

# 基于服务质量感知的异构无线网络负载均衡算法

焦毅<sup>1,2</sup>, 易克初<sup>1</sup>, 马懋德<sup>3</sup>, 马英红<sup>1</sup>, 董旭<sup>2,4</sup>

(1. 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 西安 710071; 2. 西安通信学院信息服务系, 西安 710106; 3. 南洋理工大学电气与电子工程学院, 新加坡 639798; 4. 解放军理工大学通信工程学院, 南京 210007)

**摘要:** 为了实现合理的网络资源调度, 提高异构无线网络资源利用率, 提出了一种基于服务质量(Quality of service, QoS)感知的网间负载均衡算法。算法基于无线业务特征, 定义了适用于异构网络的一般化终端收益函数和网络效用函数, 分别用来表征终端的 QoS 体验和网络的负荷情况。算法迭代地把负荷最重的网络中 QoS 收益和资源利用效率较低的终端调度到能够提高该终端 QoS 收益的负荷最轻的网络中, 直至达到网络负载平衡, 实现网络资源的均衡利用, 并有利于保证终端的 QoS。仿真结果表明: 算法能够有效地提高网络的吞吐量、降低业务的时延和丢包率。

**关键词:** 通信技术; 异构网络; 服务质量; 负载均衡

**中图分类号:** TN929.5    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5497(2013)03-0794-07

**DOI:** 10.7964/jdxbgxb201303039

## QoS-aware load-balancing algorithm for heterogeneous wireless networks

JIAO Yi<sup>1,2</sup>, YI Ke-chu<sup>1</sup>, MA Mao-de<sup>3</sup>, MA Ying-hong<sup>1</sup>, DONG Xu<sup>2,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Department of Information Service, Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore; 4. Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** For efficient network resources dispatching in heterogeneous wireless network scenarios, a Quality of Service (QoS) aware load-balancing algorithm was proposed. Based on the characteristics of different wireless services, the algorithm defines a utility function for each terminal to represent its QoS experience and a utility function for each Radio Access Network (RAN) to represent its load level. The definitions apply to all heterogeneous RANs. The algorithm conducts an iterative load-balancing procedure, where it always tries to handover a terminal, which is with low QoS utility and resource utilization served by the busiest RAN, to another RAN, which has the lightest load among the RANs. This RAN with the lightest load is capable of increasing the terminal's QoS utility, until network load balance is reached. Such a procedure can help to realize better wireless resource

**收稿日期:** 2012-03-28.

**基金项目:** 综合业务网国家重点实验室开放课题基金项目(ISN-9-05); 中央高校基本科研业务费专项项目(K5051201020); 国家自然科学基金项目(61101146); 国家科技重大专项项目(2009zx03003-001-02); 高等学校学科创新引智计划项目(B08038).

**作者简介:** 焦毅(1980-), 男, 讲师, 博士研究生. 研究方向: 无线资源管理. E-mail: jiaoyi80@yahoo.com.cn

deployment and ensure terminal QoS. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively increase the throughput, reduce the time-delay and packet loss rate of the network.

**Key words:** communication; heterogeneous networks; quality of service(QoS); load balancing

通过异构网络的融合达到无线资源共享已成为下一代无线网络研究的发展方向<sup>[1-2]</sup>。合理的异构网络资源调度是实现高效无线资源共享的关键技术。网络负载均衡技术能够有效地降低异构网络间资源利用的不均衡性<sup>[3]</sup>,是实现网络资源合理调度的重要途径之一。在融合的异构无线网络中,终端可以在异构的无线接入网(Radio access network, RAN)间进行动态的网络选择、接入和切换,实现各RAN负载的均衡化,从而提高网络吞吐量和整体性能。目前,对网络负载均衡的研究主要集中于同构网络不同小区间的负载均衡<sup>[4-5]</sup>和特定种类异构网络间的负载均衡。已有的研究中根据实现方式可将其分为两类:一类是接入式负载均衡<sup>[6-7]</sup>;另一类是切换式负载均衡<sup>[8-9]</sup>。与接入式负载均衡相比,切换式负载均衡具有反应迅速、收敛速度快的优点。但是,进行切换式负载均衡的关键前提是正确评估各小区的负载情况。对于同构网络,各小区的负载可用统一的指标来衡量<sup>[10-11]</sup>。然而,在异构无线网络环境下,各异构网络在业务类型、资源分配方式以及服务质量保证能力等方面存在很大的差异,如何衡量和比较各异构网络的负载成为一个难题。

