

基于传输速率自适应的动态带宽分配算法

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: 提出一种基于传输速率自适应的动态带宽分配算法, 为异构无线网络中的多业务提供服务质量保证。根据所提的传输速率优先级决策模型, 在传输速率 QoS 需求和异构网络容量约束的条件下, 通过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得到最优带宽重分配矩阵, 以最大化整个异构网络的效用函数; 将自适应带宽重分配问题描述为一个优化问题, 采用动态优化的迭代算法自适应调节用户传输速率来进一步最大化该效用函数。理论分析和数值仿真结果表明, 所提算法在给定传输速率且满足 QoS 需求的基础上, 能够最大化网络的效用函数并减小新呼叫的阻塞概率。

关键词: 异构无线网络; 传输速率自适应; 带宽重分配; 效用函数; 阻塞概率

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)05-0025-08

Dynamic bandwidth allocation algorithm based on transmission rate adaptation

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

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

Abstract: A dynamic bandwidth allocation algorithm was proposed based on the transmission rate adaptation to guarantee the quality of service (QoS) for multi-service in heterogeneous wireless network. According to the proposed transmission rate priority decision model, an optimal bandwidth reallocation matrix was obtained by dynamically adjusting users' transmission rates to maximize the utility function of entire heterogeneous network under the transmission rate QoS requirements and capacity constraints. The adaptive bandwidth reallocation problem was formulated as an optimal problem and a dynamic optimal iterative procedure was used to adjust adaptively users' transmission rates to further maximize this utility function. The results of theoretical analysis and numerical simulation show that the proposed algorithm can maximize the network utility function and reduce the new calls blocking probability as well as guaranteeing the transmission rate and QoS requirements.

Key words: heterogeneous wireless network; transmission rate adaptation; bandwidth reallocation; utility function; blocking probability

1 引言

通用计算机普遍装配多个通信接口, 例如有线形式的以太网接口和无线形式的 WLAN、Bluetooth、红外线接口等; 同样, 移动通信终端也已普遍配有多个通信接口。当不同通信接口配置不同网络层地址

时, 终端就具有多宿主特性^[1,2]。随着新一代宽带无线通信的发展与应用, 未来终端的多宿主性将是一种普通形态。

在由多个异构网络共存的环境中, 为了让资源利用更合理、人们使用更方便, 可以充分利用各网络的特性为具有多个无线接口的移动终端所请求

收稿日期: 2013-06-02; 修回日期: 2014-01-07

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)

的业务提供优于单个网络的服务。对于一个多接口终端,各接口均可独自建立其数据传输路径,采用多流并发传输机制,获得最大的业务吞吐量,同时改善业务的服务质量,充分发挥异构网络的融合特性。另外,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,因此一个业务请求可以涉及多个媒体流,这些经由不同路径并发流的协同传输更能保证业务的 QoS 和用户体验。显然,这种具有多宿主功能的移动终端共享所有接入网络总的带宽资源。因此,不同无线接入网络中的带宽分配问题成为无线资源管理的重要研究内容^[3]。

带宽分配已是异构网络资源管理中一个新的研究热点。文献[4]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[5]基于联合无线资源管理架构提出一种业务支持的最优频谱共享算法,采用一个频谱池来管理空闲频谱资源。文献[6]针对多业务场景提出一种基于效用的带宽分配算法,移动终端多个无线接口同时为同一业务提供来自不同网络可用的带宽资源,仿真结果表明其所提算法有效地减小了新接入用户的阻塞概率。文献[7]提出一种基于非合作博弈理论方法的带宽分配算法,将带宽分配问题描述为寡头垄断市场竞争,市场竞争建模为古诺博弈,通过迭代和搜索算法得到稳定的纳什均衡解。文献[8]提出一种基于合作博弈框架的带宽分配算法,所有网络形成一个联盟来保证带宽分配满足系统中的所有网络。文献[9]提出一种基于分布式博弈理论的自适应带宽分配,每个网络通过分配带宽资源给用户以最大化网络的效用函数并通过证明得到纳什均衡点。文献[10]研究了一种两层 Macro-Femto 异构网络场景,从经济学观点提出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,用户通过选择 Macrocell 服务或者 Femtocell 服务来优化自身的效用。文献[11]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,但没有考虑当资源变化后如何动态共享资源以满足业务需求。文献[12]提出一种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可观的 QoS 等级。

文献[13]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,当某个网络中的资源超出容量,通用资源管理可以协调各个网络之间的资源分配,实现网络间的资源均衡及合理利用。

上述文献没有充分考虑异构网络环境下移动终端的多宿主接入特性,以及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。本文基于多流多宿主传输控制技术,研究异构无线网络环境下基于传输速率自适应的动态带宽分配算法,根据负荷分担传输、重叠覆盖区传输等实际应用场景,提出一种基于传输速率自适应的动态带宽分配算法,并采用一个动态优化的迭代算法自适应调节用户的传输速率来得到最优的带宽重分配矩阵,以此最大化整个异构网络的效用函数。

