



基于定价机制的卫星网络虚拟资源共享分配策略

刘治国^{a,b}, 张江梅^{a,b}, 金滕滕^{a,b}, 栾帅帅^{a,b}, 丁元明^{a,b}

(大连大学 a. 通信与网络重点实验室; b. 信息工程学院, 辽宁 大连 116622)

摘 要: 针对卫星通信网络规模不断扩大而卫星资源总量受限导致卫星通信资源紧缺的情况, 提出一种基于定价机制的虚拟资源共享分配策略。根据微观经济学理论中边际成本的思想建立用户成本的分段函数模型, 通过模型求解得出用户请求的总成本并将其上传至资源分配模块, 结合定价机制达到资源利用的最大化和用户请求成本的最小化。仿真结果表明, 该策略能提高卫星网络资源利用率及分配公平性, 最大限度地实现资源的潜在价值。

关键词: 资源分配; 资源利用率; 占优资源; 公平性; 定价机制

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 刘治国, 张江梅, 金滕滕, 等. 基于定价机制的卫星网络虚拟资源共享分配策略[J]. 计算机工程, 2019, 45(12): 64-70.

英文引用格式: LIU Zhiguo, ZHANG Jiangmei, JIN Mengmeng, et al. Virtual resource sharing and allocation strategy for satellite network based on pricing mechanism[J]. Computer Engineering, 2019, 45(12): 64-70.

Virtual Resource Sharing and Allocation Strategy for Satellite Network Based on Pricing Mechanism

LIU Zhiguo^{a,b}, ZHANG Jiangmei^{a,b}, JIN Mengmeng^{a,b}, LUAN Shuaishuai^{a,b}, DING Yuanming^{a,b}

(a. Key Laboratory of Communication and Network; b. School of Information Engineering, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China)

[Abstract] The conflict between scaling satellite communication network and limited resources for satellites has led to communication resource shortage. To address the problem, this paper proposes a virtual resource sharing and allocation strategy based on a pricing mechanism. The strategy builds a piecewise function model of user costs based on the perception of marginal cost in microeconomics. The total cost of user requests is obtained by the model, and uploaded to the resource allocation module. On this basis, the strategy introduces the pricing mechanism to maximize resource utilization and minimize user request costs. Simulation results show that the proposed strategy can improve the resource utilization rate and allocation fairness for satellite network, making the most of potential value of resources.

[Key words] resource allocation; resource utilization rate; dominant resource; fairness; pricing mechanism

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0053219

0 概述

随着卫星通信网络规模的增大, 卫星网络上的通信业务除了在数量上持续增长, 其构成也沿着多样化方向演进^[1-3]。传统资源分配方法注重带宽、速率、功率、延时以及资源分配的公平性、QoS、单位时间内的资源使用率等指标^[4-6]。在当前业务种类与需求均越来越多的情况下, 目前有限的卫星网络资源和传统的资源分配策略已不能适应卫星网络中资源分配的需求^[7-9]。一方面, 网络资源的总需求远超网络资源的供给, 而企图超量供给卫星网络资源并不现实, 因此

卫星网络资源已成为一种稀缺资源。另一方面, 在不同业务与不同用户之间对网络资源的需求存在较大差异, 这意味着均分有限的卫星网络资源不能实现资源的高效利用。

如何高效合理地分配稀缺的卫星网络资源, 从而最大限度地利用资源的潜在价值成为亟需解决的问题。文献[10]将网络资源看成市场资源, 采用市场配置, 应用经济学上的效用和需求理论, 并使用基于市场机制的经济效率方法获得有限的最优解。文献[11]结合资源分配策略和经济学模型, 针对异构无线网络资源管理问题, 提出一种既满足网络运营

基金项目: 国防预研基金。

作者简介: 刘治国(1974—), 男, 教授、博士, 主研方向为卫星网络; 张江梅、金滕滕、栾帅帅, 硕士研究生; 丁元明, 教授、博士。

收稿日期: 2018-11-23 修回日期: 2018-12-29 E-mail: liuzhiguo_dldx@163.com

商又满足用户最大效用的无线网络定价和资源分配方案,通过设置效用函数及其满足的条件,最终得到参与者的最优策略和子博弈完美纳什均衡。针对军事卫星通信业务量大且用户对服务质量要求严格的问题,文献[12]提出一种基于定价机制的资源分配策略,通过建立合理的价格函数,将价格及带宽的使用情况动态反馈给用户和网络管理系统。文献[13]提出一种基于定价的多单元多跳 OFDM 无线网络光谱资源共享及分配算法,该算法可以有效提升光谱资源分配效率,提高光谱利用率,并通过仿真验证了该算法在增加网络吞吐量和提升资源共享率方面的优越性。文献[14]提出一个动态的定价策略,通过该策略资源提供方可改变价格,增加销售资源的可能性和获得更大的收益,实验结果表明,该策略具有较高的资源利用率、较短的完成时间和较低的成本。

