

基于社会福利最大化的柔性业务资源分配研究

严伟^{1,2,3}, 朱晓荣^{1,2}, 陈守宁¹, 邵世祥^{1,2}

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003;
3. 南京中新赛克科技有限责任公司, 江苏 南京 211153)

摘要: 对经济学方法在无线资源管理中的应用进行了研究, 考虑业务、用户、资源等多个域, 将无线资源分配看作生产-消费模型, 兼顾用户公平性原则, 针对不同业务的 QoS (quality of service) 要求采用不同的资源分配方法, 建立了基于社会福利最大化的资源分配模型。采用基于用户柔性业务的调度算法优化所提模型, 综合考虑用户效用、网络效益以及运营商收益, 实现了基于社会福利最大化的柔性业务资源分配。仿真结果验证了所提算法的优越性。

关键词: 经济学; 资源分配; QoS; 社会福利; 柔性业务; 用户效用

中图分类号: TN929.5

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2013)06-0165-09

Flexible service resource allocation model based on the maximization of social welfare

YAN Wei^{1,2,3}, ZHU Xiao-rong^{1,2}, CHEN Shou-ning¹, SHAO Shi-xiang^{1,2}

(1. College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
2. Wireless Communication Key Lab of Jiangsu Province, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
3. Nanjing Sinovatio Technology Limited Liability Company, Nanjing 211153, China)

Abstract: The application of economic principles in the management of the radio resource was studied. The allocation of radio resource was considered as a production-consumption model considering service, user, resource domain and taking the principle of the user fairness into account. Radio resource was allocated to different types of QoS users in different ways, and the model of resource allocation based on the maximization of social welfare was established. The scheduling algorithm based on flexible service was used to optimize the proposed model with considering the utility of the users, the benefits of the network and the incomes of the operators, so that the flexible service resource allocation based on the maximization of social welfare was established. The simulation results show the excellences of the proposed algorithm.

Key words: economics; resource allocation; QoS; social welfare; flexible service; user utility

1 引言

随着无线网络业务爆发式地增长以及人们对市场意识的增强, 研究人员逐步意识到无线网络资源管理不再是纯粹的工程技术问题, 技术方案的成功与否很大程度上取决于运营商和用户是否接受, 采用经济学概念和思想来研究无线网络几乎成为一种趋势。文献[1]使用一个经济模型来分析多媒体

通信系统中的用户满意度和不同的无线资源分配策略所产生的网络效用。文献[2]讨论了基于效用函数的网络资源分配与定价机制。但文献[1,2]未考虑到业务的 QoS 保证, 而文献[3]在 CDMA/WLAN 异构网络环境下提出一个基于网络收益的社会福利整体优化资源分配模型, 该模型考虑了系统的资源约束条件及用户的 QoS 要求, 但其侧重于网络效益, 文献[4]则偏重于运营商的收益。

收稿日期: 2012-04-17; 修回日期: 2013-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61001078, 61171093); 国家科技重大专项基金资助项目 (2012ZX03003011-005); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2012831)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61001078, 61171093); National Science and Technology Major Project (2012ZX03003011-005); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2012831)

采用经济学方法来研究无线网络资源的分配是一种新理念，通过经济学方法联合业务、用户、资源等多个域优化资源分配，宏观上提高无线网络资源利用率、增加运营商收益；微观上保证资源分配的公平性、提升用户体验感，其主要手段为价格杠杆作用的定价机制。无线网络中的定价机制可分为两大类^[5]：统一定价机制和基于参数的定价机制。统一定价机制不考虑网络负载、网络容量以及网络用户数量等变化情况，为每个会话设定一个固定价格（基于时间尺度），单一的价格难以调节运营商和用户间的多样性需求；而基于参数的定价机制综合考虑业务、用户、资源等多个域，兼顾用户对业务满意度以及运营商的收益，基于参数的定价机制相比统一定价机制具有灵活性、可信性以及自适应性。

本文采用经济学基本原理和方法来研究无线网络中的资源分配问题，联合考虑业务、用户、资源等多个域，将无线网络资源分配视作生产-消费模型，在生产-消费模型中引入用户效用、社会福利、公平性等经济学思想，建立了基于社会福利最大化的资源分配模型，动态地调整用户请求业务的 QoS 等级，综合考虑用户利益、网络效益以及运营商收益，实现了基于社会福利最大化的柔性 QoS 资源分配，并比较了基于用户业务等级的统一定价方案和基于参数的 QoS 定价方案对系统性能的影响。

2 多域无线资源管理体系

多域无线资源管理体系如图 1 所示。业务域对应着应用层，体现了未来无线网络业务的多样性需求；用户域对应着网络层，指出了业务数据在用户之间的传输网络，可以包含 OFDMA（orthogonal frequency division multiple access）、LTE（long term evolution）等无线网络；资源域对应着无线网络物理层，体现了网络的物理特性，主要体现为无线资源或技术，包括：码域资源（CDMA）、时域资源（TDMA）、频域资源（OFDM）、空域资源（MIMO）以及功率域资源（power）。