针对上述情况,本文提出了一种基于QoS感知的异构无线网络切换式负载均衡算法。该算法首先定义了适用于异构网络的一般化终端收益函数和网络效用函数,分别用来表征终端服务质量和网络负荷情况。然后,动态地、迭代式地把负荷最重的网络中QoS收益和资源利用效率较低的终端调度到能够提高该终端QoS收益的负荷最轻的网络中,降低了各网络、各小区间的负载差异,提高了网络资源的利用效率。

## 1 场景设定

未来的异构无线网络融合的环境中将存在多个RAN,这些RAN可能分属不同的运营商,采用不同的空中接口技术,提供不同的业务类型,具有不同的网络拓扑,使用不同的频段。有些RAN可能使用遗留的基站,只提供特定的接入技术;而有些RAN也可能是支持多种接入技术的多模一体化基站。终端也分为遗留的终端和多模终端两

种,多模终端支持多种接入模式,具有重构能力。考虑当前无线网络的发展现状(多模终端的研发进展远远领先于多模基站),将系统背景设定为:RAN均为遗留的基站,而终端均为具有重构能力的多模终端。

为了使终端能够动态有效地进行RAN的选择和接入,将从网络侧对多模终端进行统一的管理,由网络侧管理实体(Network side manager, NSM)完成。而终端将通过终端侧管理实体(Terminal side manager, TSM)与NSM进行交互,实现动态的切换/接入重构。NSM和TSM的交互将通过管理控制信道(Management and control channel, MCC)完成。NSM部署在核心网内,为多个RAN所共享。RAN将各自的上下文信息发送给NSM,NSM再将各个RAN的上下文信息通过MCC的下行链路发送给终端,供终端进行接入决策。每个终端的TSM将终端的上下文信息通过MCC的上行链路发送给NSM。NSM根据RAN和终端的上下文信息,使用相应算法制定网络选择策略,并将策略下发给各个终端。终端则根据自身需求和网络选择决策进行重构配置,接入相应的RAN。文中假设终端在网络/小区间的切换速度足够快,因而,负载均衡过程中,由于切换时延造成上层业务中断的风险可以忽略。

## 2 算法

算法的核心思想是:终端的QoS收益能够反映终端从当前网络获得的服务质量水平,收益越大,则表明得到的服务质量越高,反之亦然;一个接入网中所有终端的平均QoS收益(下文定义为网络效用)能够反映该网络的负荷水平,终端的平均收益越大,则表明该网络的负荷越轻,反之亦然;为了实现负载分散化并提高终端的服务质量,算法将把负荷重的网络中收益小的终端的业务切换到负荷轻的网络中。

### 2.1 终端QoS收益及接入网网络效用

不同类型的无线网络业务具有不同的QoS需求。根据无线网络中各种业务的特征,可将无线业务归纳为3种基本业务类型,如表1所示。

表 1 无线网络业务类型及其 QoS 需求  
Table 1 Services types and QoS requirements of wireless networks

	速率变化	最小速率	最大速率	时延需求	典型业务
实时业务	恒定	$r^{\min} = r^{\max}$	$r^{\min} = r^{\max}$	$d^{\max}$	VoIP
业务	可变	$r^{\min}$	$r^{\max}$	$d^{\max}$	MPEG
非实时业务	可变	$r^{\min}$	$r^{\max}$	$\infty$	HTTP

根据实时性要求,将无线业务分为实时(Real time, RT)业务和非实时(Non-real time, NRT)业务两大类。根据速率是否变化,实时业务又被分为恒定速率和可变速率两类。实时恒定速率业务的最小速率需求  $r^{\min}$  和最大速率需求  $r^{\max}$  相等,即速率保持不变。实时可变速率业务则具有最小和最大速率需求。当实时业务分组的等待时间超过最大时延容限  $d^{\max}$  时,该分组就会被丢弃。非实时业务没有对时延的需求,并且其最小带宽需求可以为零。