2 系统模型

图 1 表示多个无线接入网络共存于某一地理区域内形成的异构网络融合场景。具有多宿主功能的移动终端,其某一业务可有多个接入网络共同承载^[14],同时为其提供服务。

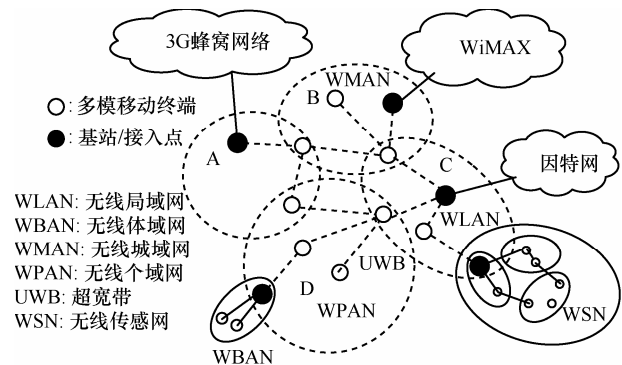


图 1 异构网络融合场景

基于上述异构网络融合场景,假设有 N 个无线接入网络,用集合表示为 $N=\{1, 2, \dots, N\}$; 对于任意 $n \in N$, 有 S_n 个基站 (BS, base stations) 或者接入点 (AP, access points) 为移动终端提供服务,表示为 $S_n=\{1, 2, \dots, S_n\}$, $n \in N$ 。此异构网络区域里的用户表示为 $M=\{1, 2, \dots, M\}$; 由网络 n 的第 s 个 BS/AP 提供服务的所有用户构成的集合表示为 $M_{ns} \subseteq M$, 其中, $m \in M, n \in N, s \in S_n$ 。异构网络支持的所有业务可以表示为 $K=\{1, 2, \dots, K\}$; 对于业务 $k_m \in K$, 网络传输所需要的带宽范围表示为 $\{B_{k_m}^{\min}, B_{k_m}^{\max}\}$ 。 $R_{ns}(m, k_m)$ 表示支持业务 $k_m \in K$ 的移动终端 m 在网络 n 的第 s 个 BS/AP 中的传输速率,其

值随着网络的负载状态和业务数量的变化而动态改变；为了达到传输速率 $R_{ns}(m, k_m)$ ，网络 n 的第 s 个 BS/AP 分配带宽 b_{nms} 给支持业务 k_m 的移动终端 m ，其中， $\forall n \in \mathbf{N}, s \in \mathbf{S}_n, m \in \mathbf{M}$ 和 $k_m \in \mathbf{K}$ ；依此，网络 n 的第 s 个 BS/AP 分配给所有移动终端的带宽分配向量表示为 $\mathbf{B}_{ns} = [b_{n1s}, b_{n2s}, \dots, b_{n1s}, \dots, b_{nMs}]$ ，同时，假设移动终端 m 不在网络 n 的第 s 个 BS/AP 覆盖范围之内，则此网络分配给这个移动终端的带宽为零，即 $b_{nms} = 0$ 。

3 基于传输速率自适应的动态带宽分配算法

在异构网络环境下，一个运营商运营的多个网络，可以采用异构网络的“带宽集中控制单元”^[6]来进行带宽的集中分配和有效利用，因为带宽的分配是影响用户传输速率的决定性因素，因此提出基于传输速率自适应的带宽分配算法，根据网络的负载状况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进行不同网络间的业务分流；此外现在的异构网络业务基本上都支持可变速率传输，这使得传输速率自适应作为带宽分配的一种实现方式，有其实际意义和利用价值。与不考虑带宽重分配的固定带宽分配算法^[3,4]相比，基于传输速率自适应的带宽分配算法可以有效利用异构网络中的带宽资源，提高带宽的利用效率。

3.1 基于传输速率的优先级决策模型

对于基于传输速率自适应的动态带宽分配算法的研究，首先考虑业务的传输优先级队列问题。

用集合 $\mathbf{M}_{ns1} \subseteq \mathbf{M}_{ns}$ 表示网络 n 的第 s 个 BS/AP 的本地用户组，本地用户组中的用户是指属于网络 n 的第 s 个 BS/AP 的注册用户；用集合 $\mathbf{M}_{ns2} \subseteq \mathbf{M}_{ns}$ 表示网络 n 的第 s 个 BS/AP 的代理用户组，代理用户组中的用户不是网络 n 的第 s 个 BS/AP 的注册用户，但可以由网络 n 的第 s 个 BS/AP 为其提供代理服务；其中，集合 \mathbf{M}_{ns1} 和 \mathbf{M}_{ns2} 是正交的，满足 $\mathbf{M}_{ns1} \cap \mathbf{M}_{ns2} = \emptyset$ 和 $\mathbf{M}_{ns1} \cup \mathbf{M}_{ns2} = \mathbf{M}_{ns}$ 。对于任意移动终端 $m \in \mathbf{M}_{ns1}$ ，网络 n 的第 s 个 BS/AP 优先为其服务，满足其传输速率需求。

