



专题:异构网络

异构网络融合环境下基于加权二分图的网络选择算法

鲍楠¹, 夏玮玮², 鲍煦³

(1. 南京邮电大学物联网学院 南京 210003; 2. 东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096;
3. 江苏大学计算机科学与通信工程学院 镇江 212013)

摘要:在异构网络融合场景中,为了合理利用异构网络资源,提出了一种基于加权二分图的网络选择算法。将网络选择过程映射为寻找最优加权二分图的过程,用户和网络双方的需求经数学建模后进行供需最优匹配,供需匹配有二次选择机会以平衡网络负载。与其他算法相比,提出的算法可以为不同 QoS 业务提供满足需求的匹配结果,并且能够动态调整网络负载,实现异构网络融合场景中用户需求和网络资源的合理匹配。

关键词:异构网络;网络选择;加权二分图;QoS 保障;负载均衡

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015242

Network Selection Algorithm Based on Weighted Bipartite Graph in Heterogeneous Network Environment

Bao Nan¹, Xia Weiwei², Bao Xu³

(1. College of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;
3. School of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In convergence environment of heterogeneous network, a network selection algorithm based on weighted bipartite graph was proposed for rational utilization of heterogeneous network wireless resource. The network selection process was mapping as looking for the optimal weighted bipartite graph. The requirements of users and networks were mathematically modeled for optimal matching of supply and demand. And there was a second chance of matching to balance the network load. Compared with other algorithms, the proposed algorithm can provide matching results that meet the requirements for different QoS. Meanwhile it can dynamically adjust networks' loads, and achieve reasonable matching of user demands and network resources in convergence environment of heterogeneous network.

Key words: heterogeneous network, network selection, weighted bipartite graph, QoS guarantee, load balancing

收稿日期:2015-08-20;修回日期:2015-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61201175, No.61171081), 江苏省基础研究计划 (自然科学基金) 资助项目 (No.BK20150866, No.BK20130530), 江苏省普通高校自然科学研究资助项目 (No.15KJB510026), 南京邮电大学引进人才科研启动基金资助项目 (No.NY214185)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of China (No.61201175, No.61171081), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20150866, No.BK20130530), The Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions (No.15KJB510026), NUPTSF (No.NY214185)

论文引用格式: 鲍楠, 夏玮玮, 鲍煦. 异构网络融合环境下基于加权二分图的网络选择算法. 电信科学, 2015242

Bao N, Xia W W, Bao X. Network selection algorithm based on weighted bipartite graph in heterogeneous network environment. Telecommunications Science, 2015242



1 引言

随着用户对无线通信业务质量需求的不断增长,现存的单一无线移动网络很难满足多种类型服务的需要。无线通信技术的迅猛发展促使终端多模化和接入技术多样化,构成了异构网络融合环境。在异构网络无线资源管理方面,网络选择算法是保障无线服务质量(quality of service, QoS)的关键技术之一。

影响网络选择算法性能的因素很多,不仅要考虑网络服务的质量,还要考虑选择代价和网络资源的合理利用。当考虑用户端性能时,用户 QoS 是评估网络选择效果的主要因素之一。参考文献[1]中提出以用户 QoS 和偏好为主要考虑因素的网络选择算法。参考文献[2]将用户的喜好和使用网络成本等作为选择最优网络的参数。参考文献[3]在异构融合网络应用层 QoS 保证的基础上,采用添加索引和随机最优化思想进行最优网络选择。参考文献[4]将用户性能与代价的比值作为用户端的优化目标,以最大化用户性价比(performance-cost ratio, PCR)进行最优网络选择。在很多研究网络选择算法的文献中,基于博弈理论和代价函数的方法非常普遍。参考文献[5]站在系统角度提出了一种基于代价函数的网络选择算法,结合流量平衡和接收信号强度,在呼叫阻塞概率和平均接收信号强度之间找到折中点。参考文献[6]提出种群进化和强化学习两种基于进化博弈论的网络选择算法。另外多目标优化也会应用在网络选择算法中。参考文献[7]提出了一种多目标优化函数最大化用户体验质量,同时也作为网络资源管理的接收概率,但是最终选择网络的最优化目标还是最大化网络端的收益,若用户需求不在网络设定的最优范围内,用户接入被拒绝。参考文献[8]以可接入网络的接入阻塞率相等为模糊神经网络参数强化学习的目标,提出动态适应网络负载的异构无线网络接入选择算法,但是没有考虑如何利用有限负载能力实现用户和网络端双赢的局面。

