

基于多门限预留机制的自适应带宽分配算法

陈赓, 夏玮玮, 沈连丰

(东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 针对异构无线网络融合环境提出了一种基于多门限预留机制的自适应带宽分配算法, 从而为多业务提供 QoS 保证。该算法采用多宿主传输机制, 通过预设各个网络中不同业务的带宽分配门限, 并基于各个网络中不同业务和用户的带宽分配矩阵, 根据业务 k 支持的传输速率等级需求和网络状态的变化, 将自适应带宽分配问题转化为一个动态优化问题并采用迭代方法来求解, 在得到各个网络中不同业务和用户优化的带宽分配矩阵的同时, 在带宽预留门限和网络容量的约束条件下实现网络实时吞吐量的最大化, 以提高整个异构网络带宽的利用效率。数值仿真结果显示, 所提算法能够支持满足 QoS 需求的传输速率等级, 减小了新用户接入异构网络的阻塞概率, 提高了平均用户接入率并将网络吞吐量最大提高 40%。

关键词: 异构无线网络; 自适应带宽分配; 多门限预留; 网络吞吐量; 多宿主传输机制

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)12-0078-11

Adaptive bandwidth allocation algorithm based on the multi-threshold reservation mechanism

CHEN Geng, XIA Wei-wei, SHEN Lian-feng

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An adaptive bandwidth allocation algorithm based on multi-threshold reservation mechanism is proposed to guarantee the quality of service (QoS) of multi-services in heterogeneous wireless networks. With the bandwidth reservation mechanism by setting multi-threshold in each network for every traffic, the adaptive bandwidth allocation scheme according to the transmission rate levels requirements for traffic k and the network status can be formulated as an optimal problem with the constraints of the bandwidth allocation matrix for each traffic and all users based on the multi-homing technology. A procedure of the iterative method is presented to solve the optimal problem of the formulated adaptive bandwidth allocation scheme. The optimized bandwidth allocation matrixes for traffics and for all users are obtained for the real-time network throughput maximization under bandwidth reserving thresholds and network capacity constrains and the bandwidth resource utilization efficiency of heterogeneous wireless network can be increased. Numerical simulation results show that the proposed algorithm can support QoS requiring transmission rate grades, decrease the new call blocking probability, increase the average user access rate and improve the network throughput of the heterogeneous wireless network by 40% to the largest extent.

Key words: heterogeneous wireless network; adaptive bandwidth allocation; multi-threshold reservation; network throughput; multi-homing

收稿日期: 2014-07-10; 修回日期: 2014-09-10

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (2012ZX03004005-003); 国家自然科学基金资助项目 (61171081, 61201175); 江苏省科技型企业技术创新基金资助项目 (BC2012006); 东南大学移动通信国家重点实验室自主研究基金资助项目 (2013A03)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project (2012ZX03004005-003); The National Natural Science Foundation of China (61171081, 61201175); The Innovation Technology Found of Jiangsu Province (BC2012006); The Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory of Southeast University (2013A03)

1 引言

下一代无线网络将由异构网络融合而成，而移动终端亦会具有多宿主功能^[1,2]而共享所有网络的资源，因此不同无线网络中的带宽分配成为其资源管理的重要研究内容^[3]。文献[4]针对 4G 异构无线接入网络多种业务共存场景提出了一种基于效用的带宽分配算法，移动终端的多个无线接口同时为同一业务请求不同网络中的可用带宽资源，基于效用公平性将带宽资源分配给恒速率（CBR, constant bit rate）业务和变速率（VBR, variable bit rate）业务并通过定义的网络效用函数来评估算法的性能。文献[5]针对由不同运营商运营的异构无线网络提出了一个分布式资源分配算法，通过定义异构网络中的效用函数，将带宽分配问题转化为一个带有线性约束条件的凸优化问题。文献[6]研究了异构无线网络合作传输的速率分配问题，在速率需求和可用带宽这 2 个约束条件下，用加权协商对策论对异构网络合作传输的速率分配进行了数学建模，以最小传输时间作为优化目标构造了效用函数，提出了一种在终端上可实现的速率分配算法。文献[7]提出了一种联合功率和带宽分配算法来解决支持 QoS 的无线资源分配的优化问题。文献[8]针对多用户共享多个异构无线接入网络中的带宽资源场景，提出了一种基于效率和公平速率分配的带宽分配方案，在多个无线接入网络中有效分配用户总的传输速率以最大化用户的效用。文献[9]将异构无线网络下行链路动态频谱分配建模为非线性约束组合优化问题，并结合贪婪思想设计了基于覆盖概率的动态频谱分配算法。文献[4~9]的共同点是采用优化异构网络效用函数或者网络吞吐量等最优化理论来进行异构网络的带宽分配，将其描述为静态凸优化问题，但未考虑因异构网络中的资源和用户的动态变化对带宽分配所产生的影响。

文献[10]提出了 2 种基于资源预留机制的带宽管理策略来减小呼叫的阻塞概率，所提策略将基于当前的网络状况并采用一个模糊控制器自适应地调整带宽，为实时业务预留合适的带宽；然而所提算法只是考虑一个网络存在的场景，没有讨论异构网络环境多流并发传输场景下的带宽分配问题。文献[11]采用一个频谱池来管理空闲频谱资源，通过传输速率预测模型来预测下一阶段用户需求的带宽资源、周期性更新空闲频谱池以及调度 3 个过程

来最大化目标效用函数；然而由于传输速率预测模型的时延较大，带宽分配的实时性难以保证，只能应用于小规模的网络中。文献[12]提出了一种自适应带宽管理和联合呼叫接入控制方案，采用了基于门限的带宽预留机制和自适应带宽分配算法，虽然所提算法是基于共存的网络场景进行分析的，但是没有考虑移动终端的多宿主接入特性对带宽分配的影响。文献[13]在 UMTS/WLAN 异构融合无线网络中提出了一种基于带宽预留机制的呼叫接入控制算法，分别设置新语音呼叫、切换语音呼叫、新数据呼叫门限优先级策略，通过确保用户请求业务的优先级实现对带宽资源的优先预留利用，但并未考虑用户所请求业务的公平性问题。文献[14]基于图染色理论从子信道和业务流的角度提出 2 种无线资源共享算法，以满足业务需求为目标，同时兼顾业务类型和资源共享的公平性，但并未考虑当网络资源变化后如何动态共享网络带宽以满足业务需求等实际问题。文献[15]提出了一种新的通用无线资源管理算法，将业务流有效分配给所有可用的接入网络，并在异构业务流场景下提供 QoS 保证；文献[16]提出一种通用资源管理策略并搭建异构网络实验平台验证所提方法的性能。文献[15,16]只是从无线资源管理架构的角度来分析异构网络中的带宽分配问题，并未给出具体的带宽分配算法。文献[17]研究 P2P 流媒体网络中面向节点负载均衡的节点带宽请求分配策略，将服务请求节点竞争服务提供节点带宽的行为建模为一个非协作博弈，通过寻求该博弈问题的 Nash 均衡解的方法确定优化的带宽请求分配策略；文献[18]研究了一种 2 层 Macro-Femto 异构网络场景，从经济学观点提出了一种基于定价策略的频谱分配算法来最大化无线服务提供商的收益；文献[19]在认知无线网络中提出了一种博弈理论模型得到动态频谱共享的最优价格，并采用 Bertrand 博弈方法达到纳什均衡点得到最优频谱共享价格。文献[17~19]是从经济学角度来研究异构网络融合环境下的带宽分配问题的，然而所提方法是基于分布式的带宽分配策略，其收敛性差，不适宜于快速变化的网络环境。