对于移动终端 $m \in \mathbf{M}_{ns2}$ ，传输优先级按照下面介绍的方法决定。对于某一业务 $k \in \mathbf{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ ，假设业务 k 的 QoS 决策因子的个数为 T ，则其决策因子向量表示为 $[q^1(k), q^2(k), \dots, q^T(k)]$ ；各决策因子按照对业务 QoS 影响的重要性彼此进行比较，得到优先级决策因子比较如表 1 所示。

因子	$q^1(k)$	$q^2(k)$...	$q^T(k)$
$q^1(k)$	$a_{k,11}$	$a_{k,12}$...	$a_{k,1T}$
$q^2(k)$	$a_{k,21}$	$a_{k,22}$...	$a_{k,2T}$
...
$q^T(k)$	$a_{k,T1}$	$a_{k,T2}$...	$a_{k,TT}$

表 1 中的优先级决策因子比较数值形成一个 $T \times T$ 的矩阵，即

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} a_{k,11} & a_{k,12} & \dots & a_{k,1T} \\ a_{k,21} & a_{k,22} & \dots & a_{k,2T} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{k,T1} & a_{k,T2} & \dots & a_{k,TT} \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据文献[15]中的方法，各决策因子的加权向量 $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_T]$ 是矩阵 \mathbf{H} 的最大特征值 x_{\max} 所对应的特征向量，由此可以得到各 QoS 决策因子的加权值。

考虑的 QoS 决策因子包括：吞吐量 α 、传输速率 R 、可靠性 γ 、安全性 δ 、代价 ε 等决策因子。各决策因子按照对业务 $k \in \mathbf{K}$ 的 QoS 影响重要性相互进行比较，最终得到各 QoS 决策因子的加权值。基于这些决策因子的权值，优先考虑传输速率 R 的权值大小决定不同业务的传输优先级的顺序。基于传输速率的优先级决策过程如图 2 所示。

图 2 中两类用户组 \mathbf{M}_{ns1} 和 \mathbf{M}_{ns2} 分别按照其传输优先级决策规则确定其用户的传输优先级，异构网络中的各无线接入网络通过动态分配带宽资源给移动终端，满足其传输速率的 QoS 需求。

3.2 问题描述

移动终端通过向异构网络的带宽集中控制单元发送服务请求和用户信息，包括请求的业务等级、终端形态和带宽需求等，带宽集中控制单元按照用户的传输速率需求和可用的网络带宽资源分配合适的带宽给用户使用。

$R_{ns}(m, k_m)$ 表示支持业务 $k_m \in \mathbf{K}$ 的移动终端 m 在网络 n 的第 s 个 BS/AP 中的传输速率；为了达到传输速率 $R_{ns}(m, k_m)$ ，网络 n 的第 s 个 BS/AP 分配带宽 b_{nms} 给支持业务 k_m 的移动终端 m ，其中， $\forall n \in \mathbf{N}, s \in \mathbf{S}_n, m \in \mathbf{M}$ 和 $k_m \in \mathbf{K}$ 。基于多模移动终端的多宿主功能，异构网络中所有 BS/AP 为所有移动终端分配带宽，其最优带宽分配矩阵可以表示为