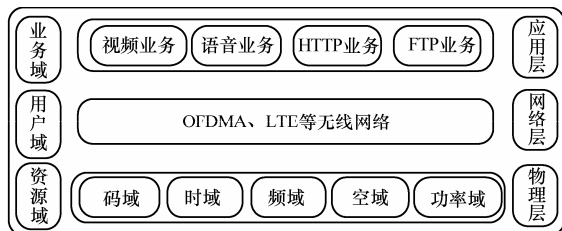


图 1 多域无线资源管理体系

2.1 业务域

如图 1 所示，业务域对应着多域无线资源管理体系的应用层，未来无线网络承载的业务必须要能够满足用户多样性的需求，不同业务对 QoS 的要求不同：误码率、时延、分组丢失率、数据传输速率。本文考虑 4 种业务并针对 QoS 要求划分了等级：QoS 要求越高，相应的等级越高；QoS 要求越低，相应的等级越低。业务 QoS 要求参数及类别、等级划分如表 1 所示。

表 1 4 种业务 QoS 要求参数及等级划分

业务类型	指标要求			
	误码率要求	时延界限	分组丢失率	传输速率
QoS 等级: 4 视频业务 (I 类)	10^{-4}	10 ms	1%	64 kbit/s
QoS 等级: 3 语音业务 (I 类)	10^{-3}	40 ms	1%	4.8 kbit/s
QoS 等级: 2 HTTP 业务 (II 类)	10^{-6}	N/A	N/A	14.5 kbit/s
QoS 等级: 1 FTP 业务 (II 类)	10^{-6}	N/A	N/A	88.9 kbit/s

N/A: 没有要求

2.2 用户域

如图 1 所示，用户域对应着多域无线资源管理体系的网络层，承载业务实际传输的可以是 OFDMA 网络，也可以是 LTE 网络，考虑瑞利衰落的无线信道，令加性高斯白噪声谱密度为 N_0 ，子信道带宽为 B ，平均发射功率为 \bar{P} ，SNR (signal to noise ratio) 的概率密度函数定义为

$$\phi(\gamma) = \gamma/(\bar{\gamma}/2) \exp(-\gamma^2/\bar{\gamma}), \gamma \geq 0 \quad (1)$$

其中， $\bar{\gamma}$ 为平均接收信噪比， $\bar{\gamma} = \bar{P} E\{\alpha^2\} / (N_0 B)$ ， $E\{\alpha^2\}$ 为瑞利衰落的平均路径增益， $\alpha^2 = 128.1 + 37.6 \lg(\psi)$ dB， ψ 为用户到基站的距离 (km)，假定阴影衰落恒定 8 dB。

用户域应当注重微观上资源分配的公平性。通过观察表 1 可知，I 类业务对时延有要求，其迫切程度与排队等待时间成正比；II 类对时延没有要求，其迫切程度与其到达时间成反比，且 I 类业务用户的迫切程度明显大于 II 类业务用户。考虑同类业务用户之间的公平性，令 V_i 表示用户 i 的优先级，每个用户下一帧要传输的数据按照 V_i 的值从大到小分别排队在 I 类业务缓冲区和 II 类业务缓冲区。请求 I 类业务的用户 i 的 V_i 定义为

$$V_i = Q_i / \exp(10^3 (D_i - \bar{\omega}_i)) \quad (2)$$

其中， Q_i 为用户请求业务的 QoS 等级， D_i 为用户 i 的时延界限， $\bar{\omega}_i$ 表示用户 i 的排队等待时间，当

$\overline{\omega}_i > D_i$ 时，用户当前的数据将会因超时而被丢弃。而请求 II 类业务用户 i 的优先级 V_i 定义为

$$V_i = Q_i / \exp(10^3 a_i) \quad (3)$$

其中， a_i 表示用户 i 的到达时间。

2.3 资源域

如图 1 所示，资源域对应着多域无线资源管理体系的物理层，即实际承载无线业务网络的物理层，资源域应当注重宏观上的无线网络资源利用率的提高。拟将无线网络资源分配看作生产-消费模型。在无线网络中生产资源包括码域、时域、频域、空域、功率域等域资源，生产者资源调度算法，生产函数表示一定资源的组合，可以产出一定 QoS 等级的业务；消费者为用户，消费函数表示用户根据其实际需求请求相应等级的业务。不同类型资源的适当组合可以生产出不同 QoS 等级的业务，通常无线网络资源包括码域资源 (CDMA)、时域资源 (TDMA)、频域资源 (OFDM)、空域资源 (MIMO)、功率域资源 (power) 等资源或技术，可以向多个用户提供多类数据传输业务：I 类业务和 II 类业务。基于生产-消费的资源域资源分配模型如图 2 所示。

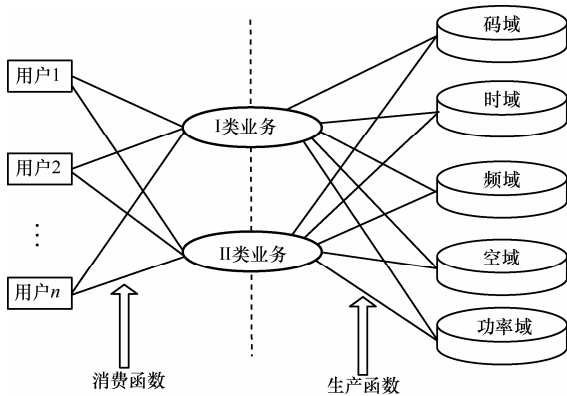


图 2 基于生产-消费的资源域资源分配模型

2.4 资源域生产-消费模型的经济意义

结合业务域的多样性需求以及资源域提出的生产-消费模型实现 QoS 资源分配，令 I、II 2 类业务的资源调度算法分别为 $Scheduling_I(\cdot)$ 和 $Scheduling_{II}(\cdot)$ ，用户 i 的效用函数定义为 $Utility_i(\cdot)$ ，运营商对用户 i 的收费为 m_i ，由于用户的多样性需求，可认为用户的需求是无限的。定义 I、II 2 类业务数据传输的生产函数分别为