总之，上述所提带宽分配算法主要采用优化异构网络效用函数或者网络吞吐量将其描述为静态凸优化问题，并未考虑因异构网络中的资源和用户的动态变化对带宽分配所产生的影响，同时没有讨

论异构网络环境多流并发传输场景下的带宽分配问题，没有考虑移动终端的多宿主接入特性对带宽分配的影响以及当网络资源变化后如何动态共享网络带宽以满足业务需求等实际问题，此外上述所提算法主要是基于分布式的带宽分配策略，其收敛性差。

在异构无线网络环境下，采用了多宿主功能的移动终端后，每个移动终端具有多个无线网络接口，针对移动终端请求的某一业务，采用多流并发传输机制，异构网络中的多个无线网络可同时为移动终端的业务提供带宽资源，移动终端共享所有接入网络的总的带宽资源。由于业务请求是针对用户而言的，而用户的终端是由多个无线网络接口构成的，因此一个业务请求会涉及多个媒体流，这些经由不同路径的并发流的协同传输保证了业务的服务质量和用户的体验。为了克服上述所提带宽分配算法的不足，本文基于这种多流多宿主传输控制技术，根据负荷分担传输、重叠覆盖区传输等实际应用场景，采用集中式带宽分配方式，综合考虑异构网络融合环境下移动终端的多宿主接入特性、网络资源变化后动态共享网络带宽以满足业务需求等实际问题，将多门限的带宽预留机制和自适应带宽分配方案相结合，提出一种基于多门限预留机制的自适应带宽分配算法，根据业务支持的传输速率等级需求和网络状态的变化动态调整不同网络中各个移动终端所支持业务的传输速率来进行不同网络间的业务分流，同时将自适应带宽分配问题转化为一个动态优化问题，并通过定义目标函数来最大化整个异构无线网络的实时吞吐量，以满足业务的多级传输速率需求并为异构网络中多业务提供 QoS 保证，所提算法对提高整个异构网络中带宽的利用效率有其实意义和利用价值。

2 系统模型

异构网络共存环境下的网络数为 N ，其容量用集合表示为 $C=\{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ ，系统模型按请求的业务类型表征整个异构网络的用户。设用户 m 支持的业务 k 的传输速率等级为 w ，且 $m \in \{1, 2, \dots, m_1; \dots; 1, 2, \dots, m_k; \dots; 1, 2, \dots, m_K\}$ ， m_k 是异构融合网络中请求业务 k ($k=1, 2, \dots, K$) 的用户的数目， $w \in \{1, 2, \dots, W_k\}$ ， w 越高，业务 k 需用的传输速率越大，反之则越小；若该传输速率用 $r_{m,w}^k$ 表示，则有 $r_{m,w}^k \in R_k = \{r_{k,w}\}$

$$r_{m,w}^k = \sum_{j=1}^N (1 - \eta_{mj}) \beta_j a_{m,j}^k \quad (1)$$

其中， η_{mj} 表示网络 j 到用户 m 传输过程中的平均误比特率 (BER, bit error rate)， β_j 表示网络 j 中单位带宽下的传输速率， $a_{m,j}^k$ 表示网络 j 为请求业务 k 的用户 m 分配的带宽。

若用 $r_{k,\min}$ 表示业务 k 在最低传输速率等级所支持的最小传输速率，用 $r_{k,\max}$ 表示业务 k 在最高传输速率等级所支持的最大传输速率，则有

$$r_{k,\min} \leq \left(r_{m,w}^k = \sum_{j=1}^N (1 - \eta_{mj}) \beta_j a_{m,j}^k \right) \leq r_{k,\max} \quad (2)$$

各个网络对传输速率 $r_{m,w}^k$ 分配的带宽情况如图 1 所示，图中 NET- j 表示第 j 个网络。

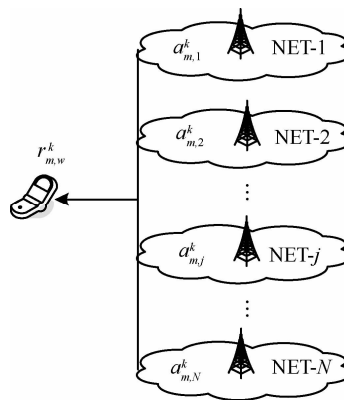


图 1 各个网络对传输速率 $r_{m,w}^k$ 分配的带宽情况

为便于表达，将集合 $\{r_{k,w}\}$ 中的元素 $r_{k,w}$ 按其值大小递增排序，即集合 R_k 中的元素满足 $r_{k,(w-1)} < r_{k,w}$ ($w=2, 3, \dots, W_k; k=1, 2, \dots, K$)，同时令 $r_{k,\min} = r_{k,1}$ ， $r_{k,\max} = r_{k,W_k}$ ；此外，将业务集合 $\{k\} = \{1, 2, \dots, k, \dots, K\}$ 中的元素按其满足 QoS 需求的最小传输速率降序排列，满足 $r_{1,\min} \geq r_{2,\min} \geq \dots \geq r_{k,\min} \geq \dots r_{K,\min}$ ，即业务 1 所支持的满足 QoS 需求的最小传输速率最大，而业务 K 所支持的满足 QoS 需求的最小传输速率最小，即在每个网络中为业务 1 分配最大的预留带宽，而为业务 K 分配最小的预留带宽。

基于上述分析，对各个网络中的不同业务预设不同的带宽分配门限来保证带宽资源的合理分配，如图 2 所示。图中 $\varepsilon_{k,j}$ 是网络 j 为业务 k 分配的可用带宽门限，可由网络 j 对业务 k 的支持能力、业务 k 本身的特性以及网络 j 的容量共同决定。