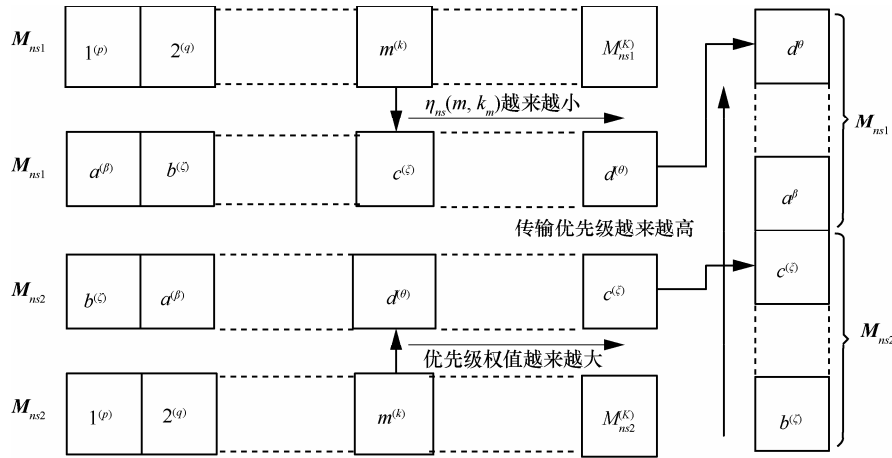


图 2 基于传输速率的优先级决策过程

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ \vdots \\ B_{1S_1} \\ B_{21} \\ B_{22} \\ \vdots \\ B_{2S_2} \\ \vdots \\ B_{N1} \\ B_{N2} \\ \vdots \\ B_{NS_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{111} & b_{121} & \cdots & b_{1i1} & \cdots & b_{1M1} \\ b_{112} & b_{122} & \cdots & b_{1i2} & \cdots & b_{1M2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{11S_1} & b_{12S_1} & \cdots & b_{1iS_1} & \cdots & b_{1MS_1} \\ b_{211} & b_{211} & b_{221} & \cdots & b_{2i1} & \cdots & b_{2M1} \\ b_{212} & b_{212} & b_{222} & \cdots & b_{2i2} & \cdots & b_{2M2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{21S_2} & b_{22S_2} & \cdots & b_{2iS_2} & \cdots & b_{2MS_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{N11} & b_{N21} & \cdots & b_{Ni1} & \cdots & b_{NM1} \\ b_{N12} & b_{N22} & \cdots & b_{Ni2} & \cdots & b_{NM2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{N1S_N} & b_{N2S_N} & \cdots & b_{NiS_N} & \cdots & b_{NMS_N} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,

$$b_{nms} = R_{ns}(m, k_m) / \eta_{ns}(m, k_m) \quad \forall n \in N, s \in S_n, m \in M, k_m \in K \quad (3)$$

$\eta_{ns}(m, k_m)$ 是网络 n 的第 s 个 BS/AP 的带宽资源对支持业务 $k_m \in K$ 的移动终端 m 传输的频谱效率。

式(2)中带宽分配矩阵 \mathbf{B} 的约束条件表述如下。

1) 约束条件 1

$$\sum_{m=1}^M (R_{ns}(m, k_m) / \eta_{ns}(m, k_m)) \leq C_n \quad \forall n \in N, s \in S_n, k_m \in K \quad (4)$$

$$\eta_{ns}(m, k_m) = \text{lb} \left(1 + \frac{1.5}{\ln(0.2 / BER_{ns}^{tar})} \gamma_{ns}(m, k_m) \right) \quad (5)$$

网络 $n \in N$ 的容量需要满足不等式(4); 式(5)中的 $\gamma_{ns}(m, k_m)$ 是网络 n 的第 s 个 BS/AP 的接收信噪比,

BER_{ns}^{tar} 是网络 n 的第 s 个 BS/AP 的目标误比特率。

2) 约束条件 2

$$B_{k_m}^{\min} \leq \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^{S_n} R_{ns}(m, k_m) / \eta_{ns}(m, k_m) \leq B_{k_m}^{\max}, \quad \forall m \in M, k_m \in K \quad (6)$$

对于支持业务 k_m 的移动终端 m , 异构网络中的各无线接入网络通过动态分配带宽资源给移动终端 m , 以满足其业务 k_m 的 QoS 需求。

③ 定义的效用函数

$$U = \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^{S_n} U_{ns}(\mathbf{B}_{ns}) = \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^{S_n} U_{ns}((R_{ns}(1, k_1) / \eta_{ns}(1, k_1)), \dots, (R_{ns}(M, k_M) / \eta_{ns}(M, k_M))) \quad (7)$$

$$U_{ns}(\mathbf{B}_{ns}) = \sum_{m=1}^M u_{nms}(b_{nms}), \quad \forall n \in N, s \in S_n \quad (8)$$

$$u_{nms}(b_{nms}) = (e^{\eta_1 Q_{nms}(k_m) b_{nms}} - 1) - \eta_2 P_{nms}(k_m) b_{nms}, \quad m \in M, k_m \in K \quad (9)$$

通过累加各个网络的效用, 整个异构网络的效用函数可由式(7)计算可得; 网络 n 的第 s 个 BS/AP 的效用函数用式(8)来表达; 式(9)中 $u_{nms}(b_{nms})$ 右边的第一部分表示的是网络 n 的第 s 个 BS/AP 通过分配带宽资源 b_{nms} 给移动终端 m 而得到的收益函数, 其中, $Q_{nms}(k_m)$ 是为业务 k_m 分配带宽资源的收益因子; 式(9)中 $u_{nms}(b_{nms})$ 右边的第二部分表示的是移动终端 m 为得到带宽 b_{nms} 而付出的代价, 其中, $P_{nms}(k_m)$ 是为使用业务 k_m 而付出的代价因子; 此外, $\eta_1 \in [0, 1]$ 和 $\eta_2 \in [0, 1]$ 是效益系数, 用来调节收益和代价的比例。