为了表征终端从当前网络所获得的服务质量,基于不同业务的 QoS 需求,利用 Sigmond 函数构造终端收益函数<sup>[4,12]</sup>。令  $J$  表示所有 RAN 的集合; $I$  表示网络中所有终端的集合。定义接入到  $RAN_j \in J$  的终端  $i \in I$  的 QoS 收益函数如下:

$$U_{i,j} = \begin{cases} (1 - \frac{1}{1 + \exp(-\beta_{rt} \times \frac{d_{i,j} - d_{i,j}^e}{d_{i,j}^{\max} - d_{i,j}^e})}), & \text{RT} \\ \frac{1}{1 + \exp(-\beta_{nrt} \times \frac{r_{i,j} - r_{i,j}^{\min}}{r_{i,j}^{\max} - r_{i,j}^{\min}})}, & \text{NRT} \end{cases} \quad (1)$$

对于实时业务,在满足最小带宽的前提下,使用平均时延  $\bar{d}_{i,j}$  衡量用户收益,时延越小,收益越高;对于非实时业务,则使用提供给用户的平均速率  $\bar{r}$  衡量用户收益,速率越大,收益越高;  $(\bar{d}_{i,j} - d_{i,j}^e)/(d_{i,j}^{\max} - d_{i,j}^e)$  对实时业务的时延进行归一化,其中  $d_{i,j}^e$  表示实时业务的平均时延的期望值;  $(\bar{r}_{i,j} - r_{i,j}^{\min})/(r_{i,j}^{\max} - r_{i,j}^{\min})$  在对非实时业务的速率进行归一化的同时,亦将有利于保证非实时业务的最小速率;  $\beta_{rt}$  和  $\beta_{nrt}$  为常参量,其决定了函数曲线的陡峭程度,值越大,则曲线的变化越陡峭,终端对服务质量的敏感程度越高。式(1)所定义的 QoS 收益函数体现了终端的 QoS 感知,该函

数将多个 QoS 参数合理地映射为用户感知或体验到的 QoS 水平,给出了衡量不同用户的 QoS 水平的统一的量化标准。

为了表征接入网的负荷水平,定义无线接入网的网络效用为接入该网络的所有终端的平均 QoS 收益。假设在某一时刻,一个终端只能接入一个 RAN,则  $RAN_j \in J$  的收益可以表示为

$$\bar{U}_j = \begin{cases} \frac{\sum_{i \in I} \delta_{i,j} U_{i,j}}{\sum_{i \in I} \delta_{i,j}}, & \sum_{i \in I} \delta_{i,j} \neq 0 \\ 1, & \sum_{i \in I} \delta_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\delta_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{终端 } i \text{ 接入 } RAN_j \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$

显然,较重网络负荷将导致较低的终端平均 QoS 收益,反之则终端平均 QoS 收益较高。因此,终端的平均 QoS 收益,即网络效用能够反映网络的负荷情况。网络效用越高,表明网络负荷越轻,反之则表明网络负荷越重。

### 2.2 算法设计

当异构融合网络中负载分布呈现不均衡状态时,基于 QoS 感知的负载均衡算法将被触发。算法对网络负载分布进行迭代式的调整。每次迭代过程可以描述为:①从全网中选择一个重负荷的接入网,称为待减负接入网;②从待减负接入网中选择一个终端,作为需要切换到其他接入网中的终端,称为待切换终端;③为待切换终端选择一个轻负荷的接入网,作为该终端切换的目的接入网,称为待增负网络;④若所选待增负网络能够提高待切换终端的服务质量,则将待切换终端切换到待增负网络中,进入下一次迭代;否则该终端仍停留在待减负网络中,然后从待减负网络中选择另一个终端作为待切换终端,再次执行③和④。若待减负网络中所有终端都选择停留在该待减负接入网中,则认为网络负载分布的均衡程度已无法再提高,算法结束。