从最优选择的判决条件来看,以上参考文献在做网络最优选择时较偏向于一方,如用户的最佳 QoS 或者网络的最大收益,没有侧重如何实现双赢效果。本文提出一种基于加权最优二分图的网络选择算法,对不同用户的不同 QoS 要求以及网络的服务指标等参数进行数学建模,将 QoS 指标与服务指标进行比对,将具有最大匹配度的用户和网络作为网络选择的最优结果。用户与网络之间的指标值越相似,匹配的可能性越大,为实现用户效用和网络收

益的双赢结果,寻找优化分配全网资源的目标函数和分配方法。

2 网络选择场景模型

在异构网络融合场景中,假设不同网络之间是重叠覆盖的关系,且参与网络选择的用户均处于网络重叠覆盖区域内,不会移动到重叠区域外。为了综合考虑用户的 QoS 要求和网络端的收益,动态调节网络资源,考虑将用户和网络之间进行参数匹配,选取匹配度最大的链接作为网络选择结果。

首先考虑采用分布式算法,每个用户从可接入网络中选择满意度最高的网络请求接入,一个网络可能有多个用户申请接入,也可能没有用户申请接入,网络从申请接入的用户中选择带来最大收益的用户允许其接入。第一次选择时没有成功接入网络的用户,就会选择满意度次高的网络请求接入,收到多个申请的网络选择带来收益最大的用户允许其接入。如此循环直到所有用户都成功接入网络。该方式有几个缺陷:第一,如果重新选择次数太多,用户的接入时延会变长;第二,用户和网络来回选择时都是单方面最优化自己的利益,容易导致用户在几个网络间来回切换始终不能成功接入网络;第三,单方面满足用户或网络的利益要求,容易导致资源浪费或网络过载影响总体性能,若用户和网络端可以随意修改接入价格,更有可能造成恶性竞争。

因此单纯的分布式算法在此情况下很难保证网络选择的最优性。考虑第三方介入的情况,如图 1 所示,在用户和网络之间建立云端处理中心,收集用户和网络双方的服务质量需求和性能参数,比较双方要求的相似度,寻找全局最优的匹配结果。如果用户需求或网络参数有变化,能够快速动态地改变下次匹配的计算参数,得出新的全局最优选择结果。本文后续提出的算法流程和计算均在云端处理中心进行,每次网络选择后,如果有网络过载的情况,可以对接入过载网络的新用户重新进行次优的网络选择,平衡网络负载。

3 网络选择过程建模

综合考虑用户对多业务服务的 QoS 需求和网络的负载压力,本文提出一种基于加权二分图最优匹配的网络选择算法,将网络选择过程建模为加权二分图最优匹配过程,寻找兼顾双方利益的最优匹配结果。