从式(7)可以看出, 整个异构网络的效用函数是

$R_{ns}(m, k_m)$ ($\forall n \in N, s \in S_n, m \in M, k_m \in K$) 的函数，目标就是在总的传输速率 QoS 需求和网络容量的约束下，通过动态的调整不同网络中各个移动终端所支持业务的传输速率来得到最优的带宽重分配矩阵，来最大化整个异构网络的效用。

3.3 动态优化的迭代算法

在 3.1 节中的基于传输速率的优先级决策模型和 3.2 中的基于传输速率自适应的动态带宽分配算法的基础上，将自适应带宽重分配问题描述为一个优化问题，同时采用一个动态优化的迭代算法来得到最优的带宽重分配矩阵，以此来最大化整个异构网络的效用函数。

按照用户的传输速率需求分别将两类用户组 M_{ns1} 和 M_{ns2} ($\forall n \in N, s \in S_n$) 中的用户降序排列，按照网络中可用的带宽资源的数量将所有网络升序排列；可用的带宽资源优先分配给用户组 M_{ns1} 中的用户，满足本地用户组中用户的最大传输速率需求。所提的动态优化迭代算法中的动态优化因素体现在异构网络中负载的动态变化，用户通信环境和位置的动态变化，用户请求业务的动态变化以及分配的带宽资源的动态变化等方面，同时考虑到网络容量的限制条件，逐次执行动态优化迭代算法伪代码中的 if 条件满足时的传输速率动态调整指令，完成传输速率自适应的动态带宽分配过程。用户传输速率的升降级调整是带宽动态分配的实现方式，是动态优化步骤中的一个方面，其他的动态优化因素在下面动态优化迭代算法的伪代码的 if 条件中有明确的说明。

算法描述如下。

1) 首先从 3.1 节中得到传输的优先级；

2) **for** $n \in N = \{1, 2, \dots, N\}$ **do**

3) **for** $s \in S_n = \{1, 2, \dots, S_n\}$ **do**

4) **for** $k_m \in K = \{1, 2, \dots, K\}$ **do**

5) **if** $\sum_{m=1}^M (R_{ns}(m, k_m) / \eta_{ns}(m, k_m)) \ll C_n$ **then**

//网络 n 的第 s 个基站/接入点为移动终端 m 分配最大的带宽 $B_{k_{ms}}^{\max}$ 以满足其最大的传输速率 $R_{ns}^{\max}(m, k_m)$ ($m \in M_{ns}$)

6) **if** $m \in M_{ns1}$ **then**

$$R_{ns}^{\max}(m, k_m) = 1/2 \cdot R^{\max}(m, k_m) \cdot \eta_{ns}(m, k_m)$$

$$R_{ij}^{\max}(m, k_m) = 1/2 \cdot R^{\max}(m, k_m) \cdot C_n \cdot \eta_{ns}(m, k_m) /$$

$$(S_1^m C_1 + S_2^m C_2 + \dots + S_n^m C_n + \dots + S_N^m C_N) \quad i \neq n, j \neq s$$

7) **end if**

8) **if** $m \in M_{ns2}$ **then**

$$R_{ns}^{\max}(m, k_m) = R^{\max}(m, k_m) \cdot C_n \cdot \eta_{ns}(m, k_m) /$$

$$(S_1^m C_1 + S_2^m C_2 + \dots + S_n^m C_n + \dots + S_N^m C_N)$$

9) **end if**

10) **else if** $\sum_{m=1}^M (R_{ns}(m, k_m) / \eta_{ns}(m, k_m)) \approx C_n$ **then**

// $R(m, k_m)$ 将降级到 $R^{\min}(m, k_m)$ ($m \in M_{ns2}$)

11) **if** $m \in M_{ns1}$ **then**

$$R_{ns}^{\max}(m, k_m) = 1/2 \cdot R^{\max}(m, k_m) \cdot \eta_{ns}(m, k_m)$$

$$R_{ij}^{\max}(m, k_m) = 1/2 \cdot R^{\max}(m, k_m) \cdot C_n \cdot \eta_{ns}(m, k_m) /$$

$$(S_1^m C_1 + S_2^m C_2 + \dots + S_n^m C_n + \dots + S_N^m C_N) \quad i \neq n, j \neq s$$

12) **end if**

13) **if** $m \in M_{ns2}$ **then**

$$R_{ns}^{\min}(m, k_m) = R^{\min}(m, k_m) \cdot C_n \cdot \eta_{ns}(m, k_m) /$$

$$(S_1^m C_1 + S_2^m C_2 + \dots + S_n^m C_n + \dots + S_N^m C_N)$$

14) **end if**

15) **else**

// $R(m, k_m)$ 将降级到 $R^{\min}(m, k_m)$ ($m \in M_{ns}$)