基于 QoS 感知的负载均衡算法(QoS-aware load-balancing algorithm, QALBA)的核心是:基于网络效用的待减负接入网选择、基于加权 QoS 收益的待切换终端选择以及基于网络效用和终端可接入性检测的待增负接入网选择。

#### 2.2.1 基于网络效用的待减负接入网选择

为了使负载均衡快速收敛,算法在每次迭代过程中找出全网中负荷最重的接入网,并选择其

中合适的终端切换到其他接入网中。

根据第2.1节对网络效用的定义和分析,网络效用能够有效地反映接入网的负荷情况。因此,算法选择网络效用最低的接入网作为待减负网络。若将待减负网络记做 $j^H$ ,则

$$j^H = \operatorname{argmin}_{j \in J} \{\bar{U}_j\} \quad (3)$$

### 2.2.2 基于加权 QoS 收益的待切换终端选择

为了使负载均衡快速收敛,算法在每次迭代过程中找出全网中负荷最重的接入网,并选择其中合适的终端切换到其他接入网中。在待减负接入网中选择需要切换的终端时,不仅要考虑终端在该接入网中的服务质量体验,即应当选择服务质量体验较低的用户切换到其他网络中以期服务质量得到提高,还需考虑用户在待减负接入网中的无线资源利用效率,即应倾向于选择信道状况差的终端切换到其他网络中,以终止其对待减负接入网信道资源的低效占用。为了综合考虑这两个方面,定义终端 $i$ 在 $\text{RAN}_j$ 中的加权 QoS 收益函数如下:

$$U_{i,j}^+ = \alpha_{i,j} \times U_{i,j} \quad (4)$$

式中: $\alpha_{i,j}$ 为加权因子,它体现了终端 $i$ 在接入网 $j$ 中的无线资源利用效率,其定义为

$$\alpha_{i,j} = \frac{R_{i,j}(\rho_{i,j})}{R_{i,j}^{\max}} \quad (5)$$

式中: $R_{i,j}(\rho_{i,j})$ 为终端 $i$ 接入到接入网 $j$ 中,每单位带宽所获得的实际速率, $\rho_{i,j}$ 为终端 $i$ 与接入网 $j$ 之间的信道状况; $R_{i,j}^{\max}$ 为终端 $i$ 接入到接入网 $j$ 中,理论上每单位带宽所能获得的最大速率。因此, $\alpha_{i,j}$ 越大,表明终端 $i$ 与接入网 $j$ 之间的信道状况越好,终端 $i$ 在接入网 $j$ 中的信道利用效率越高。

综合考虑终端的服务质量体验及其对接入网无线资源的利用率,算法选择待减负接入网中加权 QoS 收益最低的终端作为待切换终端。令 $I_j^H$ 表示接入 $j^H$ 的所有终端的集合,则在待减负接入网中选择的待切换终端 $i^H$ 满足

$$i^H = \operatorname{argmin}_{i \in I_j^H} \{U_{i,j^H}^+\} \quad (6)$$

### 2.2.3 待增负接入网的选择

为待切换终端 $i^H$ 选择切换的目的接入网 $j^L$ 时,一方面,需确定终端 $i^H$ 在接入网 $j^L$ 的覆盖范围之内,且 $j^L$ 的剩余容量能够满足 $i^H$ 的最小速率要求。即目的接入网 $j^L$ 应满足

$$\begin{cases} R_{i^H,j^L}(\rho_{i^H,j^L}) > 0 \\ r_{i^H,j^L}^{\min} + \sum_{i \in I} \delta_{i,j^L} r_{i,j^L}^{\min} \leq S_{j^L}^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $S_{j^L}^{\max}$ 表示接入网 $j^L$ 的最大网络容量。