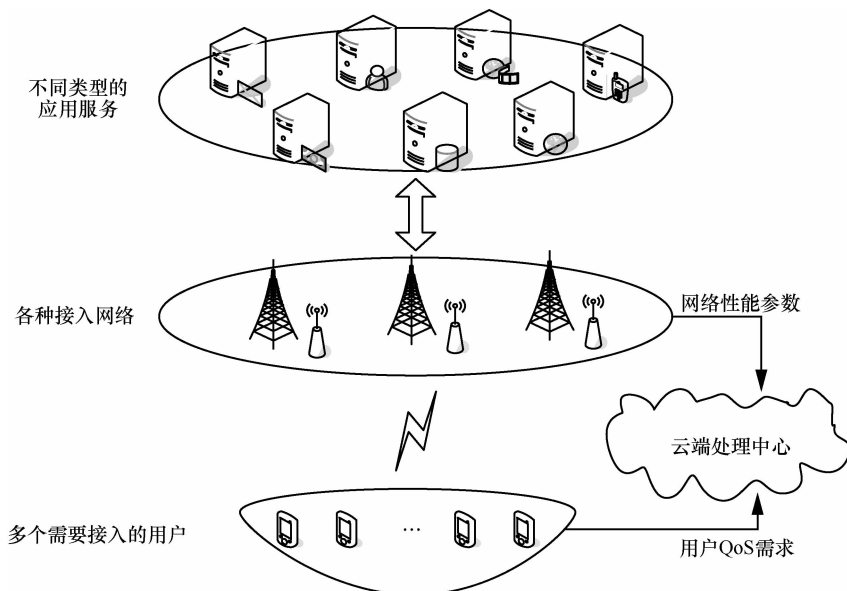


图1 异构网络融合场景结构

3.1 加权二分图建模

将异构网络融合场景中的网络选择问题建模为加权二分图模型 $G=(X,Y,E)$ 。其中, G 表示一个完整的二分图; X 表示异构网络中请求接入网络的用户, 一共有 m 个呼叫请求; Y 表示所有备选异构网络, 一共有 n 个备选网络, 每个呼叫请求都至少可以接入其中一个网络; E 为二分图中边的集合, 表示每一条呼叫请求与网络之间的链路, 如图 2 所示, 边的权值表示为 e_{ij} , 网络选择的过程就是寻找该加权二分图中边的权值和最大的完备匹配。

3.2 参数相似度和匹配度

求出加权二分图最优匹配的关键步骤是计算每条边的权值 e_{ij} , 为了综合考虑用户和网络两者的利益, 边的权值对应为用户 QoS 需求和网络服务指标之间的匹配度。匹

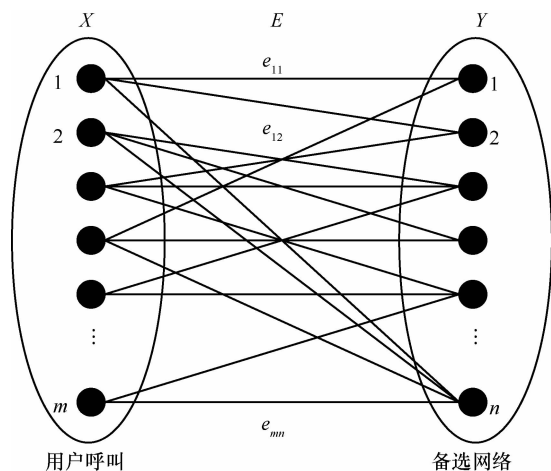


图2 二分图网络选择模型

配度表示了用户和网络双方参数的相似及适合程度。

用户根据不同的业务类型需要不同的 QoS 性能, 时延、误码率、分组丢失率、队列长度等 QoS 要求都可以在一定条件下转换成速率要求^[9,10]。因此带宽、速率、功率、价格等资源参数可以同时作为用户呼叫和网络的需求参数进行配对比较, 将用户呼叫和网络的性能需求以矢量形式表示如下:

$$u_j=[u_{j1}, u_{j2}, \dots, u_{jk}] \quad (1)$$

$$v_i=[v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ik}] \quad (2)$$

其中, u_j 表示用户呼叫的 QoS 矢量, v_i 表示网络的性能矢量, k 是参数种类。首先对用户呼叫和网络需求矢量进行相似度计算。利用夹角余弦求两向量之间的相似度为^[11]:

$$z_{ij} = \frac{\sum_k u_{jk} v_{ik}}{\sqrt{\sum_k u_{jk}^2} \sqrt{\sum_k v_{ik}^2}} \quad (3)$$

根据业务类型和网络运行情况变化, 用户和网络对矢量参数的偏好权重也会改变, 因此令 α_{jk} 表示用户呼叫 j 对参数 k 的偏好权重, η_{ik} 表示网络 i 对参数 k 的偏好权重。用户呼叫需求与网络参数的匹配度可以表示为:

$$\hat{z}_{ij} = \frac{\sum_k \alpha_{jk} u_{jk} \eta_{ik} v_{ik}}{\sqrt{\sum_k (\alpha_{jk} u_{jk})^2} \sqrt{\sum_k (\eta_{ik} v_{ik})^2}} \quad (4)$$