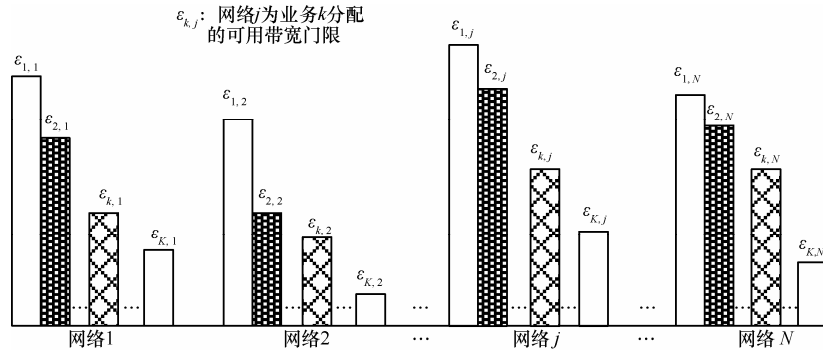
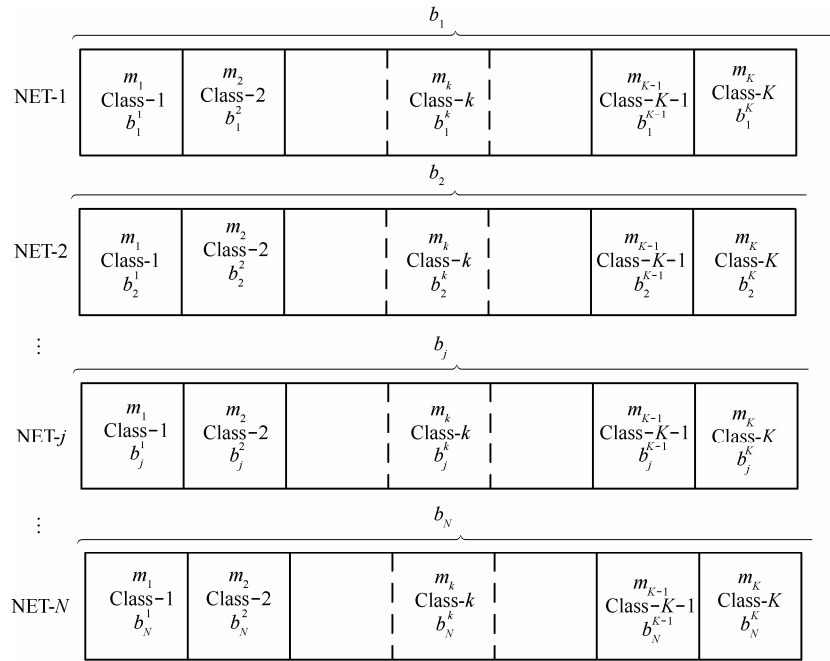
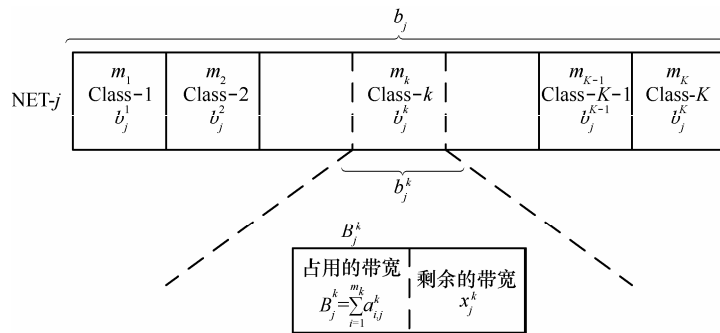


图 2 异构网络中多业务的带宽预留门限设置



(a) 总体带宽分配



(b) 网络 j 为各业务分配带宽情况

图 3 基于多流多宿主传输技术的带宽分配方案

3 算法描述

3.1 业务带宽分配矩阵和用户带宽分配矩阵

在异构无线网络融合环境中，采用多宿主功能的移动终端，每个移动终端具有多个无线网络接口，采用多流并发传输机制，异构网络中的多个无

线网络可同时为移动终端请求的某一业务提供带宽资源，满足其对带宽的需求。这样，具有多宿主功能的多模移动终端可共享所有接入网络的带宽资源，图 3 给出了基于多流多宿主传输技术的带宽分配方案。在此方案中，每个网络 j 根据业务支持满足 QoS 需求的传输速率以及业务特性为业务 k 分

配合适的带宽资源 b_j^k 。

由图 3 可以看出, 业务的带宽分配矩阵 \mathbf{B} 为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1^1 & b_2^1 & \cdots & b_1^k & \cdots & b_1^K \\ b_2^1 & b_2^2 & \cdots & b_2^k & \cdots & b_2^K \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_j^1 & b_j^2 & \cdots & b_j^k & \cdots & b_j^K \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_N^1 & b_N^2 & \cdots & b_N^k & \cdots & b_N^K \end{bmatrix} \quad (3)$$

其约束条件为

$$\left(b_j = \sum_{k=1}^K b_j^k \right) \leq C_j \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, j, \dots, N\} \quad (4)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} a_{1,1}^1 & a_{2,1}^1 & \cdots & a_{m_1,1}^1 & a_{1,1}^2 & a_{2,1}^2 & \cdots & a_{m_2,1}^2 & \cdots & a_{1,1}^k & a_{2,1}^k & \cdots & a_{m_k,1}^k & \cdots & a_{1,1}^K & a_{2,1}^K & \cdots & a_{m_K,1}^K \\ a_{1,2}^1 & a_{2,2}^1 & \cdots & a_{m_1,2}^1 & a_{1,2}^2 & a_{2,2}^2 & \cdots & a_{m_2,2}^2 & \cdots & a_{1,2}^k & a_{2,2}^k & \cdots & a_{m_k,2}^k & \cdots & a_{1,2}^K & a_{2,2}^K & \cdots & a_{m_K,2}^K \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{1,j}^1 & a_{2,j}^1 & \cdots & a_{m_1,j}^1 & a_{1,j}^2 & a_{2,j}^2 & \cdots & a_{m_2,j}^2 & \cdots & a_{1,j}^k & a_{2,j}^k & \cdots & a_{m_k,j}^k & \cdots & a_{1,j}^K & a_{2,j}^K & \cdots & a_{m_K,j}^K \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{1,N}^1 & a_{2,N}^1 & \cdots & a_{m_1,N}^1 & a_{1,N}^2 & a_{2,N}^2 & \cdots & a_{m_2,N}^2 & \cdots & a_{1,N}^k & a_{2,N}^k & \cdots & a_{m_k,N}^k & \cdots & a_{1,N}^K & a_{2,N}^K & \cdots & a_{m_K,N}^K \end{bmatrix} \quad (6)$$