16) **if** $m \in M_{ns1}$ **then**

$$R_{ns}^{\min}(m, k_m) = 1/2 \cdot R^{\min}(m, k_m) \cdot \eta_{ns}(m, k_m)$$

$$R_{ij}^{\min}(m, k_m) = 1/2 \cdot R^{\min}(m, k_m) \cdot C_n \cdot \eta_{ns}(m, k_m) /$$

$$(S_1^m C_1 + S_2^m C_2 + \dots + S_n^m C_n + \dots + S_N^m C_N) \quad i \neq n, j \neq s$$

17) **end if**

18) **if** $m \in M_{ns2}$ **then**

$$R_{ns}^{\min}(m, k_m) = R^{\min}(m, k_m) \cdot C_n \cdot \eta_{ns}(m, k_m) /$$

$$(S_1^m C_1 + S_2^m C_2 + \dots + S_n^m C_n + \dots + S_N^m C_N)$$

19) **end if**

20) **end if**

21) **end for**

22) **end for**

23) **end for**

在异构网络中通过上述动态优化的迭代算法自适应调节用户的传输速率，得到最优的带宽重分配矩阵来最大化整个异构网络的效用。

4 仿真与讨论

仿真所采用的异构网络场景由 IEEE 802.16e WMAN (N1, 网络 1)、3G 蜂窝网络 (N2, 网络 2) 和 IEEE 802.11b WLAN (N3, 网络 3) 等 3 个无线网络构成；移动终端是多模的，其配置多个无线空

中接口；在 3 个无线网络重叠覆盖区域内，具有多宿主功能的多模移动终端某一业务可有多个无线网络承载^[17]，如图 3 所示。 $R_{11}(m, k_m)$, $R_{21}(m, k_m)$ 和 $R_{31}(m, k_m)$ 分别表示移动终端 (UE) 在网络 1、网络 2 和网络 3 中的传输速率，同时假设移动终端 m 不在网络 n 的覆盖范围之内，则在此网络的传输速率为零。

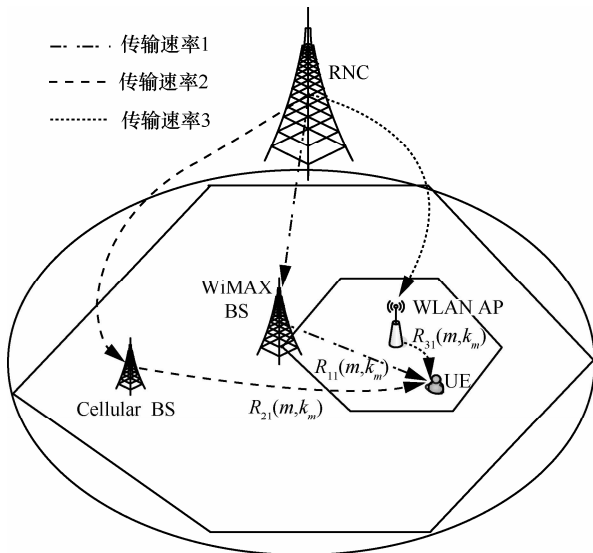


图 3 基于传输速率自适应的动态带宽分配算法的仿真场景

考虑多业务场景，业务参数及其传输优先级如表 2 所示。

业务 k	传输速率 QoS $R_{ns}(m, k_m)/(kbit \cdot s^{-1})$	传输的频谱效率 $\eta_{ns}(m, k_m)$	传输优先级
1	1 024	1.5 2 1	3
	512		
	256		
2	512	1.5 2 1	1
	256		
3	256	1 1 2	2

异构网络融合场景下的网络参数及其用户数列于表 3 中。

网络容量	网络容量取值/(Mbit·s ⁻¹)	网络中的用户数
C_1	20	40
C_2	2	3
C_3	15	0~60

根据所提出的基于传输速率自适应的动态带宽分配算法和动态优化的迭代算法，可以得到最优的带宽重分配矩阵式(10)来最大化异构网络的效用函数。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{111} & b_{121} & \cdots & b_{1m1} & \cdots & b_{1M1} \\ b_{211} & b_{221} & \cdots & b_{2m1} & \cdots & b_{2M1} \\ b_{311} & b_{321} & \cdots & b_{3m1} & \cdots & b_{3M1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