令 $e_{ij}=\hat{z}_{ij}$, 下面求取该二分图的最优匹配。

3.3 最优加权二分图匹配

寻找加权二分图最优匹配 (weighted bipartite graph optimal matching, WBGOM), 实际上是寻找子图 $G'=(X,Y,E')$, $E' \in E$, 满足对任意一个子图 G'' , 子图 G' 的任意两



条边不相邻,且边数最多,边的权值和最大。该匹配过程可以用以下优化模型描述:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} l_{ij} \hat{z}_{ij} \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1: } l_{ij} \in \{0,1\} \\ & \text{C2: } \sum_{i=1}^{i=n} l_{ij} = 1 \\ & \text{C3: } \hat{z}_{ij} > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, l_{ij} 是二进制变量, $l_{ij}=1$ 表示网络 i 与呼叫请求 j 的链路连通, 否则链路不通, C1 和 C3 保证每个呼叫请求同时只能匹配一个网络; z_{ij} 是二分图中每条边的权值, 由式(4)计算得到。

从这个优化问题可以看出, 呼叫请求与网络之间是一一对应的匹配关系, 当每个网络都匹配了一个用户, 或者每个用户都匹配了一个网络, 且该匹配得到的权值和最大时, 优化问题有最优解。求解过程虽然不难但是复杂度高, 若使用穷举法则时间复杂度为 $O(n^m)$ 。求解加权二分图的最优匹配还可以采用 Kuhn-Munkres 算法^[12], 流程如下:

- (1) 初始化顶标, 令 X 集合中每个元素的顶标为对应边的最大权值, Y 集合中每个元素顶标为零;
- (2) 用匈牙利算法^[13]寻找完备匹配;
- (3) 若未找到完备匹配则更改可行顶标的值;
- (4) 重复步骤(2)和步骤(3)直至找到相等子图的完备匹配。

Kuhn-Munkres 算法的时间复杂度最大为 $O(n^4)$, 因此当 $m>4$ 时用 Kuhn-Munkres 算法求解优化问题(5)能够降低复杂度。

3.4 基于负载均衡的网络重选择

在第 3.1 节中, 备选网络可以通过调节参数的偏好权重来调整网络内的资源使用情况。例如, 若备选网络只能接受低速率的服务要求, 则增大速率的权重以选取低速率的用户; 若备选网络带宽有限, 则增大带宽的权重以选取带宽要求不高的用户。但是也不能排除经过匹配后出现网络拥挤的情况。因此考虑当网络的负载情况不能保证用户服务需求时, 匹配到该网络的用户可以重新进行匹配, 在二分图中寻找次优的网络进行接入, 实现网络负载均衡。

假设网络 i 的资源容量为 B_i , 定义网络空闲资源占有率为:

$$\beta_i(t) = \frac{B_i - \sum_{j \in \Omega_i} b_j(t)}{B_i} \quad (6)$$

其中, Ω_i 是接入网络 i 的用户呼叫集合, $b_j(t)$ 是用户呼叫 j 使用的网络资源。

假设网络设有空闲资源占有率的警戒门限 ρ_i , 当 $\rho_i \geq \beta_i(t)$ 时, 网络 i 可以拒绝二分图匹配结果, 选择接入网络 i 的用户可以重新选择次优的网络。重选择过程如图 3 所示, 选择结果可以表示为:

$$\begin{aligned} l' = \arg \max_{l'_{ij}=0} \quad & \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} l'_{ij} \hat{z}_{ij} \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1} \sim \text{C3} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $l'_{ij}=0$ 表示接入网络 i' 的用户呼叫 j' 需要重新选择接入网络。