$$\begin{aligned} & Scheduling_I(c_I, t_I, f_I, s_I, p_I) \\ & Scheduling_{II}(c_{II}, t_{II}, f_{II}, s_{II}, p_{II}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中， c_I 、 c_{II} 分别为网络为 I、II 类用户分配的码域资源的量； t_I 、 t_{II} 分别为 I、II 类用户分配的时域资源的量； f_I 、 f_{II} 分别为网络为 I、II 类用户分配的频域资源的量； s_I 、 s_{II} 分别为网络为 I、II 类用户分配的空域资源的量； p_I 、 p_{II} 分别为网络为 I、II 类用户分配的功率域资源的量。表示给定资源组合可以生产出的业务。假定用户总数为 I ，则用户的效用函数分别为

$$\begin{aligned} U_1 &= Utility_1(c_1, t_1, f_1, s_1, p_1, m_1) \\ U_2 &= Utility_2(c_2, t_2, f_2, s_2, p_2, m_2) \\ & \vdots \\ U_I &= Utility_I(c_I, t_I, f_I, s_I, p_I, m_I) \end{aligned} \quad (5)$$

其中， c_i 是网络为用户 i 分配的码域资源的量； t_i 为网络为用户 i 分配的时域资源的量； f_i 为网络为用户 i 分配的频域资源的量； s_i 为网络为用户 i 分配的空域资源的量； p_i 为网络为用户 i 分配的功率域资源的量。当生产函数与消费函数达到供求平衡时，资源域资源将得到充分利用，对于网络而言，有以下关系。

$$\begin{aligned} C_{total} &= c_I + c_{II} \\ T_{total} &= t_I + t_{II} \\ F_{total} &= f_I + f_{II} \\ S_{total} &= s_I + s_{II} \\ P_{total} &= p_I + p_{II} \end{aligned} \quad (6)$$

其中， C_{total} 为无线网络码域资源总量； T_{total} 为无线网络时域资源总量； F_{total} 为无线网络频域资源总量； S_{total} 为无线网络空域资源总量； P_{total} 为无线网络功率域资源总量。资源的配置达到高效率的生产组合，对于业务消费方-用户而言，有以下关系

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I c_i &= C_{total} \\ \sum_{i=1}^I t_i &= T_{total} \\ \sum_{i=1}^I f_i &= F_{total} \\ \sum_{i=1}^I s_i &= S_{total} \\ \sum_{i=1}^I p_i &= P_{total} \end{aligned} \quad (7)$$

资源的配置达到高效率的消费组合。在这种资源高效率组合的情况下，产出 I、II 2 类业务量所有可能的点组成一条生产可能性边界曲线，考虑请求 I 类业务用户的总效用 U_I 和请求 II 类业务用户

的总效用 U_{II} ，生产可能性边界上的每一点都对应一条效用可能性线，把所有这样的曲线绘制在同一直角坐标系下，其共同的边界就构成了效用可能性边界，如图 3 所示。

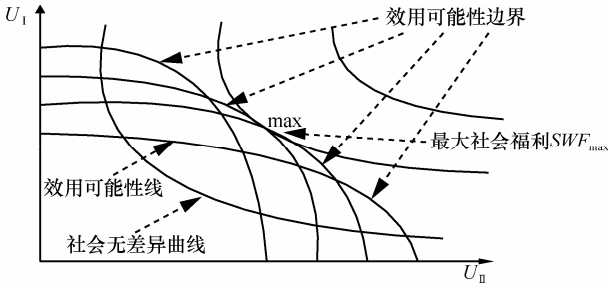


图 3 效用可能性边界以及社会福利

根据帕累托最优，在此高效率资源配置状态下， U_I (U_{II}) 值不可能增加，同时又不使 U_{II} (U_I) 降低，该边界上的任一点均代表一种高效率的生产和消费组合，此时网络资源得到充分利用。定义社会福利函数为

$$SWF = \psi_w(U_I, U_{II}) = \psi'_w(U_1, U_2, \dots, U_I) \quad (8)$$

将得到一组社会无差异曲线，在严格上凸递增函数条件下，其中，必有一条社会无差异曲线与效用可能性边界相切（图 3 中的 max 点），切点即最大社会福利点，这正是无线网络资源优化分配的目标，从而有：当且仅当社会福利函数 SWF 取得最大值时，无线网络系统性能才能达到效率和公平意义上的最优。

文献[6~10]分别对码域、时域、频域、空域以及功率域等资源分配技术进行了深入研究，取得了显著的效果，作者亦在文献[11]中采用 2 维马尔可夫无线信道模型、自适应调制技术、有效带宽理论以及有效容量理论对无线资源分配进行了一定研究，在此基础上，基于经济学的视角对无线网络资源分配进行研究，相对于经济学的视角，本文将文献[11]中的资源分配方法称为传统算法。