另一方面,为了负载均衡快速收敛,应选择网络负载较轻的接入网作为待切换终端的目的接入网。因此,算法在所有满足式(7)的接入网(待切换终端所接入的待减负接入网除外)所组成的集合(记作 $J^{\text{new}}$ )中,选择网络效用最高的接入网,作为待切换终端的目的接入网络,即待增负网络,可表示为

$$j^L = \operatorname{argmax}_{j \in J^{\text{new}}} \{\bar{U}_j\} \quad (8)$$

### 2.2.4 算法流程

初始化:令 $J$ 表示算法作用域内的异构融合网络中所有 RAN 的集合; $I$ 表示网络中所有终端的集合。

//算法对一定地域范围内的异构融合网络进行负载均衡。

步骤1 选择满足式(3)的接入网 $j^H$ 作为待减负网络;令 $I_j^H$ 表示接入 $j^H$ 的所有终端的集合,可选待切换终端集合 $\bar{I}_j^H = I_j^H$ 。

//选择负载最重的接入网,准备将其部分负载迁移到其他接入网中。

步骤2 在 $\bar{I}_j^H$ 中,选择终端 $i^H = \operatorname{argmin}_{i \in \bar{I}_j^H} \{U_{i,j^H}^+\}$ 作为待切换终端。

//选择服务体验质量和资源利用率低的终端,准备将其切换至其他接入网中。

步骤3 在 $j^H$ 以外的其他接入网中,选择满足式(7)和式(8)的接入网 $j^L$ 作为待增负接入网。

//选择一个轻负荷的接入网作为待切换终端的目的接入网。

步骤4 将待切换终端 $i^H$ 切换至待增负接入网 $j^L$ 中。若 $U_{i^H,j^L} > U_{i^H,j^H}$ ,则终端 $i^H$ 切换到 $j^L$ 中,回到步骤1;否则终端 $i^H$ 仍然回到 $j^H$ ,同时将可选待切换终端集合更新为 $\bar{I}_j^H = \bar{I}_j^H - \{i^H\}$ ,并执行步骤5。

//若待增负接入网能够提高待切换终端的服务质量,则此次调整成功,并重新选择待减负接入网,进行新一轮调整;否则将该待切换终端从可选待切换终端集中去除。

步骤5 若 $\bar{I}_j^H \neq \emptyset$ ,则回到步骤2;

// 从待减负接入网中选待切换终端集中加权 QoS 收益次低的终端, 尝试将其切换至其他接入网。

否则算法终止。

// 待减负接入网中所有终端均选择停留在该接入网中, 无法进一步提高网络负载均衡程度, 认为已达到负载均衡状态。

从算法的流程中可以看出: 通过统一的 QoS 收益函数设计, 网络效用和终端的收益得以量化衡量。通过网络和终端的选择及切换, 网络之间的效用和终端之间的 QoS 收益趋向于均衡。付出的代价是根据算法的设计, 需要运行于网络和终端上的管理实体执行算法, 并交互相应的 QoS 信息和网络选择策略。执行算法的网络侧和终端侧管理实体可以自然而方便地由异构网络融合框架中的 NSM 和 TSM 完成, 信息和策略的交互可以通过 MCC 中的上下文信息完成。在当前的技术水平下, NSM 和 TSM 本身具有强大的运算能力, 而负载均衡不需要严格的实时性, 且交互的 QoS 信息和选择策略数据量很小, 因而提出的算法可以以较小的代价取得网络和终端性能的显著提升。

### 3 仿真及结果分析

使用 OMNET++ 4.0 对提出的算法进行性能评估。设定系统中存在 802.11 和 802.16 两种类型的 RAN, 每种类型的 RAN 各有 2 个。仿真中只考虑上行业务, 802.16 RAN 使用单载波 TDD 模式, 每个 TDD 帧中上下行子帧各占一半; 802.11 RAN 使用 DCF 模式。设定系统中存在 30 个用户(终端), 每个用户只使用一种业务, 每种业务各 10 个用户。设定 802.16 RAN 中的用户密度较大, 用户到 RAN 的 SINR 随机变化。用户同一时刻只能接入 1 个 RAN。业务的分组到达服从泊松分布。可变速率业务的最小速率为平均速率的 1/2。用户初始接入网络的选择基于信噪比(Signal-to-interference plus noise ratio, SINR)准则进行, 即根据用户与各个 RAN 之间的信道状况, 动态地选择 SINR 最高的 RAN 接入, 同时根据参考文献[9]的 802.16/802.11 融合网络用户接入网络选择原则, 将实时恒定速率业务用户接入 802.16 网络。网络使用相关仿真参数的设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