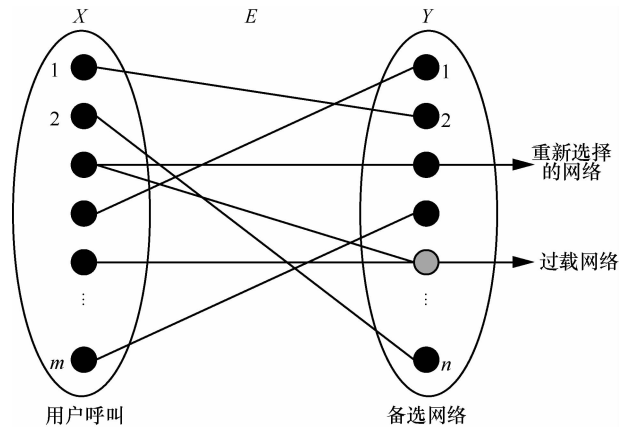


图 3 重新匹配过程

4 仿真及结果分析

为了分析验证本文提出的 WBGOM 网络选择算法, 将所提算法与参考文献[4]中 PCR 算法和参考文献[7]中多目标优化接入选择 (multicriteria optimization of access selection, MOAS) 算法进行仿真比较。假设 3 个网络重叠覆盖, 重叠覆盖区域内有 60 个多模用户, 用户呼叫到达过程服从泊松分布, 为不同业务统计方便, 设置等效呼叫到达率 α_e ^[14]。例举 3 种用户呼叫业务需求见表 1, 考虑到时延敏感业务和高速业务在网络选择中的权重可能较高, 因此针对时延和带宽要求不是最高的业务, 定义最高价格预算以提高其网络选择的权重, 也防止这类业务在网络选择过程中被忽略。网络根据实际情况提供不同的传输速率, 并根据速率调整价格, 网络参数见表 2。

根据式(1)、式(2)建立用户和网络的参数模型, 然后根据式(4)计算出匹配度带入加权二分图模型, 根据第 3 节给出的网络选择过程, 利用 Kuhn-Munkres 算法求解最优匹配和次优重匹配后, 考察以下参数来比较算法性能。

表 1 呼叫业务参数

业务类型	时延要求/ms	速率要求/(Mbit·s ⁻¹)	价格 预算	呼叫 到达率
时延敏感业务	100	0.5	1	1/10α _e
时延较敏感业务	300	2.5	3	1/30α _e
时延不敏感业务	1 000	5	2	1/60α _e

表 2 网络参数

网络参数	数值		
网络支持速率/(Mbit·s ⁻¹)	[0, 1]	(1, 2]	(2, 5]
价格	1	2	3
负载阈值	0.9		

(1)接入阻塞概率

定义为网络选择过程中,呼叫接入请求没有被任何网络接受,接入失败的概率。该参数主要考察对时延敏感性不同的业务接入网络的情况。

$$p_j^{\text{block}} = \frac{\sum_{n=1}^N \left(1 - \sum_{i=1}^n l_{ij} \right)}{N} \tag{8}$$

其中, N 是网络选择次数, 因为每次选择都是一一对应, 所以接入失败时 $1 - \sum_{i=1}^n l_{ij} = 1$ 。

(2)QoS 满意度

定义为业务呼叫接入所选网络的性价比与期望性价比的比值, 其中性价比定义为速率与代价的比值。该参数主要考察业务呼叫接入所选网络的服务情况。

$$s_j = \left(\frac{r_j}{c_j} \right) \bigg/ \left(\frac{r_j^{\text{req}}}{c_j^{\text{req}}} \right) \tag{9}$$

其中, r_j, c_j 分别表示业务呼叫接入网络后得到的传输速率和付出的代价; $r_j^{\text{req}}, c_j^{\text{req}}$ 分别表示业务呼叫接入网络前

