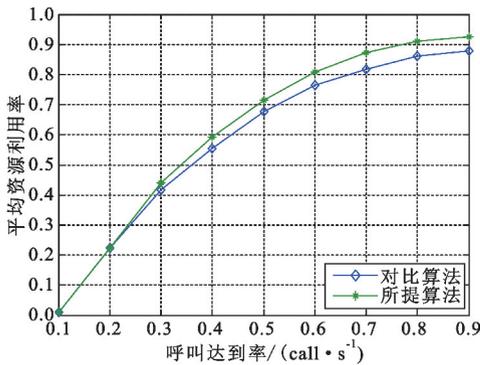


图 5 平均资源利用率
Fig. 5 Average resource utilization

图 6 ~ 9 为两种算法下 4 类业务的新、切换请求的阻塞率对比。由图可以看出,在呼叫到达率较小 (0.1 ~ 0.3 call/s) 的情况下,由于系统资源充足,两种算法的阻塞率都较低且比较接近。在呼叫到达率不断增加的情况下, COLB-DLR 算法在降低阻塞率方面有更好的性能。原因在于 COLB-DLR 算法在进行接纳控制时既考虑了用户的 QoS 需求,又考虑了系统整体的负载均衡,资源利用更为合理,有效避免了某个网络因大量的接入请求及资源占用导致的资源紧张而其他网络资源利用率相对较低的情况出现,降低了业务请求的阻塞率。同时,由于对新、切换两种业务请求类型作了优先级的区分,所以切换业务请求的阻塞率比新业务请求的阻塞率要低一些,尤其是在呼叫到达率较大的时候,这种效果更加明显。