目前,针对资源分配策略和市场评价机制相结合的研究大多集中在云计算和虚拟机的资源分配方面^[15-17],而关于卫星网络资源的研究较少。为解决现阶段卫星网络资源日渐稀缺而通信业务不断增加所导致的问题,本文提出一种基于定价机制的虚拟资源共享分配策略,实现卫星网络资源的高效利用。

1 定价机制

1.1 定价问题描述

定价是资源分配的一个关键问题,价格需要根据需求在不同时刻进行动态更新。当资源处于紧缺状态或者有大量用户请求时,为了能够及时反映资源的状态,价格必然要有较快的更新频率,但是,如果价格频繁的变动会导致系统的计算量变得非常复杂,从而增加系统的开销。因此,在资源分配的过程中,需要找到合理的定价方法,对资源分配中遇到的问题进行折中处理,需要注意以下问题:

1) 定价的公平性

在卫星网络的资源分配中,用户请求都会以某种特定的形式对资源有一定的需求,但是对于不同的用户请求,使用相同的资源会产生不同的价值,因此,不能将资源的平等分配作为衡量公平性的唯一准则,本文将用户请求的整体收益最大作为衡量公平性的标准。

2) 价格对供求关系的影响

在资源分配过程中,资源价格会影响用户请求对资源的使用情况。因此,使用定价机制对资源分配进行调节,使用户请求寻找价格与资源之间的最佳契合点,实现资源与用户之间的最优配置的同时,获得系统的最大收益。

3) 价格对服务质量的影响

资源价格在一定程度上体现了服务质量,但是对于一些价格低的资源而言,其利用率会相对较低,

但为了整体的收益和资源的整体利用率,需要找到一个平衡点,可以使一些用户使用价格相对较低的资源,既满足了用户对资源的需求,又提高了资源的利用率,同时增加了系统整体收益。

1.2 定价规则

本节所述的定价规则是针对用户,因为用户对需求资源的竞价会影响到资源分配的顺序和结果,只有通过合理的报价才能使市场机制发挥作用。因此,用户请求的报价在资源分配过程中是一个比较重要的环节,需要对其进行详细研究。

在本文中,假设共有 M 种卫星资源, N 个用户请求,每一种卫星资源包含资源的数量和类型不一定相同,每个用户也可能包含多个业务,每个业务需要的资源也不尽相同。根据用户请求成本最小的原则,建立用户成本的分段函数模型。

假设用户请求在某一时刻 t 的价格由 t 时刻系统资源决定,线性价格函数一般不能很好地反映系统中的业务量,在资源紧缺的情况下,价格会随着业务量的增多而改变,为此,需要建立如下模型:

$$p_i^j(t) = \begin{cases} p_{\text{base}}^j, l^j(t) \leq f^j \\ p_{\text{base}}^j \times \left(\frac{C^j - f^j}{C^j - l^j(t)} \right)^{n^j}, f^j < l^j(t) < C^j \end{cases} \quad (1)$$

其中, j 表示资源的种类, $p_i^j(t)$ 是一个分段函数,表示对于资源 j , 用户 i 在 t 时刻使用该资源时所能负担的价格,即 t 时刻用户 i 的报价, f^j 表示资源 j 的最大值, $l^j(t)$ 表示 t 时刻对资源 j 的使用量。当用户 i 对资源 j 的使用量超过该类型资源中资源 j 的最大值时,即 $l^j(t) > f^j$ 时,用户对资源的报价将会以双曲线的形式上升;当用户 i 对资源 j 的使用量低于该类型资源中资源 j 的最大值时,即 $l^j(t) < f^j$ 时,用户价格保持基本价格不变,即 p_{base}^j 。 C^j 表示所有资源中资源 j 的总量, n^j 表示价格的增长系数 ($n^j \geq 1$)。

令 p_{total} 表示所有用户请求对所需资源的总报价:

$$p_{\text{total}} = \sum_i \sum_j p_i^j(t) = \sum_j \sum_g p_{\text{base}}^j + \sum_j \sum_k p_{\text{base}}^j \times \left(\frac{C^j - f^j}{C^j - l^j(t)} \right) \quad (2)$$