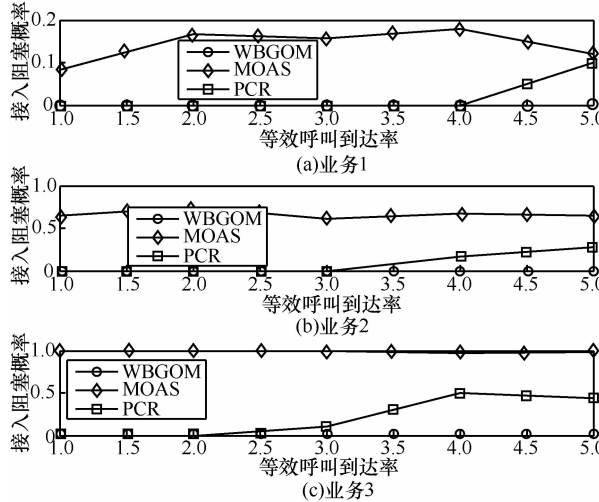


图 4 呼叫接入阻塞概率

期望的速率和代价。

(3)网络负载变化

网络负载定义为接入用户的总符号速率与网络符号速率的比值^[15]。

$$\eta_i = \frac{\sum_{j \in \Omega_i} r_j f_m \text{SF}}{R_i} \tag{10}$$

其中, η_i 是网络 i 的负载, Ω_i 是接入网络 i 的用户集合, r_j 是用户 j 的数据速率, r_m 是用户的调制编码速率, SF 是扩频因子, 非扩频时设置为 1, R_i 是网络的符号速率。 η_i 值越大表示网络负载越重。

图 4 给出了 3 种业务接入阻塞概率随呼叫到达率变化的情况。3 种算法都保证业务 1(时延敏感业务)的接入阻塞概率最低, 业务 3(时延不敏感业务)的接入阻塞概率最高, 有利于实时业务的 QoS 保障。从单一业务看, 本文提出的 WBGOM 算法得到的接入阻塞概率为 0, 符合算法一一匹配并可负载均衡选择的特点; PCR 算法的接入阻塞概率在呼叫到达率升高后稍高于 WBGOM 算法; MOAS 算法的呼叫接入阻塞概率最高, 这是算法中随机分配预测资源过程引起的。

图 5 给出 3 种业务 QoS 满意度随呼叫到达率变化的情况。业务 2(时延较敏感业务)的 QoS 满意度最高, 这是因为业务 2 的 QoS 需求不是最高的, 且出价最高, 在网络选择时容易匹配到网络; 业务 1 和业务 3 对 QoS 要求较高, 出价相对较低, 所以网络选择时匹配网络不一定能满足期望的性价比。这个问题可以利用博弈竞价理论进一步研究解决, 因篇幅限制本文不再做深入分析。从单一业务看, PCR 算法以最大化用户的性价比为网络选择依据, 因此业务呼