约束条件为

$$\left(B_j^k = \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right) \leq b_j^k \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, j, \dots, N\},$$

$$k \in \{1, 2, \dots, k, \dots, K\} \quad (7)$$

$$\left(\sum_{k=1}^K B_j^k = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right) \leq \left(b_j = \sum_{k=1}^K b_j^k \right) \leq C_j$$

$$\forall j \in \{1, 2, \dots, j, \dots, N\} \quad (8)$$

其中, 网络 j 分配给请求业务 k 的所有用户的带宽资源要小于网络 j 分配给业务 k 的带宽, 如式(7)所示; 考虑式(4)中的网络容量约束条件, 通过将式(7)对各业务求和得到式(8), 网络 j 分配给请求所有业务的全体用户的带宽资源要小于网络 j 分配给所有业务的带宽, 同时要小于网络容量 C_j 。

$$b_m^k = \sum_{j=1}^N a_{m,j}^k \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, k, \dots, K\}, m \in \{1, 2, \dots, m_1; 1, 2, \dots, m_2; \dots; 1, 2, \dots, m_K\} \quad (9)$$

$$\left(\sum_{m=1}^{m_k} b_m^k = \sum_{m=1}^{m_k} \sum_{j=1}^N a_{m,j}^k \right) \leq \left(b^k = \sum_{j=1}^N b_j^k \right)$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, k, \dots, K\} \quad (10)$$

其中, 式(9)表示的是异构网络分配给请求业务 k 的

$$b^k = \sum_{j=1}^N b_j^k \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, k, \dots, K\} \quad (5)$$

其中, 式(4)是网络容量约束条件, 网络 j 为所有业务分配的带宽资源不能超过其网络容量 C_j ; 式(5)是业务 k 满足 QoS 需求的带宽分配约束条件, 异构网络为业务 k 分配的带宽资源要满足业务 k 的 QoS 需求的带宽。

各个网络分配给各个业务相应的带宽之后, 再将分配给业务 k 的带宽分配给正在支持业务 k 的所有用户, 来满足由于传输速率等级和用户到达率引起的传输速率的动态变化。因此, 不同业务的所有用户带宽分配矩阵 \mathbf{T} 为

用户 m 的带宽资源, 基于多流多宿主传输技术的带宽分配方案, 异构网络要动态地分配足够的带宽资源给用户 m 以满足业务 k 不同的传输速率等级需求; 考虑式(5)中业务 k 满足 QoS 需求的带宽分配约束条件, 通过将式(9)对请求业务 k 的所有用户求和得到式(10), 式(10)表示了异构网络对请求业务 k 的所有用户分配带宽资源的上界, 分配给请求业务 k 的所有用户的总带宽资源要小于异构网络分配给业务 k 的带宽资源。

3.2 问题描述

在第 2 部分提出的系统模型基础上, 采用多流多宿主传输技术的带宽分配方案, 基于多门限带宽预留机制, 通过预设各个网络中不同业务的带宽分配门限, 并在各个网络中不同业务和用户的带宽分配矩阵约束条件的基础上, 根据业务 k 支持的传输速率等级需求和网络状态的变化, 将自适应带宽分配问题转化为一个动态优化问题。

1) 约束条件 1

$$\left(\sum_{k=1}^K B_j^k = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right) \leq \left(b_j = \sum_{k=1}^K b_j^k \right) \leq C_j$$

$$\forall j \in \{1, 2, \dots, j, \dots, N\} \quad (11)$$

网络 j 中分配给所有业务的全体用户的带宽资

源不能超过网络 j 的网络容量界 C_j 。

2) 约束条件 2

$$\left(B_j^k = \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right) \leq \varepsilon_{k,j}$$

$$\forall j \in \{1, 2, \dots, j, \dots, N\}, k \in \{1, 2, \dots, k, \dots, K\} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{1,j} > \varepsilon_{2,j} > \dots > \varepsilon_{k,j} > \dots > \varepsilon_{K,j} \quad (13)$$

基于多门限带宽预留机制，网络 j 中分配给业务 k 的带宽不能超过预先设置的带宽分配门限 $\varepsilon_{k,j}$ ，其中式(13)由业务 k 的特性决定。

3) 约束条件 3

$$\left(\sum_{m=1}^{m_k} b_m^k = \sum_{m=1}^{m_k} \sum_{j=1}^N a_{m,j}^k \right) > \sum_{j=1}^N \varepsilon_{k,j}$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, k, \dots, K\} \quad (14)$$

当式(14)对于某一给定的 $r_{k,w}$ 满足时，业务支持的满足 QoS 需求的传输速率自适应地从 $r_{k,w}$ 到 $r_{k,w-1}$ 逐步降级，直至 $r_{k,w} = r_{k,\min}$ 。这是因为采用带宽预留机制和自适应带宽分配算法可以有效地减小异构网络过载情况下新呼叫的阻塞概率。

4) 目标函数

$$F = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{m_k} r_{m,w}^k \quad (15)$$

$$F(\mathbf{T}) = \max \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{m_k} r_{m,w}^k \right\} \quad (16)$$

整个异构网络的吞吐量如式(15)所示，优化的目标函数可以表示为式(16)，通过自适应地分配用户的带宽资源，最大化整个异构网络实时网络吞吐量。

由此看出，本文将上述自适应带宽分配问题描述为一个动态优化问题，但这是一个带有多个约束条件的动态组合优化问题，计算动态带宽分配的全局最优闭式解是一个 NP-hard 问题，因此本文将在 3.3 节设计一个低复杂度的迭代带宽分配过程来求其带宽分配的次最优解，得到业务和用户优化的带宽分配矩阵，在此基础上计算网络实时吞吐量。

3.3 自适应带宽分配过程

基于所提系统模型中业务支持满足 QoS 需求的传输速率等级以及多门限带宽预留机制，利用异构网络中业务和用户的带宽分配矩阵，将具有传输速率等级需求的自适应带宽分配方案描述为一个动态优化问题。下面设计一个迭代过程来解决自适应带宽分配算法所构成的动态优化问题，在得到各

个网络中不同业务和用户优化的带宽分配矩阵的同时，实现网络实时吞吐量的最大化。

因为异构融合网络的业务基本上都支持可变速率传输，而带宽资源的分配是影响用户传输速率的决定性因素，因此本文提出基于多门限预留机制的自适应带宽分配算法，就是根据业务支持的传输速率等级需求和网络状态的变化动态调整不同网络中各个移动终端所支持业务的传输速率来进行不同网络间的业务分流，在多门限带宽预留机制基础上共享网络带宽以满足各业务对带宽的需求，实现异构融合网络中自适应带宽分配过程。自适应带宽分配的具体步骤如下。

1) 当满足

$$\sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \leq \varepsilon_{k,j} \quad (17)$$