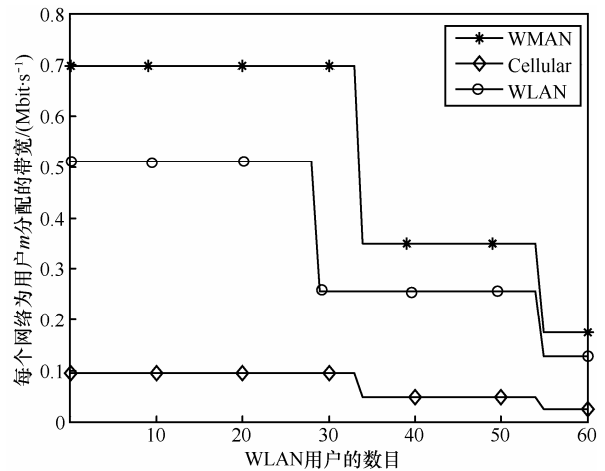


图 4 各个网络分配给用户 m 的带宽情况

对于支持表 2 中业务 1 的网络 3 中的本地用户 $m \in M_{311}$ 的带宽需求，式(10)中带宽重分配向量 $\mathbf{B}_m = [b_{1m1}, b_{2m1}, b_{3m1}]$ 将会随着 WLAN 中用户数的增加而动态的变化。图 4 给出了随着异构网络中 WLAN 中用户数的增加，各个网络分配给用户 m 的带宽变化情况。当 WLAN 中的用户数增加到 29 时，WLAN 分配给用户 m 的带宽将减少以支持其以较低的传输速率 256 kbit/s 传输业务 1，以空出带宽接纳新增加的呼叫；当 WLAN 中的用户数增加到 34 时，WLAN 达到网络容量，此时 WMAN 和蜂窝网络将降低对用户 m 的传输速率 QoS 需求，以空闲出带宽供 WLAN 新增加的用户使用；当 WLAN 中的用户数增加到 55 时，3 个网络将会进一步降低对用户 m 的传输速率 QoS 需求。

网络 n 的第 s 个 BS/AP 分配给所有移动终端的带宽分配向量表示为 $\mathbf{B}_{ns} = [b_{n1s}, b_{n2s}, \cdots, b_{nms}, \cdots, b_{nMs}]$ ，因而各个网络动态分配给所有用户的带宽由式 $\sum_{m=1}^M b_{nms}$ 计算可得，其中， $s=1, n=1, 2, 3$ 。图 5 给出了随着异构网络 WLAN 中用户数的不断增加，各个网络分配给所有用户(包括 M_{ns1} 和 M_{ns2})的带宽

变化情况；从图 5 中可以看出，各个网络通过逐步降低其用户的传输速率 QoS 需求，使得 WLAN 中用户可以有效共享整个异构网络中的带宽资源，以接纳更多的新呼叫到异构网络中。

各个网络新呼叫的阻塞概率定义为界限概率

$$p_{ns}^{NB} = P\{\sum_{m=1}^M b_{nms} > C_n\}$$

其中， $s=1, n=1, 2, 3$ 。图 6

是带宽重分配算法的异构网络新呼叫阻塞概率情况，是采用所提的动态带宽分配算法统计得到的新呼叫的阻塞概率，其中“不考虑带宽重分配”曲线是采用现有相应成果^[4]中的“按照所请求的业务类型进行固定带宽分配”所得到的新呼叫的阻塞概率情况，固定带宽分配算法由于没有考虑异构网络中的动态优化因素进行带宽的自适应分配调整，使得带宽利用效率较低，同时也阻塞较多新呼叫的接入。图 6 给出了整个异构网络总的新呼叫的阻塞概率随着 WLAN 中用户数的不断增加而变化的情况，从中可以看出，采用基于传输速率自适应的动态带宽分配算法后，异构网络总的新呼叫阻塞概率有了极大的降低，这是因为用户的传输速率能够与网络中带宽的占用情况相适应，并且各个网络通过逐步降低其用户的传输速率 QoS 需求，以空出带宽资源接纳更多的新呼叫，从而降低了总的新呼叫阻塞概率。同时可以看出，原来 WLAN 用户数超过 31 个后新呼叫的阻塞概率突增，但采用了所提的带宽重分配算法后，用户数超过 52 个后才出现新呼叫的阻塞概率突增，这样可以有效降低对新呼叫的阻塞，使得网络中新呼叫的接入数目增加了 67%。