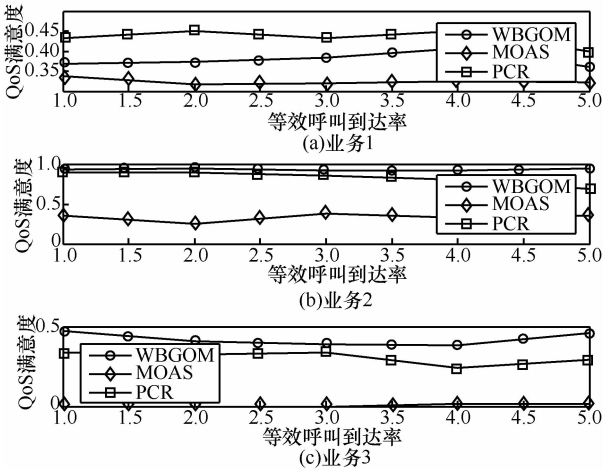


图 5 QoS 满意度

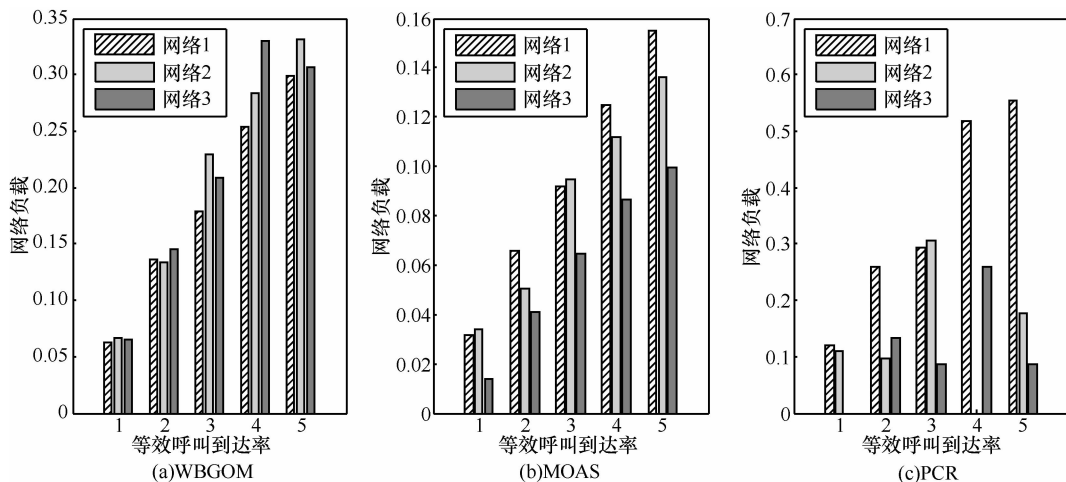


图6 网络负载变化情况

叫的 QoS 满意度很高,而本文提出的 WBGOM 算法的 QoS 满意度与其相近,甚至业务 2 和业务 3 的 QoS 满意度超过 PCR 算法。这是因为在 PCR 算法中有些呼叫请求被分配了多余的网路资源,而有些呼叫请求分配不到足够的网路资源。WBGOM 算法充分考虑用户和网路双方的利益,尽可能按需合理分配,使业务呼叫与网路之间的匹配度最大。MOAS 算法的 QoS 满意度最低,算法中只有预测的资源满足用户呼叫的资源需求时才能接入网路。

图 6 给出网路负载随呼叫到达率变化的情况。在 WBGOM 算法和 MOAS 算法中,每个网路的负载随呼叫到达率的增大而增大,WBGOM 算法中根据负载门限调节每个网路的负载情况,因此网路间负载交替上升,MOAS 算法中无法满足的业务呼叫被拒绝接入网路导致总体网路负载较低。PCR 算法中网路负载较高,网路 1 的负载经常处于最高状态,而网路 2 和网路 3 有时却几乎没有负载。从以上分析可以看出,WBGOM 算法能够动态调整不同网路之间的负载,MOAS 算法的网路负载虽然低于 WBGOM,接入阻塞概率却远远高于后者,接入的呼叫数量少,网路负载也低,但是负载均衡能力较弱。PCR 算法的负载均衡能力最差,用户呼叫请求易偏向于单个网路。

将网路间最大负载值与最小负载值的差作为进一步分析算法负载均衡能力的参数,图 7 给出 3 种算法的网路负载差异随呼叫到达率变化的情况。显然 PCR 算法的负载均衡能力最差,网路间负载差异最高。WBGOM 算法与 MOAS 算法的负载差异相近,如图 6 所示,MOAS 算法中呼叫请求易偏向单个网路,使得该网路的负载始终高于其他网路。