时，网络 j 中分配给业务 k 的剩余带宽为

$$x_j^k = \varepsilon_{k,j} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, j, \dots, N\},$$

$$k \in \{1, 2, \dots, k, \dots, K\} \quad (18)$$

2) 假设请求业务 k 的新接入用户 m 需求的带宽资源为 $b_{m,\text{req}}^k$ ；考虑到带宽分配的公平性原则，将根据每个网络的容量分配相应的带宽给用户，如果每个网络能为新接入用户提供足够的带宽资源，则网络 j 分配给新接入用户 m 的带宽为

$$a_{m,j}^k = \frac{C_j}{C_1 + C_2 + \dots + C_N} b_{m,\text{req}}^k \quad (19)$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, k, \dots, K\}, m \in \{1, 2, \dots, m_1; 1, 2, \dots, m_2; \dots; 1, 2, \dots, m_K\}, j \in \{1, 2, \dots, j, \dots, N\}$$

3) 当满足

$$\left(x_j^k = \varepsilon_{k,j} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right) < a_{m,j}^k \quad (20)$$

时，剩余带宽最大的网络 n ($n \neq j$) 将为请求业务 k 的新接入用户分配相应的带宽 $a_{m,j}^k$ ，且有

$$\max_{n \neq j} \left\{ x_n^k = \varepsilon_{k,n} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,n}^k \right\} > a_{m,j}^k \quad (21)$$

4) 当满足

$$\max_{n \neq j} \left\{ x_n^k = \varepsilon_{k,n} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,n}^k \right\} < a_{m,j}^k \quad (22)$$

时，请求业务 k 的用户 m 将降低其传输速率需求直

至请求最小分配带宽满足其 $r_{k,w} = r_{k,\min}$; 如果新接入用户只能请求最小带宽需求满足其 $r_{k,w} = r_{k,\min}$ 才能接入异构网络, 则支持满足 QoS 需求的最大传输速率 $\max_w \{r_{k,w}\}$ 正在进行的用户将逐步地降低其传输速率需求, 以接纳只能请求最小带宽需求的新接入用户。

5) 若所有用户只能请求最小带宽以满足其最小的传输速率需求 $r_{k,w} = r_{k,\min}$, 此时,

$$\left(\sum_{m=1}^{m_k} b_m^k = \sum_{m=1}^{m_k} \sum_{j=1}^N a_{m,j}^k \right) \geq \left(b^k = \sum_{j=1}^N b_j^k \right) \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, k, \dots, K\} \quad (23)$$

式(23)表明异构网络分配给业务 k 的带宽资源已经被请求业务 k 的用户全部占用, 由于没有可用的带宽资源足以支持最小传输速率需求, 因此异构网络将拒绝请求业务 k 的新用户接入。

假设支持业务 k 的用户 m 从网络 j 请求的带宽表示为 $b_{m,j,\text{req}}^k$, 则支持业务 k 的用户 m 从整个异构

网络请求的带宽表示为 $b_{m,\text{req}}^k = \sum_{j=1}^N b_{m,j,\text{req}}^k$; 由于网络中可用带宽资源的不断变化, 网络 j 分配给支持业务 k 的用户 m 的可用带宽资源表示为 $b_{m,j,\text{assigned}}^k = a_{m,j}^k$, 则整个异构网络分配给支持业务 k 的用户 m 的可用带宽资源表示为 $b_{m,\text{assigned}}^k = \sum_{j=1}^N b_{m,j,\text{assigned}}^k = \sum_{j=1}^N a_{m,j}^k$ 。

为了更加明确地体现自适应带宽分配过程的动态性, 所提的自适应带宽分配迭代过程中逐次执行动态优化迭代算法伪代码中 if 条件满足时的传输速率动态调整指令, 完成自适应的动态带宽分配过程。自适应带宽分配的迭代过程具体描述如下。

1) for $k \in \{1, 2, \dots, K\}, m \in \{1, 2, \dots, m_k\}, j \in \{1, 2, \dots, N\}$ do

计算网络 j 中业务 k 剩余的可用带宽 $x_j^k = \varepsilon_{k,j} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k$ 以支持传输速率 $r_{m,w}^k$

2) if $\left(x_j^k = \varepsilon_{k,j} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right) \geq b_{j,\text{max}}^k$ then

$b_{m,j,\text{assigned}}^k = b_{j,\text{max}}^k // b_{m,j,\text{assigned}}^k \geq b_{m,j,\text{req}}^k$ 网络 j 中业务 k 传输速率 QoS 升级

3) else if $b_{j,\text{max}}^k > \left(x_j^k = \varepsilon_{k,j} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right) \geq b_{m,j,\text{req}}^k$

then

4) if $b_{m,j,\text{req}}^k \leq b_{j,w}^k \leq \left(x_j^k = \varepsilon_{k,j} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right) < b_{j,w+1}^k$

$\leq b_{j,\text{max}}^k$ then

$b_{m,j,\text{assigned}}^k = b_{j,w}^k // b_{m,j,\text{assigned}}^k \geq b_{m,j,\text{req}}^k$ 网络 j 中业务 k 传输速率 QoS 升级

5) end if

6) else if $b_{m,j,\text{req}}^k > \left(x_j^k = \varepsilon_{k,j} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right) \geq b_{j,\text{min}}^k$

then

7) if $b_{j,\text{min}}^k \leq b_{j,w}^k \leq \left(x_j^k = \varepsilon_{k,j} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right) < b_{j,w+1}^k$

$\leq b_{m,j,\text{req}}^k$ then

$b_{m,j,\text{assigned}}^k = b_{j,w}^k // b_{m,j,\text{assigned}}^k < b_{m,j,\text{req}}^k$ 网络 j 中业务 k 传输速率 QoS 降级

8) end if

9) else if $b_{m,j,\text{req}}^k \geq b_{j,\text{min}}^k > \left(x_j^k = \varepsilon_{k,j} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right)$

then

10) if $\max_{n \neq j} \left\{ x_n^k = \varepsilon_{k,n} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,n}^k \right\} > \left\{ b_{j,\text{min}}^k - \left(\varepsilon_{k,j} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right) \right\}$

then

网络 n 把带宽 $b_{j,\text{min}}^k - \left(\varepsilon_{k,j} - \sum_{i=1}^{m_k} a_{i,j}^k \right)$ 借给网络 j 以供业务 k 使用

11) end if

12) end if

13) if $\left(\sum_{m=1}^{m_k} \sum_{j=1}^N a_{m,j}^k \right) > \sum_{j=1}^N b_j^k$ then

$r_{m,w}^k = r_{m,w-1}^k$

14) if $r_{m,w}^k = r_{k,\text{min}}$ then

由于没有可用的带宽资源分配给业务 k , 请求业务 k 的新用户将被异构网络阻塞

15) end if

16) end if

17) end for

因为所设计的迭代带宽分配过程是基于集中式带宽分配方式, 同时考虑网络带宽资源动态变化对共享网络带宽满足业务需求的影响, 根据业务支持的传输速率等级需求来自适应分配带宽资源, 因