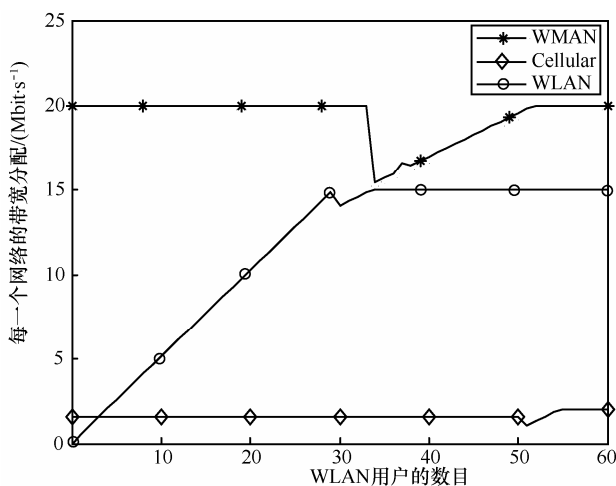


图 5 基于传输速率自适应的动态带宽分配算法的各个网络带宽分配情况

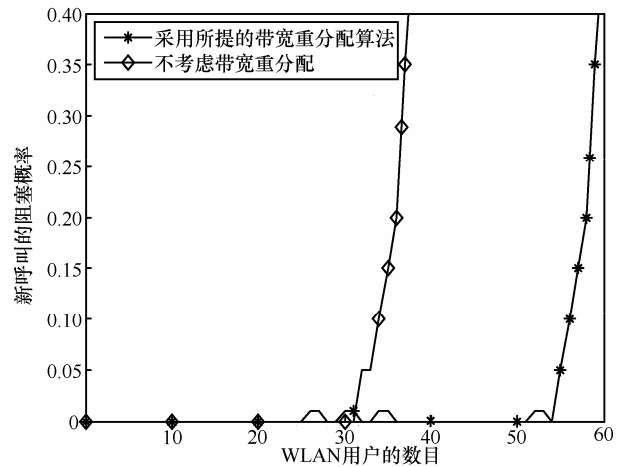


图 6 采用带宽重分配算法的异构网络新呼叫阻塞概率

5 结束语

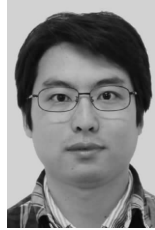
本文提出一种基于传输速率自适应的动态带宽分配算法，为异构网络中的多业务提供 QoS 保证。采用提出的基于传输速率优先级的决策模型，根据可用资源的变化情况自适应地调整用户的传输速率，得到最优的带宽重分配矩阵。当异构网络中可用的带宽资源充裕时，具有多宿主功能的移动终端能够采用较高的传输速率；反之，当异构网络中可用的带宽资源不足时，具有多宿主功能的移动终端将采用较低的传输速率。所提的动态带宽重分配算法的目标是在给定传输速率、QoS 需求和异构网络容量约束的条件下最大化效用函数。仿真结果表明，所提算法在满足传输速率 QoS 需求的基础上，能够最大化网络的效用函数并减小了新呼叫的阻塞概率。

参考文献：

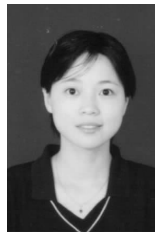
- [1] MAPP G, AIASH M, GUARDIA H C, *et al.* Exploring multi-homing issues in heterogeneous environments[A]. Proc 25th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA 2011)[C]. Biopolis, Singapore, 2011. 690-695.
- [2] CHEBROLU K, RAO R R. Bandwidth aggregation for real-time applications in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(4): 388-403.
- [3] ZHU K, NIYATO D, WANG P. Optimal bandwidth allocation with dynamic service selection in heterogeneous wireless networks[A]. Proc 2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GlobeCom 2010)[C]. Miami, FL, 2010. 1-5.
- [4] 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.

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] NIYATO D, HOSSAIN E. Bandwidth allocation in 4G heterogeneous wireless access networks: a noncooperative game theoretical approach[A]. Proc 2006 IEEE Global Telecommunications Conference (GlobeCom 2006)[C]. San Francisco, CA, 2006. 1-5.
- [8] NIYATO D, HOSSAIN E. A cooperative game framework for bandwidth allocation in 4G heterogeneous wireless networks[A]. Proc 2006 IEEE International Conference on Communications (ICC 2006)[C]. Istanbul, Turkey, 2006. 4357-4362.
- [9] ZHANG K, WANG Y, SHI C, *et al.* A non-cooperative game approach for bandwidth allocation in heterogeneous wireless networks[A]. Proc 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2011)[C]. San Francisco, CA, 2011. 1-5.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] DAMNJANOVIC A, MONTOJO J, CHO J, *et al.* UE's role in LTE advanced heterogeneous networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(2): 164-176.
- [15] SONG Q Y, JAMALIPOUR A. Quality of service provisioning in wireless LAN/UMTS integrated systems using analytic hierarchy process and grey relational analysis[A]. Proc 2004 IEEE Global Telecommunications Conference Workshops[C]. Dallas, Texas, 2004. 220-224.
- [16] GOLDSMITH A J, CHUA S G. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(10):1218-1230.
- [17] LUO J J, MUKERJEE R, DILLINGER M, *et al.* Investigation of radio resource scheduling in WLANs coupled with 3G cellular network[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(6): 108-115.

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, 主要研究方向为宽带移动通信、短距离无线通信与泛在网络等。