3 基于社会福利最大化的资源分配

3.1 定价

从经济学观点出发，运营商出售无线网络资源的使用权，用户按照其实际需求向运营商购买资源使用权，根据边际效用递减规律，用户需求曲线为一条随价格上升而递减的曲线，根据经济学观点，当需求大于供给时，可以抬高价格来抑制用户需求，减少需求量；当需求相对不足时，可以降低价

格以鼓励用户消费，刺激消费水平。可见，运营商通过价格杠杆引导用户消费行为，当无线网络的供给与需求取得平衡时，资源的使用率最佳。定价分为统一定价和基于参数的定价。

1) 常见的统一定价是基于时间尺度的固定价格，与用户占用的资源量没有关系，价格的变化无法达到调节网络资源供求的杠杆作用。基于用户业务等级的统一定价的价格函数定义为

$$m_i = \rho Q_i \quad (9)$$

其中，价格系数 ρ 为常数， Q_i 为用户享受业务的 QoS 等级。

2) 基于参数的 QoS 定价将运营商的收费与用户消耗的资源量相关联，将价格函数 $m_i = G(\cdot)$ 定义为

$$\begin{aligned} m_i &= G(c_i, t_i, f_i, s_i, p_i) \\ \forall p_i, s_i, t_i, c_i > 0, \partial G / \partial c_i &\geq 0 \\ \forall f_i, s_i, t_i, c_i > 0, \partial G / \partial t_i &\geq 0 \\ \forall f_i, p_i, t_i, c_i > 0, \partial G / \partial f_i &\geq 0 \\ \forall f_i, p_i, s_i, c_i > 0, \partial G / \partial s_i &\geq 0 \\ \forall f_i, p_i, s_i, t_i > 0, \partial G / \partial p_i &\geq 0 \end{aligned}$$

$$\partial G / \partial c_i + \partial G / \partial t_i + \partial G / \partial f_i + \partial G / \partial s_i + \partial G / \partial p_i \neq 0 \quad (10)$$

其中，参数组 $(c_i, t_i, f_i, s_i, p_i)$ 取决于用户所享受业务的 QoS 等级，由资源域针对 QoS 采取的资源分配算法决定，可针对不同无线网络的物理特性对价格函数参数进行调整以更好地调节网络状态，如对于频域资源比较宝贵的网络可以增大 $\partial G / \partial f_i$ 、对于空域资源比较宝贵的网络可以增大 $\partial G / \partial s_i$ 。QoS 定价是动态变化的，可充分发挥价格的杠杆调节作用以协调网络和网络、用户和网络之间的交互行为，引导用户消费，推动无线网络业务的应用创新。

3.2 用户效用

在经济学中，效用是对消费者通过消费或者享受闲暇等使自己的需求或欲望等得到满足的度量，经济学家用它来解释有理性的消费者如何把他们有限的资源分配在能给他们带来最大满足的商品上^[12]。相关重要的经济学原理为边际效益递减原理，指消费者在消费物品时，每一单位物品对消费者的效用是不同的，它们呈递减关系。用户效用是对用户在接受运营商服务并支付一定货币后的满足感的度量，因此，用户效用值取决于用户享受到业务的 QoS 等级 Q_i 以及支付的费用 m_i 。 Q_i 值越大， m_i 值越小，效用函数 $u_i(m_i, Q_i)$ 的值越大， $u_i(m_i, Q_i)$ 满足数学关系式

$$\begin{aligned} \partial u_i(m_i, Q_i) / \partial Q_i &\geq 0, \partial u_i(m_i, Q_i) / \partial m_i \leq 0 \\ \forall m_i > 0, \lim_{Q_i \rightarrow 0} u_i(m_i, Q_i) &= 0, \lim_{Q_i \rightarrow \infty} u_i(m_i, Q_i) = 1 \\ \forall Q_i > 0, \lim_{m_i \rightarrow 0} u_i(m_i, Q_i) &= 1, \lim_{m_i \rightarrow \infty} u_i(m_i, Q_i) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

由式(14)的性质可推导出用户效用函数的一种特殊形式

$$u_i(m_i, Q_i) = 1 - \exp(-\chi_1 Q_i^{\chi_2} m_i^{-\chi_3}) \quad (12)$$

其中, χ_1, χ_2, χ_3 均为正常数。在生产-消费模型中结合业务 QoS 保证考虑运营商的定价收费情况, 用户会根据其 QoS 满足情况以及收费情况给出一个评价, 用效用函数值表征, 为用户的选择提供理性支持。效用函数值越大, 意味着用户越满足; 效用函数值越小, 意味着用户满足感越低。

3.3 基于社会福利最大化的资源分配模型

在经济学中, 社会福利最大化是比用户总效用最大化更加宽泛的概念, 后者可以看作是前者的一种特殊形式, 社会福利函数是社会福利水平与所有成员的效用水平之间的关系, 它表明一个社会对效率与公平双重目标的偏好。一般形式的功利主义社会福利函数: $SWF = \sum_i w_i U_i$, 其中, w_i 为用户 i 的加权系数, U_i 为用户 i 的效用。一般形式的功利主义认为不同成员的单位效用的重要性有所不同, 社会福利函数取决于所有用户的加权效用和, 更加注重分配的公平性, 能更好起到调节分配作用。