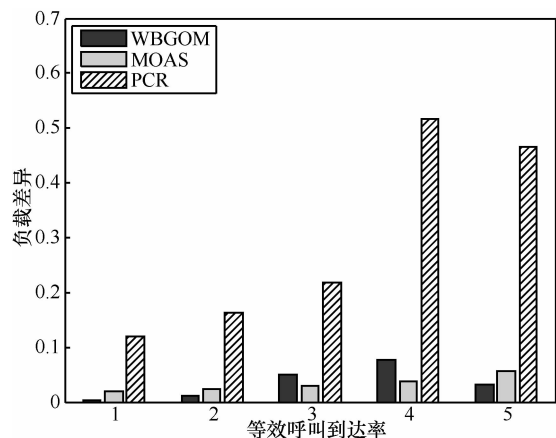


图7 网络负载差异比较

5 结束语

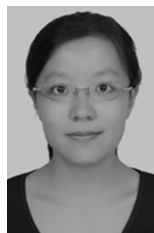
本文提出了一种基于加权二分图最优匹配的网络选择算法,选择供需最匹配的用户和网路,优化异构网路中的资源分配。将用户业务需求和网路参数进行匹配度计算,以最大化匹配度为目标建立加权二分图模型并求解最优网路选择结果,对拥挤网路中的呼叫请求重新匹配次优网路,实现网路负载均衡。与其他算法相比,本文提出的 WBGOM 算法能够在保障呼叫请求接入概率和 QoS 需求的同时动态调整网路负载,实现负载均衡的异构网路资源分配。未来可进一步考虑业务优先级调度、网路负载超限等情况下所提算法的性能和改进。

参考文献

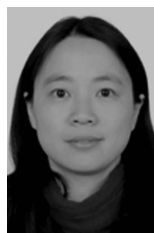
- Sehgal A, Agrawal R. QoS based network selection scheme for 4G systems. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(2): 560~565

- 2 Zhu K, Dusit N, Wang P. Network selection in heterogeneous wireless networks: evolution with incomplete information. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Sydney, Australia, 2010: 1~6
- 3 Si P B, Ji H, Yu F R. Optimal network selection in heterogeneous wireless multimedia networks. Wireless Networks, 2010, 16(5): 1277~1288
- 4 Chen Q B, Zhou W G, Chai R, *et al.* Game-theoretic approach for pricing strategy and network selection in heterogeneous wireless networks. IET Communications, 2011, 5(5): 676~682
- 5 Shen W, Zeng Q A. Cost-function-based network selection strategy in integrated wireless and mobile networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(6): 3778~3788
- 6 Niyato D, Hossain E. Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: an evolutionary game approach. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 2008~2017
- 7 Nguyen-Vuong Q T, Agoulmine N, Cherkaoui E H, *et al.* Multicriteria optimization of access selection to improve the quality of experience in heterogeneous wireless access networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62 (4): 1785~1800
- 8 石文孝, 范绍帅, 王槽等. 基于模糊神经网络的异构无线网络接入选择算法. 通信学报, 2010, 31(9): 151~156
Shi W X, Fan S S, Wang N, *et al.* Fuzzy neural network based access selection algorithm in heterogeneous wireless networks. Journal on Communications, 2010, 31(9): 151~156
- 9 Kong Z, Kwok Y K, Wang J Z. A low-complexity QoS-aware proportional fair multicarrier scheduling algorithm for OFDM systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2225~2235
- 10 Bao N, Li J C, Xia W W, *et al.* QoS-aware resource allocation algorithm for OFDMA-WLAN integrated system. Proceedings of 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Shanghai, China, 2013: 807~812
- 11 李景涛, 荆一楠, 肖晓春等. 基于相似度加权推荐的 P2P 环境下的信任模型. 软件学报, 2007, 18(1): 157~167
Li J T, Jing Y N, Xiao X C, *et al.* A trust model based on similarity-weighted recommendation for P2P environments. Journal of Software, 2007, 18(1): 157~167
- 12 Munkres J. Algorithms for the assignment and transportation problems. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1957, 5(1): 32~38
- 13 Kuhn H W. The Hungarian method for the assignment problem. Naval Research Logistics Quarterly, 1955(2): 83~97
- 14 Chang C J, Tsai T L, Chen Y H. Utility and game-theory based network selection scheme in heterogeneous wireless networks. Proceedings of 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Budapest, Hungary, 2009: 1~5
- 15 Nguyen-Vuong Q T, Agoulmine N. Efficient load balancing algorithm over heterogeneous wireless packet networks. REV Journal on Electronics and Communications, 2011, 1(1): 53~61

[作者简介]



鲍楠, 女, 博士, 南京邮电大学物联网学院讲师, 主要研究方向为无线资源管理、无线通信网络技术。



夏玮玮, 女, 博士, 东南大学移动通信国家重点实验室副教授, 主要研究方向为异构网络融合与短距离无线通信。



鲍煦, 男, 博士, 江苏大学计算机科学与通信工程学院副教授, 主要研究方向为可见光通信技术、智能信号处理技术。