此所提方法可以有效提高异构网络带宽的利用效率。经过上述带宽分配过程，得到各个网络中不同业务和用户优化的带宽分配矩阵，异构网络的带宽资源优化分配给用户并得到有效的利用，同时根据式(16)得到异构网络最大的实时吞吐量。需要说明的是在异构网络融合环境下，基于集中式带宽分配方式的自适应带宽分配算法，运营商可以采用异构融合网络的“带宽集中控制单元”来进行带宽的集中分配和有效利用，由于所提算法中系统需要知道用户请求的业务种类和带宽需求等参数来进行自适应带宽分配过程，因此异构融合网络的负载信息、用户通信环境和位置信息、用户请求业务信息以及分配的带宽资源信息等方面的参数可以通过“带宽集中控制单元”来收集得到，虽然“带宽集中控制单元”花费一定的通信代价来收集这些系统参数，但是这个通信代价对算法本身性能是没有影响的，况且由于系统参数的获取有专门的参数收集单元来完成，提高了系统参数的实时获取效率和准确性，这些参数是作为所提算法的带宽分配决策参数，对算法性能提高至关重要，但是获取这些参数的通信代价对算法本身的性能几乎是没有任何影响的。

4 仿真结果与性能评估

假设请求业务 k 的新用户到达过程为泊松过程，到达率为 λ_k ，则异构融合网络中请求各业务的平均呼叫达到过程同样为泊松过程，其平均呼叫到

达率为 $\lambda = \sum_{k=1}^K \lambda_k / K$ 。仿真场景中支持 2 类不同的业务，不同的业务支持若干个传输速率等级，即 $r_{m,w}^k \in R_k = \{r_{k,w}\} (k=1, 2, \dots, K; w=1, 2, \dots, W_k; m \in \{1, 2, \dots, m_1; 1, 2, \dots, m_2; \dots; 1, 2, \dots, m_K\})$ 。对于业务信息，仿真中设定 $K=2, W_1=3, W_2=4$ ，业务 1 的传输速率等级集合 $R_1 = \{256 \text{ kbit/s}, 512 \text{ kbit/s}, 1\ 024 \text{ kbit/s}\}$ ，业务 2 的传输速率等级集合 $R_2 = \{128 \text{ kbit/s}, 256 \text{ kbit/s}, 512 \text{ kbit/s}, 1\ 024 \text{ kbit/s}\}$ 。

η_{mj} 表示从用户 m 到网络 j 传输过程中平均误比特率 (BER, bit error rate)，假设服从 $[10^{-4}, 1]$ 之间的均匀分布。 β_j 表示网络 j 中所有用户的传输速率增益，为简便起见，假设 $\beta_j=1$ 。

假设仿真场景中的异构无线网络由 3 个完全重叠覆盖的网络构成，其网络容量分别为 C_1, C_2 和 C_3 ；用 $\varepsilon_{1,1}, \varepsilon_{2,1}, \varepsilon_{1,2}, \varepsilon_{2,2}, \varepsilon_{1,3}$ 和 $\varepsilon_{2,3}$ 表示各个网络中不同业务的带宽预设门限。仿真参数值如表 1 所示，迭代过程中的相关参数也一并列于表 1 中。

为了评估基于多门限预留机制的自适应带宽分配算法的性能改善，在新呼叫的阻塞概率、平均用户接入率、带宽利用效率和实时网络吞吐量等方面将其与无自适应带宽分配算法^[4,8]并结合文献[10]和文献[12]的研究成果进行比较分析。

$$\text{当} \left(\sum_{m=1}^{m=m_k} \sum_{j=1}^N a_{m,j}^k \right) > \sum_{j=1}^N b_j^k \text{ 时表明异构网络分配给}$$

业务 k 的带宽资源已经被请求业务 k 的用户全部占用，若所有用户只能请求最小带宽以满足其最小的传

表 1 仿真参数

参数	取值	参数	取值	参数	取值
C_1	90 Mbit/s	$\varepsilon_{1,1}$	60 Mbit/s	$\varepsilon_{2,1}$	30 Mbit/s
C_2	60 Mbit/s	$\varepsilon_{1,2}$	30 Mbit/s	$\varepsilon_{2,2}$	30 Mbit/s
C_3	30 Mbit/s	$\varepsilon_{1,3}$	30 Mbit/s	$\varepsilon_{2,3}$	15 Mbit/s
K	2	W_1	3	W_2	4
R_1	{256 kbit/s, 512 kbit/s, 1 024 kbit/s }	R_2	{128 kbit/s, 256 kbit/s, 512 kbit/s, 1 024 kbit/s }	β_j	1
η_{mj}	$[10^{-4}, 1]$ 间的均匀分布	λ_1	[0, 9]	λ_2	[0, 9]
$b_{m,1, \text{req}}^1$	256 kbit/s	$b_{m,2, \text{req}}^1$	171 kbit/s	$b_{m,3, \text{req}}^1$	85 kbit/s
$b_{m,1, \text{req}}^2$	128 kbit/s	$b_{m,2, \text{req}}^2$	85 kbit/s	$b_{m,3, \text{req}}^2$	43 kbit/s
$b_{1, \text{max}}^1$	512 kbit/s	$b_{2, \text{max}}^1$	341 kbit/s	$b_{3, \text{max}}^1$	171 kbit/s
$b_{1, \text{max}}^2$	512 kbit/s	$b_{2, \text{max}}^2$	341 kbit/s	$b_{3, \text{max}}^2$	171 kbit/s
$b_{1, \text{min}}^1$	128 kbit/s	$b_{2, \text{min}}^1$	85 kbit/s	$b_{3, \text{min}}^1$	43 kbit/s
$b_{1, \text{min}}^2$	64 kbit/s	$b_{2, \text{min}}^2$	43 kbit/s	$b_{3, \text{min}}^2$	21 kbit/s

输速率需求 $r_{m,w}^k = r_{k,\min}$ 时, 由于没有可用的带宽资源分配给业务 k 足以支持请求业务 k 新用户的最小传输速率需求, 此时请求业务 k 的新用户将被异构网络阻塞, 基于此定义新呼叫的阻塞概率为

$$P_b = P \left\{ r_{m,w}^k = r_{k,\min} \left(\sum_{m=1}^{m=m_k} \sum_{j=1}^N a_{m,j}^k \right) > \sum_{j=1}^N b_j^k, \forall m, k \right\} \quad (24)$$

图 4 所示为采用所提的基于多门限预留机制的自适应带宽分配算法和采用无自适应带宽分配算法后各类业务的新呼叫的阻塞概率性能比较。可以看出, 采用基于多门限预留机制的自适应带宽分配算法的各类业务的新呼叫的阻塞概率要远低于采用无自适应带宽分配算法的各类业务的新呼叫的阻塞概率。这是因为自适应带宽分配算法能够根据网络的负载情况自适应地降低传输速率等级需求以提供更多的空闲带宽资源来接纳更多的新呼叫, 同时, 带宽预留机制能为各类业务预留可用的带宽资源。