相关重要的经济学原理为帕累托改善和帕累托最优, 假定固有的一群人和可分配的资源, 帕累托改善是指从一种分配状态到另一种分配状态的改变, 没有使任何人情况变坏而使得至少一个人变得更好; 帕累托最优是资源分配的一种理想状态, 帕累托最优的状态是指不可能再有更多的帕累托改善的状态, 即在不使任何人境况变坏的情况下, 而不可能再使某些人的处境变好。根据帕累托改善和帕累托最优, 资源分配问题可转化为以最大化社会福利为目标, 以稀缺资源为约束条件的优化问题。一般形式的功利主义社会福利表示为 $\sum_{i=1}^N w_i u_i(m_i, Q_i)$, 其中, $m_i = G(c_i, t_i, f_i, s_i, p_i)$, w_i 为用户 i 的加权系数, 考虑到不同等级 QoS 业务对系统性能的影响, 可令用户 i 的加权系数 $w_i = Q_i$, 则基于社会福利最大化的通用资源分配模型的优化目标为

$$\max \sum_{i=1}^N w_i u_i(m_i, Q_i)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N c_i &\leq C_{\text{total}}; \sum_{i=1}^N t_i \leq T_{\text{total}}; \\ \sum_{i=1}^N f_i &\leq F_{\text{total}}; \sum_{i=1}^N s_i \leq S_{\text{total}}; \sum_{i=1}^N p_i \leq P_{\text{total}} \end{aligned} \quad (13)$$

3.4 柔性业务

柔性业务的定义为用户在业务选择时具有一定弹性且由其效用提供理性支持。1) 运营商为用户分配业务的 QoS 等级不得低于用户请求业务的 QoS 等级但必须是同类的, 即运营商只能为请求视频业务的用户分配 $Q_i = 4$ 的业务, 可为请求语音业务的用户分配 $Q_i = 4$ 或 $Q_i = 3$ 的业务; 运营商只能为请求 HTTP 业务的用户分配 $Q_i = 2$ 的业务, 可为请求语音业务的用户分配 $Q_i = 2$ 或 $Q_i = 1$ 的业务, 意味着柔性业务调整的对象为语音业务用户和 FTP 业务用户。2) 若为请求 II 类业务的用户分配 I 类业务, 将耗费较多的资源, 根据用户效用函数的定义, 在 II 类业务用户的需求基本得到满足时, 分配更多资源将会给其带来更多的经济负担, 不仅效用值会减小, 更是一种资源的不合理配置。3) 用户在业务选择中是由效用函数提供理性支持的, 在不同业务选择时用户将选择效用值较大的。针对语音业务和 FTP 业务的柔性业务调整算法如下。

1) 根据上文资源域资源分配算法为用户 i 分配资源, 这样便可确定为用户 i 分配的资源量 $(c_i, t_i, f_i, s_i, p_i)$, 价格 m_i 以及用户效用值 $u_i(m_i, Q_i)$ 。

2) 将语音业务用户 i 的 QoS 等级由 $Q_i = 3$ 调整为 $Q_i = 4$ 或 FTP 业务用户 i 的 QoS 等级由 $Q_i = 1$ 调整为 $Q_i = 2$, 同样根据上文资源域资源分配算法为用户 i 分配资源, 这样便可确定为用户 i 重新分配的资源量 $(c_i, t_i, f_i, s_i, p_i)$, 价格 m_i' 以及用户效用值 $u_i'(m_i, Q_i)$ 。

3) 若 $u_i'(m_i, Q_i) \geq u_i(m_i, Q_i)$, 表明提高业务 QoS 等级所带来的感受提高能够补偿所需附加资源引起费用增加的不快, 则用户 i 将会接受 QoS 等级调整; 否则, 用户 i 拒绝调整。

3.5 基于柔性业务的调度算法

拟采用基于柔性业务调整的调度算法来优化上述基于社会福利最大化的资源分配模型, 动态地调整用户业务的 QoS 等级, 最大化社会福利, 由于该调度算法是在保证当前用户数据传输的基础上进行的, 只是对其 QoS 要求进行合理调整, 因此不会对系统吞吐量造成影响。作者已在文献[11]中验证了 I

类业务 QoS 的保证对于整个无线网络延时、分组丢失等性能的影响, 由于 I 类业务的实时性要求, 本文对于处理 I 类业务有一定侧重性。调度流程如下。

令集合 Π_1 表示 I 类业务的用户的优先级排队, 其中, 包含: 误码率 BER_i 、时延界限 D_i 、分组丢失率 ε_i 、传输速率 v_i 等数据; 令集合 Π_2 表示 II 类业务的用户的优先级排队, 其中, 包含误码率 BER_i 、传输速率 v_i 等数据。假定当前为帧 $t-1$ 的调度, 帧 t 要传输的数据按用户公平性原则分别排队在 I、II 类业务的缓冲区。

step1 预调度。

1) 检查集合 Π_1 , 若不为空, 则根据 I 类业务用户的资源分配方法, 为该类用户分配满足 QoS 要求的资源量, 从而确定用户 i 分配的资源量 $(c_i, t_i, f_i, s_i, p_i)$, 价格 m_i 以及用户效用值 $u_i(m_i, Q_i)$ 。未被服务的实时用户仍在集合 Π_1 中等待下一帧的调度, 转 2);

2) 检查是否有剩余的资源以及集合 Π_2 是否为空, 若这 2 个条件同时为真, 则根据 II 类业务用户的资源分配方法, 为该类用户分配满足 QoS 要求的资源量, 确定为用户 i 分配的资源量 $(c_i, t_i, f_i, s_i, p_i)$, 价格 m_i 以及用户效用值 $u_i(m_i, Q_i)$ 。未被服务的实时用户仍在集合 Π_2 中等待下一帧的调度, 转 3);