Table 2 Simulation parameters

参数名	参数值	参数名	参数值
802.16 帧长/ms	1	分组长度/bit	1000
802.16 时隙时长/ $\mu$ s	0.2	$d_{i,j}^s$ /ms	0
802.16 帧时隙数	5000	$d_{i,j}^{max}$ /ms	100
802.11 时隙时长/ $\mu$ s	20	$\beta_{rt}$	0.5
SIFS 时长/ $\mu$ s	10	$\beta_{nrt}$	0.01
DIFS 时长/ $\mu$ s	50		

为了验证所提出的基于 QoS 感知的负载均衡算法(QALBA)的性能, 采用文献[13-14]提出的切换决策负载均衡算法(Handoff decision load-balancing algorithm, HDLBA)作为对比算法, 从丢包率、分组时延以及吞吐量性能等方面进行比较。图 1~图 4 给出了仿真结果。

图 1 和图 2 分别显示了当每条连接的平均速率从 50 kbit/s 增长到 400 kbit/s 时, 实时恒定速率业务(Real time constant bit rate, RT-CBR)和实时可变速率业务(Real time constant variable bit rate, RT-VBR)的丢包率和分组平均时延的变化情况。可以看出, 所提出的 QALBA 算法明显

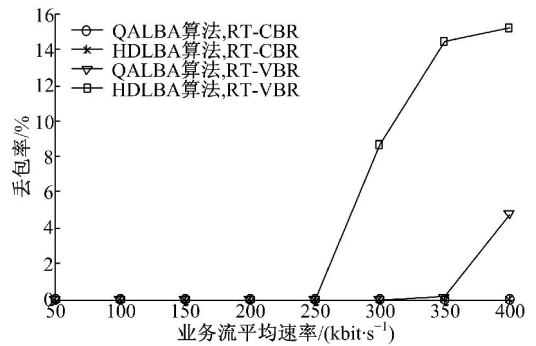


图 1 实时业务丢包率

Fig. 1 Loss rate of real time service

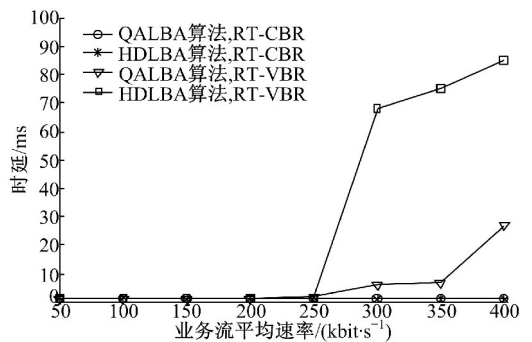


图 2 实时业务平均分组时延

Fig. 2 Average packet delays of real time service

降低了实时可变速率业务的丢包率和分组时延;而两种算法的实时恒定速率业务的丢包率和分组平均时延则基本保持不变,这是因为 802.16 网络对实时恒定速率业务的优先保障机制能够保证实时恒定速率业务的 QoS,而两种算法均能保证实时恒定速率业务用户始终停留在 802.16 网络中,并获得有保障的服务质量。

图 3 显示了随着负载的增大,所提出的 QALBA 算法能够显著提高全网的吞吐量。图 4 给出了两种算法不同业务的吞吐量变化情况。对于 RT-VBR 业务和 NRT 业务,QALBA 算法的性能均明显优于 HDLBA 算法;并且 QALBA 算法能够始终满足实时恒定速率业务的吞吐量需求。