从图 4 中还可以看出, 采用自适应带宽分配算法, 业务 2 新呼叫的阻塞概率要低于业务 1 新呼叫的阻塞概率, 这是因为业务 2 能够支持 4 个传输速率等级需求, 可以支持最小的传输速率为 128 kbit/s, 因此, 相比业务 1, 业务 2 对于新呼叫接入异构网络具有更大的自适应性。

不同的带宽分配算法将直接影响新呼叫的阻塞概率 P_b , 同时也会影响用户成功接入网络的数目。为了表征不同的带宽分配算法对用户成功接入异构融合网络所产生的影响, 定义平均用户接入率 τ : 请求各个业务并且成功接入异构融合网络的用户数目与请求各个业务的用户总数的比值。图 5 所示为采用提出的基于多门限带宽预留机制的自适应带宽分配算法和采用无自适应带宽分配算法所得到的平均用户接入率性能比较。可以看出, 采用所提的基于多门限带宽预留机制的自适应带宽分配算法可以得到较高的平均用户接入率, 随着平均呼叫到达率的增大, 平均用户接入率将不断降低。这是因为采用了多流多宿主传输技术的带宽分配方案, 可以集中地分配异构网络中的带宽资源, 得到各个网络中不同业务和用户优化的带宽分配矩阵, 使得带宽资源得到合理分配和利用, 并基于多级传输速率自适应调整多门限带宽预留机制, 降低了各业务的新呼叫阻塞概率, 从而提高了平均用户的接入率。由于无自适应带宽分配算法没有采用带宽分配的自适应特

性来解决异构融合网络中各个网络中带宽资源分布不均衡问题, 致使总的带宽资源得不到有效利用, 使得平均用户的接入率呈现出阶梯式降低的趋势。

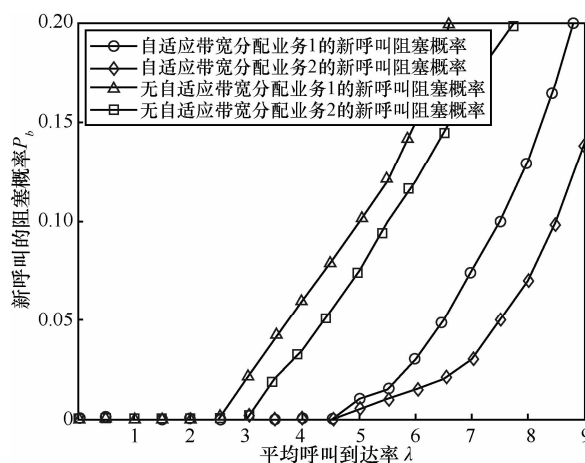


图 4 各业务的新呼叫阻塞概率性能

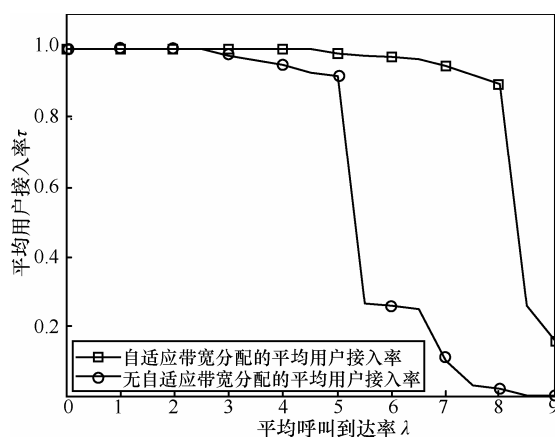


图 5 平均用户接入率性能

整个异构融合网络分配给所有请求业务的用户带宽资源为 $\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{m_k} \sum_{j=1}^N a_{m,j}^k$, 异构融合网络总的容量为 $\sum_{n=1}^N C_n$, 定义异构融合网络的带宽利用效率 η 为

$$\eta = \left(\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{m_k} \sum_{j=1}^N a_{m,j}^k \right) / \left(\sum_{n=1}^N C_n \right) \quad (25)$$

图 6 给出采用提出的基于多门限带宽预留机制的自适应带宽分配算法和采用无自适应带宽分配算法所得到的带宽利用效率性能比较。从图中可以看出, 所提的带宽分配算法可以获得较高的带宽利用效率, 随着平均呼叫到达率的增大, 带宽利用效率将逐步提高, 当平均呼叫到达率 λ 为 7 时, 带宽

利用效率 η 到达 1；当平均呼叫到达率 λ 大于 8 后，接入的所有用户都分配最小带宽满足其最小的传输速率需求，此时没有可用的带宽资源支持新接入用户的最小传输速率需求，将出现用户接入阻塞点。由于所提算法通过集中方式分配异构网络中的带宽资源，可以充分利用异构网络的融合特性和带宽分配的自适应性特性以最大化整个异构网络实时吞吐量来得到优化的带宽分配矩阵，从而可以得到较高的带宽利用效率；由于无自适应带宽分配算法没有考虑多流多宿主传输特性和带宽分配的自适应性特性，使得异构融合网络中的带宽资源得不到充分利用，因而带宽利用效率较低。

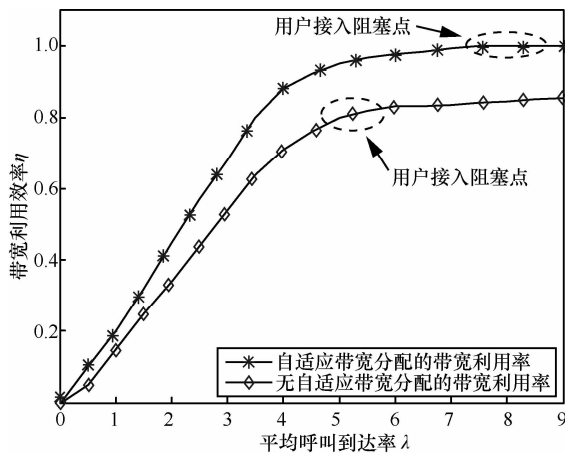


图6 带宽利用效率性能

采用不同的带宽分配算法后，对异构融合网络中各个业务中所有用户的传输速率累加得到整个异构融合网络的吞吐量如式(15)所示。采用所提的带宽分配算法得到各个网络中不同业务和用户优化的带宽分配矩阵，根据式(16)得到异构融合网络最大吞吐量。图7所示为采用所提的基于多门限预留机制的自适应带宽分配算法和采用无自适应带宽分配算法实时网络吞吐量性能比较。可以看出，采用基于多门限带宽预留机制的自适应带宽分配算法的网络吞吐量要远高于采用无自适应带宽分配算法的网络吞吐量，在平均呼叫到达率 λ 为 5 时达到 40%，这表明采用所提出的基于多门限带宽预留机制的自适应带宽分配算法可以有效地提高异构网络中带宽资源的利用效率。这是因为采用自适应带宽分配算法和带宽预留机制后，更多的新呼叫可以接纳到异构网络中，减小了新呼叫的阻塞概率，提高了平均用户接入率，有效地利用整个网络的容量来最大化异构网络的实时吞吐量。