3) 若集合 Π_1 、 Π_2 均为空, 转 step3; 否则, 转 step2。

step2 基于用户柔性业务的优化调度。

以参数 $index$ 标识优化次数, 令 $index = 0$ 。当前帧请求语音业务用户的数目为 $NumVoice$, 请求 FTP 业务用户的数目为 $NumFTP$ 。

1) 检查条件: 是否有剩余的资源。若检查条件为真, 则 $index = index + 1$, 并判断: 若 $index \leq NumVoice$, 转 2); 若 $NumVoice < index \leq NumVoice + NumFTP$, 转 3)。若检查条件为假或 $index > NumVoice + NumFTP$, 转 step3。

2) 将第 $index$ 个语音业务用户的 QoS 等级由 $Q_{index} = 3$ 调整为 $Q_{index} = 4$, 根据 I 类业务用户的资源分配方法为该用户分配资源, 确定为用户 i 新分配的资源量 $(c_i, t_i, f_i, s_i, p_i)$, 价格 m_i 以及用户效用值 $u_i(m_i, Q_i)$, 若 $u_i(m_i, Q) \geq u_i(m_i, Q)$, 则该用户将接受柔性业务调整; 否则, 该用户拒绝调整, 转 1)。

3) 将第 $index - NumVoice$ 个 FTP 业务用户的 QoS 等级由 $Q_{index} = 1$ 调整为 $Q_{index} = 2$, 根据 II 类业

务用户的资源分配方法为该用户分配资源, 确定为用户 i 新分配的资源量 $(c_i, t_i, f_i, s_i, p_i)$, 价格 m_i 以及用户效用值 $u_i(m_i, Q_i)$, 若 $u_i(m_i, Q) \geq u_i(m_i, Q)$, 则该用户将接受柔性业务调整; 否则, 该用户拒绝调整, 转 1)。

step3 调度准备。

等待帧 t 的调度; 更新缓冲区集合 Π_1 、 Π_2 , 为帧 $t+1$ 的调度做准备, 转 step1。

4 仿真结果与分析

本文以 MIMO-OFDMA 系统下行链路为例进行仿真分析, 系统参数参考文献[9], 仿真参数设定如表 2 所示, 业务密度定义为系统所有用户总的平均到达速率与系统最大传输速率之比, 业务密度取值点分别为: 0.15、0.3、0.45、0.6、0.75、0.9, 分别对应每种业务用户数: 20、40、60、80、100、120。为方便展示本文算法优越性, QoS 定价方案以系统资源块对应单位价格, 即令 QoS 价格函数 $m_i = k_i$; 统一定价方案 1、2 分别取 $\rho = 5$ 、 $\rho = 9$; 用户效用函数的参数取值为 $\chi_1 = \frac{1}{100}$, $\chi_2 = 8$, $\chi_3 = 2$ 。仿真结果如图 4~图 8 所示, 比较了本文所提算法和文献[11]中传统算法(只针对业务 QoS 保证而未引入经济学方法)的性能。

表 2 MIMO-OFDMA 系统下行链路仿真参数

参数	值
小区半径	1.6 km
帧周期	5 ms
系统带宽	5 MHz
子信道数	8
数据子载波数	384
子载波频宽	10.937 5 kHz
下行链路每帧时隙数	24
基站最大功率	43 dBm
基站发射/接收天线数	2/2
白噪声功率	-174 dBm/Hz

图 4 为 I 类业务用户社会福利在不同定价方案下本文算法与传统算法的比较, 采用统一定价方案 1、QoS 定价方案和统一定价方案 2 时传统算法下的 I 类业务用户社会福利值随着用户数成倍增长; 而采用统一定价方案 1、QoS 定价方案和统一定价方案

2 时本文资源分配算法下的 I 类业务用户社会福利，由于网络用户数目增大趋于系统饱和，故其值随着用户数增长但增长速度降缓，QoS 定价方案和价格系数较小的统一定价方案 1 下的曲线接近，但明显高于价格系数较大的统一定价方案 2 下的曲线，验证了价格越低，用户效用值越大，相应地社会福利也大；明显地，3 种定价方案下本文算法均优于传统算法。图 5 为本文算法与传统算法在不同定价方案下全部用户总社会福利的比较，包含采用统一定价方案 1、QoS 定价方案和统一定价方案 2 时传统算法下的总社会福利与采用统一定价方案 1、QoS 定价方案和统一定价方案 2 时本文资源分配算法下的总社会福利比较，图 5 曲线性能与图 4 相似，但本文算法在 QoS 定价方案下的曲线超过了价格系数较小的统一定价方案 1 下的曲线，验证了 II 类业务用户 QoS 要求较低，对网络资源需求量较小，从而价格较低，使得 II 类业务用户效用值较大，QoS 定价方案相对价格系数较小的统一定价方案 1 更能发挥价格的杠杆调节作用以引导用户消费。综上所述，本文算法下的性能曲线优于传统算法下的性能曲线，一定程度上体现了 QoS 定价方案以及本文算法的优越性。