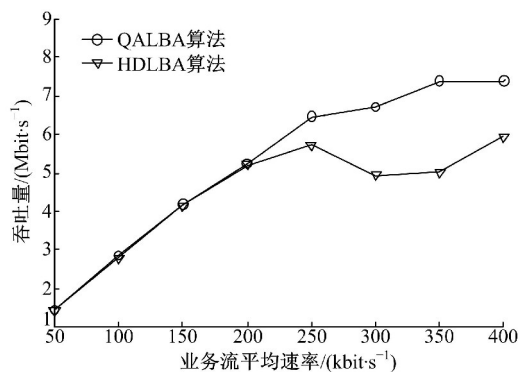


图 3 全网吞吐量

Fig. 3 Network throughput

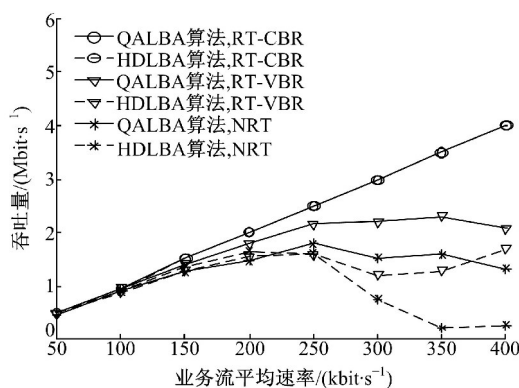


图 4 各种业务吞吐量

Fig. 4 Throughputs of different services

## 4 结束语

针对异构无线网络融合的通信场景,提出了一种 QoS 感知的网络负载均衡算法,其属于切换式负载均衡算法。算法定义的基于无线业务特征的一般化用户 QoS 收益和网络效用,能够表征网

络中终端的服务质量体验和网络的负荷情况,且对于各种异构网络具有普适性。其中,网络效应对异构网络的普适性使得各异构网络的负载情况具有可比性,从而能够在异构网络间实现切换式负载均衡。仿真结果表明:本文算法能够显著提高异构融合网络的吞吐量,降低业务的时延和丢包率,达到提高网络资源利用效率的效果。

## 参考文献:

- [1] Keller R, Lohmar T, Tonjes R, et al. Convergence of cellular and broadcast networks from a multi-radio perspective [J]. IEEE Personal Communications, 2001, 8(2): 51-56.
- [2] Wu G, Mizuno M, Havinga P J M. MIRAI architecture for heterogeneous network [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(2): 126-134.
- [3] Piamrat K, Ksentini A, Bonnin J, et al. Radio resource management in emerging heterogeneous wireless networks [J]. Computer Communications, 2011, 34(9): 1066-1076.
- [4] 张国鹏, 张海林. 无线局域网中业务流接入控制的博弈论算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(5): 805-810.  
Zhang Guo-peng, Zhang Hai-lin. Non-cooperative game theoretical admission control algorithm for traffic flows in wireless LANs [J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(5): 805-810.
- [5] Moiseev S, Filin S, Kondakov M, et al. Load-balancing QoS-guaranteed handover in the IEEE 802.16e OFDMA network [C] // IEEE Global Telecommunications Conference, San Francisco, United States, 2006: 1-5.
- [6] Tragos E Z, Tsiropoulos G, Karetos G T, et al. Admission control for QoS support in heterogeneous 4G wireless networks [J]. IEEE Network, 2008, 22(3): 30-37.
- [7] Niyato D, Hossain E. Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: an evolutionary game approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 2008-2017.
- [8] Lee S, Sriram K, Kim K, et al. Vertical handoff decision algorithms for providing optimized performance in heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 865-881.
- [9] Xu Jie, Jiang Yu-ming, Perkis A. Multi-service load balancing in a heterogeneous network [C] // Wireless

- Telecommunications Symposium, New York, United States, 2011: 1-6.
- [10] Yen L, Yeh T, Chi K. Load balancing in IEEE 802.11 networks[J]. *IEEE Internet Computing*, 2009, 13(1): 56-64.
- [11] Bejerano Y, Han S. Cell breathing techniques for load balancing in wireless LANs[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(6): 735-749.
- [12] Niyato D, Hossain E. Radio resource management games in wireless networks: an approach to bandwidth allocation and admission control for polling service in IEEE 802.16[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2007, 14(1): 27-35.
- [13] Yan X, Sekercioglu Y A, Narayanan S. A survey of vertical handover decision algorithms in fourth generation heterogeneous wireless networks[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(11): 1848-1863.
- [14] Lee C W, Chen L M, Chen M C, et al. A framework of handoffs in wireless overlay networks based on mobile IPv6[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(11): 2118-2128.