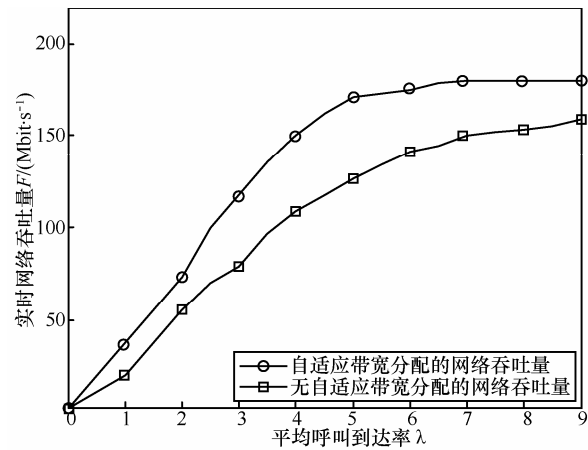


图7 实时网络吞吐量性能

5 结束语

本文提出了一种基于多门限带宽预留机制的自适应带宽分配算法，以满足业务的多级传输速率需求并为异构网络中多业务提供 QoS 保证。采用多流多宿主传输方案，基于所提系统模型中业务支持满足 QoS 需求的传输速率等级以及多门限带宽预留机制，通过预设各个网络中不同业务的带宽分配门限，并基于各个网络中不同业务和用户的带宽分配矩阵，将具有传输速率等级需求的自适应带宽分配方案转化为一个动态优化问题，并采用一个迭代过程来解决自适应带宽分配算法所构成的动态优化问题，在带宽预留门限和异构网络容量的约束条件下最大化整个异构网络实时吞吐量，提高了整个异构网络中带宽的利用效率。数值结果显示，所提的算法在支持满足 QoS 需求的传输速率等级和提供业务 QoS 保证的基础上，降低了新用户接入异构网络的阻塞概率，提高了平均用户接入率并能够使异构网络实时吞吐量达到最大化，使异构网络中的带宽资源得到有效的利用，充分发挥异构网络的融合特性。

参考文献:

- [1] MAPP G, AIASH M, GUARDIA H C, *et al.* Exploring multi-homing issues in heterogeneous environments[A]. Proc 25th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA 2011)[C]. Biopolis, Singapore, 2011. 690-695.
- [2] ISMAIL M, ZHUANG W H, ELHEDHLI S. Energy and content aware multi-homing video transmission in heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3600-3610.
- [3] XUE P, GONG P, PARK J H, *et al.* Radio resource management with

- proportional rate constraint in the heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 1066-1075.
- [4] LUO C Q, JI H, LI Y. Utility-based multi-service bandwidth allocation in the 4G heterogeneous wireless access networks[A]. Proc 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2009)[C]. Budapest, Hungary, 2009. 1-5.
- [5] ISMAIL M, ZHUANG W H. A distributed multi-service resource allocation algorithm in heterogeneous wireless access medium[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(2): 425-432.
- [6] 刘娇蛟, 韦岗. 基于加权协商对策论异构网络快速无线传输的速率分配算法[J]. 电子学报, 2012, 40(7): 1471-1475.
LIU J J, WEI G. A game-theoretic rate allocation with minimized transmission time over heterogeneous wireless access networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(7): 1471-1475.
- [7] 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.
- [8] CHEN H F, DING X D, WANG Z, *et al.* A rate allocation scheme for multi-user over heterogeneous wireless access networks[A]. Proc 2010 IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010)[C]. Ottawa, Canada, 2010. 1-5.
- [9] 石华, 李建东, 李钊等. 异构无线网络中基于覆盖概率的动态频谱分配算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 939-945.
SHI H, LI J D, LI Z, *et al.* Dynamic spectrum allocation based on coverage probability in heterogeneous wireless networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(4): 939-945.
- [10] HWANG B J, HWANG I S, KU L F. Adaptive bandwidth management and reservation scheme in heterogeneous wireless networks[J]. Journal of Internet Technology, 2009, 10(3): 237-244.
- [11] MEI J Q, HO P H, JI H, *et al.* Service-aware optimal spectrum sharing algorithm in heterogeneous wireless networks[A]. Proc 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC 2010)[C]. Cape town, South Africa, 2010. 1-5.
- [12] FALOWO O E, CHAN H A. Adaptive bandwidth management and joint call admission control to enhance system utilization and QoS in heterogeneous wireless networks[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2007, 2007: 034378.
- [13] HE Z H, PEI T R, ZHANG Z X, *et al.* Bandwidth reservation based call admission control for coexisting heterogeneous wireless technologies[A]. Proc 2009 International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology (CNMT 2009)[C]. Wuhan, China, 2009. 943-946.
- [14] 惠蕾放, 李建东, 肖丽媛等. 无线网络中兼顾业务类型及公平性的无线资源共享问题研究[J]. 通信学报, 2011, 32(4): 39-46.
HUI L F, LI J D, XIAO L Y, *et al.* Radio resource sharing for wireless networks with traffic type and fairness consideration[J]. Journal on Communications, 2011, 32(4): 39-46.
- [15] LOPEZ-BENITEZ M, GOZALVEZ J. Common radio resource management algorithms for multimedia heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(9): 1201-1213.
- [16] SKEHILL R, BARRY M, KENT W, *et al.* The common RRM approach to admission control for converged heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(2): 48-56.
- [17] 陈卓, 冯钢, 周江等. P2P 流媒体网络中基于博弈理论的带宽请求分配策略[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(7): 1725-1731.
CHEN Z, FENG G, ZHOU J, *et al.* Game theoretical bandwidth request allocation policy in P2P streaming network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(7): 1725-1731.
- [18] CHEN Y J, ZHANG J, LIN P, *et al.* Optimal pricing and spectrum allocation for wireless service provider on Femtocell deployment[A]. Proc 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC 2011)[C]. Kyoto, Japan, 2011. 1-5.
- [19] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: dynamic game, inefficiency of Nash equilibrium, and collusion[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 192-202.

作者简介:



陈康 (1984-), 男, 山东潍坊人, 东南大学博士生, 主要研究方向为异构网络无线资源管理等。



夏玮玮 (1975-), 女, 江苏句容人, 博士, 东南大学副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为短距离无线通信与泛在网络、异构网络无线资源优化等。



沈连丰 (1952-), 男, 江苏邳州人, 东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动互联网、移动自组织网络、短距离无线通信与泛在网络等。