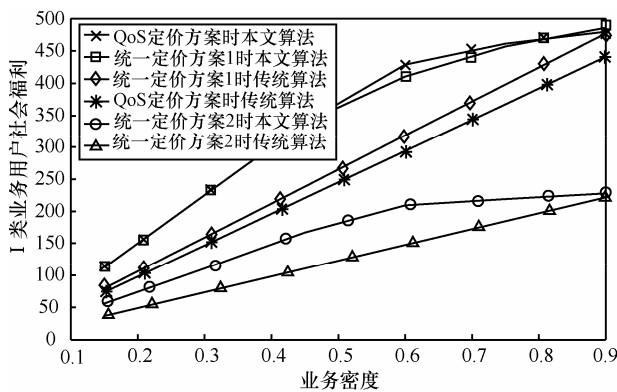


图 4 I 类业务用户社会福利比较

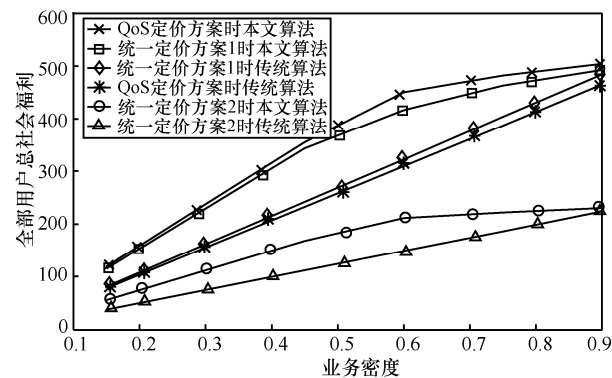


图 5 全部用户总社会福利比较

图 6 为本文算法与传统算法下功率域资源利用率的比较，功率利用率随着用户数增加上升，且在用户数较多时的增长速度相对用户数较少时的增长速度有所下降，采用统一定价方案 1、QoS 定价方案和统一定价方案 2 时传统算法下的功率利用率与采用统一定价方案 1、QoS 定价方案和统一定价方案 2 时本文算法下的功率利用率相比较表明，QoS 定价方案和价格系数较大的统一定价方案 2 下的曲线接近，但明显高于价格系数较小的统一定价方案 1 下的曲线，验证了价格提高抑制用户无限制的消费从而提升功率域资源利用率；同样明显地，3 种定价方案下本文算法均优于传统算法。图 7 为本文算法与传统算法下子频域资源利用率的比较，频域资源利用率随着用户数增加上升，在用户数较多时的增长速度相对用户数较少时的增长速度也有所下降，图 7 显示了与图 6 相似的性质。图 6 和图 7 显示了 QoS 定价方案下本文算法性能曲线略高于统一定价方案 1、方案 2 下本文算法性能曲线，再一次验证了 QoS 定价的优越性，只有将定价与用户消费的资源量联系起来，才能更好地发挥资源分配中经济学方法的优势，更好地使得定价发挥其价格杠杆的调节作用。结合图 4 和图 5 表明，QoS 定价能够起到价格系数较小的统一定价方案 1 下最大化社会福利的作用，同时也能起到价格系数较大的统一定价方案 2 提升无线网络资源利用率的作用，并再一次体现了经济学方法在无线网络资源分配研究中应用的优越性。

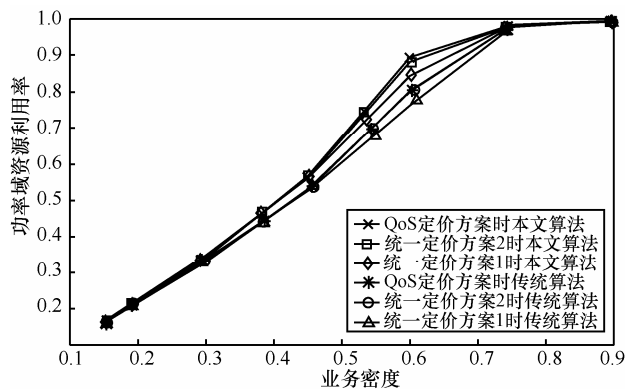


图 6 功率域资源利用率比较

图 8 为本文算法与传统算法下运营商收益的比较，运营商的收益随着用户数增加而增加，采用统一定价方案 1、QoS 定价方案和统一定价方案 2 时传统算法下的运营商的收益与采用统一定

价方案 1、QoS 定价方案和统一定价方案 2 时本文算法下的运营商收益相比较表明, QoS 定价方案下的运营商收益曲线和价格系数较大的统一定价方案 2 下的运营商收益曲线接近, 但明显高于价格系数较小的统一定价方案 1 下的运营商收益曲线; 明显地, 3 种定价方案下本文算法均优于传统算法。