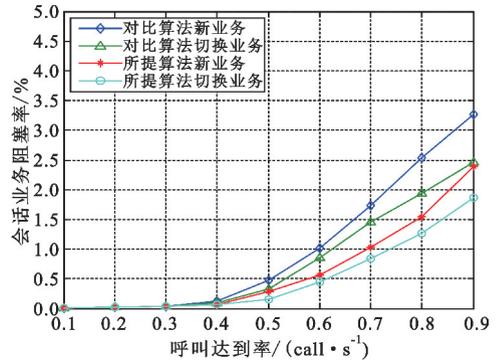


图 6 会话业务阻塞率
Fig. 6 Session service's blocking rate

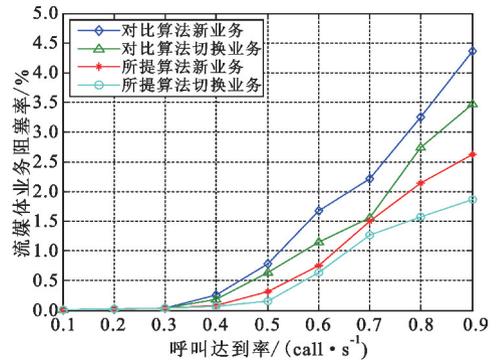


图 7 流媒体业务阻塞率
Fig. 7 Stream service's blocking rate

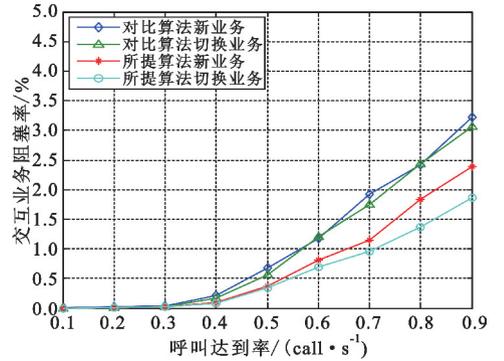


图 8 交互业务阻塞率
Fig. 8 Interactive service's blocking rate

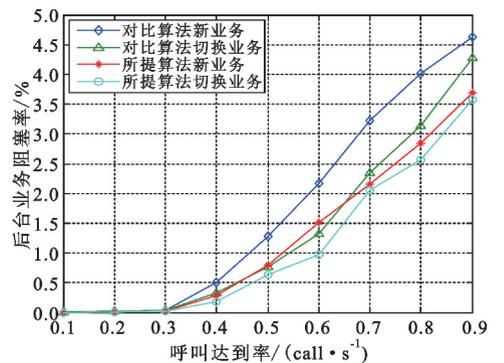


图 9 后台业务阻塞率
Fig. 9 Background service's blocking rate

5 结束语

传统基于硬件的无线网络负载均衡架构难以快速地适应网络状态和业务的变化,而控制面与数据面分离的 SDN 技术为异构无线网络的负载均衡提供了新的思路。为了兼顾不同网络间的负载均衡和满足不同业务的 QoS,设计了一种基于 SDN 的无线网络负载均衡架构,并提出了对应的 COLB-DLR 算法。通过性能仿真,验证了该算法在均衡各接入网络负载的同时,有效降低了各种业务的阻塞率。所提出的网络架构和算法能够提高异构无线网络的系统资源整体利用率。与已有算法主要关注网络侧性能不同,所提算法能够同时满足网络侧和用户侧两方面的性能需求,更好地提高异构无线网络性能。但目前的研究主要考虑了不同业务的阻塞率,在今后的工作中将进一步考虑不同业务的时延、丢包率等性能指标,并进一步降低算法的复杂度。

参考文献:

- [1] 郭强,车玉洁,张晓萌,等. 基于效用函数的异构网络负载均衡算法[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2015(11):61-66.
GUO Qiang, CHE Yujie, ZHANG Xiaomeng, et al. Load balancing algorithm for heterogeneous wireless networks based on utility function[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2015(11):61-66. (in Chinese)
- [2] 张丽娜,异构无线网络中的网络接入决策机制研究[D]. 南京:南京邮电大学,2015.
ZHANG Lina. Research on network access decision mechanism in heterogeneous wireless networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015. (in Chinese)
- [3] 陈晓玉. 异构无线网络的负载均衡算法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2013.
CHEN Xiaoyu. Research on load balancing algorithm for heterogeneous wireless networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015. (in Chinese)
- [4] 顾海,徐名海,闫焕杰. 异构融合网络中利用模糊层次分析法的网络选择算法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2012, 32(6):50-57.
GU Hai, XU Minghai, YAN Huanjie. A fuzzy AHP networks selection algorithm in the heterogeneous networks[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2012, 32(6):50-57. (in Chinese)
- [5] 张浩军,朱艳琴,纪其进. 面向异构网络的动态负载均衡算法及其收敛性分析[J]. 电子与信息学报, 2013(9):2247-2253.
ZHANG Haojun, ZHU Yanqin, JI Qijin. A diffusion-based

dynamic load balancing algorithm for heterogeneous networks and its convergence analysis[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2013(9):2247-2253. (in Chinese)

- [6] HU F, HAO Q, BAO K. A survey on software-defined network and openflow: from concept to implementation[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4):2181-2206
- [7] CHAUDET C, HADDAD Y. Wireless software defined networks: challenges and opportunities[C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems. Tel Aviv, Israel: IEEE, 2013:1-5.
- [8] YANG M, LI Y, JIN D P, et al. Software-defined and virtualized future mobile and wireless networks: a survey[J]. Mobile Networks and Applications, 2015, 20(1):4-18.
- [9] AKYILDIZ I F, LIN S C, WANG P. Wireless software-defined networks(W-SDNs) and network function virtualization(NFV) for 5G cellular systems: an overview and qualitative evaluation[J]. Computer Networks, 2015, 93(24):66-79.
- [10] SADIQ S, SHAUKAT F, MAHBOOB T. A survey on wireless software defined networks[J]. International Journal of Computer and Communication System Engineering(IJCCSE), 2015, 2(1):155-159.
- [11] PENTIKOUSIS K, WANG Y, HU W. Mobileflow: toward software-defined mobile networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(7):44-53.
- [12] WANG L, LU Z, SHAO H, et al. Open wireless network architecture in radio access network[C]// Proceedings of 2013 IEEE 38th Vehicular Technology Conference. Las Vegas, NE: IEEE, 2013:1-5.
- [13] 余翔,张丽,王蓉. LTE-A 中异构网络的切换分析[J]. 电讯技术, 2014, 54(1):89-96.
YU Xiang, ZHANG Li, WANG Rong. Analysis on handover process for heterogeneous network in LTE-A[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(1):89-96. (in Chinese)

作者简介:



郭娟(1973—),女,陕西合阳人,2001年获硕士学位,现为副教授,主要从事移动互联网、宽带通信网研究;

Email: guojuan@xupt.edu.cn

张森(1990—),男,陕西汉中,人,硕士研究生,主要研究方向为通信与信息系统;

Email: 763462905@qq.com

姚远(1991—),男,江苏南京人,硕士研究生,主要研究方向为光学设计与仪器。

Email: 503095155@qq.com