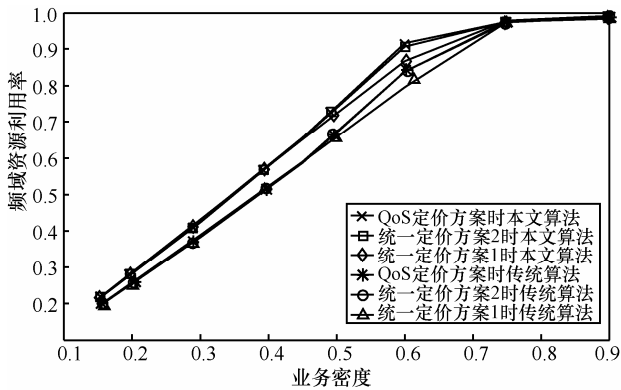


图 7 频域资源利用率比较

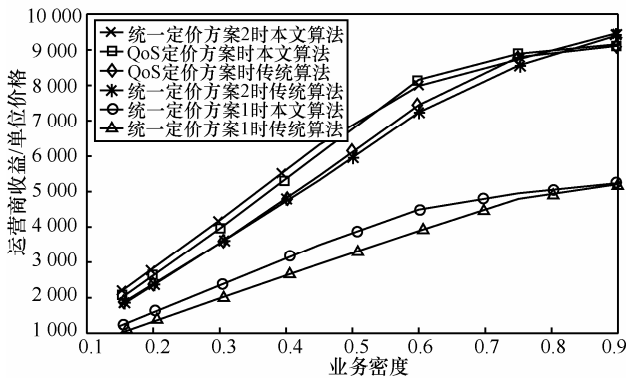


图 8 运营商收益比较

结合仿真图 4~图 8 理论分析可知, 统一定价在一定范围内的价格上升会使得运营商的收益增加, 但高价格会抑制用户消费, 一旦超过一定范围, 将导致很少或是没有用户消费; 高的价格会使得用户的效用降低从而社会福利水平不高; 但高的价格会调节用户无限度的消费, 提升无线网络资源利用率。相比较之下, QoS 定价将价格与用户消费的资源量联系起来, 充分发挥价格杠杆作用, 既能起到价格系数较小的统一定价方案 1 下最大化社会福利的作用, 同时也能起到价格系数较大的统一定价方案 2 提升无线网络资源利用率的作用, 以达到提高社会福利水平、提升无线网络资源利用率、增加运营商收益的效果。通过比较本文算法与文献[11]所

提传统算法, 充分体现了将经济学方法引入到无线网络资源分配中的优越性, 尽管以一定的复杂度为代价, 相信也是很有意义的。

5 结束语

本文运用了经济学原理和方法研究无线网络资源分配, 联合业务、用户、资源等多个域, 建立了基于社会福利最大化的资源分配模型, 基于用户柔性业务动态地调整用户业务的 QoS 等级, 综合考虑用户效用、网络效益以及运营商收益, 实现了无线网络中基于社会福利最大化的柔性业务资源分配, 同时发挥出定价机制在无线网络资源分配中多方面的作用: 1) 作为一种控制信号, 动态调整用户业务 QoS 等级, 最大化社会福利; 2) 作为一种经济信号, 引导用户消费行为, 提高运营商收益; 3) 作为一种优化信号, 实现基于柔性业务的调度, 提升无线网络资源利用率。

参考文献:

- [1] LEONARDO B, MAGNUS L, JENS Z. An economic model for the radio resource management in multimedia wireless systems[J]. Computer Communications, 2004, 27(11): 1056-1064.
- [2] MARBACH P, BERRY R. Downlink resource allocation and pricing for wireless networks[A]. IEEE INFOCOM 2002[C]. New York, USA, 2002. 1470-1479.
- [3] PEI X B, JIANG T, QU D M, et al. Radio-resource management and access-control mechanism based on a novel economical model in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 3047-3056.
- [4] ZHANG F, VERMA P K, CHENG S. Pricing, resource allocation and quality of service in multi-class networks with competitive market model[J]. IET Communications, 2011, 5(1): 51-60.
- [5] GIZELIS C A, VERGADOS D D. A survey of pricing schemes in wireless networks[J]. IEEE Communications on Survey & Tutorials, 2011, 13(1): 126-145.
- [6] HARA S, PRASED R. Overview of multicarrier CDMA[J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(12):126-133.
- [7] IKEDA T, SAMPEI S, MORINAGA N. TDMA-based adaptive modulation with dynamic channel assignment for high-capacity communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(2):404-412.
- [8] SUN Y. Bandwidth-efficient wireless OFDM[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(11):2267-2278.
- [9] YEN C, CHANG C, WANG L. A utility-based TMCR scheduling scheme for downlink multi-user MIMO-OFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(8):4105-4115.

[10] GOLDSMITH A J, CHUA S. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(10):1218-1230.

[11] 严伟, 朱晓荣, 邵世祥. 下行多业务 OFDMA 系统中基于有效容量的资源分配算法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(9): 2236- 2240.

YAN W, ZHU X R, SHAO S X. Research on resource allocation algorithm based on effective capacity for downlink multi-service OFDMA systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(9):2236-2240.

[12] SAMUELSON B, NORDHAUS W. 经济学[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.

SAMUELSON B, NORDHAUS W. Economics[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2004.

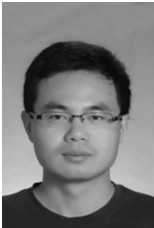


朱晓荣 (1977-), 女, 山东临沂人, 南京邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为泛在无线网络、异构网络、无线传感器网络、认知无线网络等无线资源管理、跨层优化算法及协议设计、性能评估及建模分析。



陈守宁 (1987-), 男, 江苏徐州人, 南京邮电大学博士生, 主要研究方向为多媒体通信与多媒体信号处理。

作者简介:



严伟 (1988-), 男, 江苏南通人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为宽带无线资源管理。



邵世祥[通信作者] (1954-), 男, 浙江宁波人, 南京邮电大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信与认知无线电理论。E-mail: shaosx@njupt.edu.cn。