其中, $\sum_j \sum_g p_{\text{base}}^j$ 表示所有用户需要的资源未超过资源 j 的最大值时的价格总和, $\sum_j \sum_k p_{\text{base}}^j \times \left(\frac{C^j - f^j}{C^j - l^j(t)} \right)$ 表示用户所需的资源 j 超过最大值时所需付出的代价总和,通常,用户报价包括以上两部分。对于用户的第二部分报价,在微观经济学理论中,叫做边际成本,可以使经济效益最大化,在一般情况下,边际成本的计算主要分为两种情况:趋于 0 的情况和趋于无穷大的情况。在本文中,由于需要使资源的使用量达到最大化,因此将边际成本设置为无穷大。假设 p_{total} 中的边际成本表示为:

$$p_{\text{total}}^e = \sum_j \sum_k p_{\text{base}}^j \times \left(\frac{C^j - f^j}{C^j - l^j(t)} \right)^{n^j} \quad (3)$$

对 p_{total}^e 求一阶导数为:

$$\frac{\partial p_{\text{total}}^e}{\partial l_k^j(t)} = \sum_j \sum_k n^j p_{\text{base}}^j (C^j - f^j) \times \left(\frac{C^j - f^j}{C^j - l^j(t)} \right)^{n^j-1} \frac{1}{(C^j - l_k^j(t))^2} \quad (4)$$

再求二阶导数为:

$$\frac{\partial^2 p_{\text{total}}^e}{\partial l_k^j(t)^2} = \sum_j \sum_k n^j p_{\text{base}}^j (C^j - f^j) \times \left[\left(\frac{C^j - f^j}{C^j - l^j(t)} \right)^{n^j-2} \frac{n^j-1}{(C^j - l_k^j(t))^4} + \left(\frac{C^j - f^j}{(C^j - l_k^j(t))^3} \right) \right] \quad (5)$$

由于 $C^j > f^j$ 且 $C^j > l_k^j(t)$, 因此 $\frac{\partial p_{\text{total}}^e}{\partial l_k^j(t)} > 0$, 且

$\frac{\partial^2 p_{\text{total}}^e}{\partial l_k^j(t)^2} > 0$, 即 p_{total}^e 是个拟凹函数, 符合经济学中稀缺资源供需关系的特点, 可以在资源紧缺时增加获得该资源的边际成本, 有效调整供需关系。根据以上关系, 可以得到用户报价和资源使用情况的关系, 如图 1 所示。

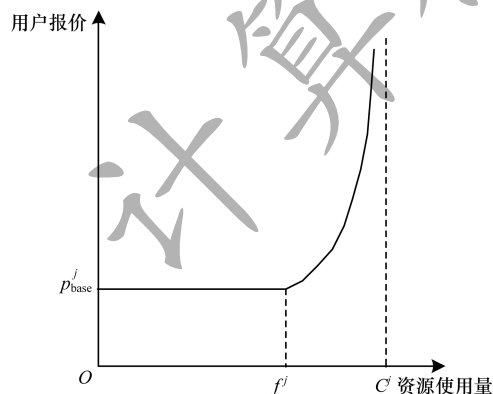


图 1 用户报价与资源使用量的关系

对于本文报价规则来说, 目标是尽可能使创造更多效用的用户以较低价格获取所需资源, 从而使整体收益达到最大化。通过边际成本的设置, 对不同情况下用户的报价进行调整, 用户原始报价将考虑用户等级、任务类型等因素, 并且在资源分配过程中需保证分配的公平性。

1.3 分配原则

本文根据报价规则, 设定以下分配原则:

1) 对于用户请求而言, 计算每一个用户请求需求资源的总报价, 即该用户包含的所有业务的基本价格和边际价格的总和, 按照用户请求报价对所有用户请求进行降序排列。

2) 对于所有资源而言, 根据每种类型所包含的单位资源数量和资源单价计算该类型资源的总价, 并对所有资源的单价求出平均价格, 按照价格进行

升序排列。在进行资源分配时, 根据排序列表, 依次对报价高的用户请求和价格低的资源进行匹配。一个用户请求中可能会包含一个或多个业务, 每个业务的匹配成功价格将按照各个业务对资源需求的数量及对应的资源单价计算得到。每个用户请求的价格等于该用户请求内所有业务成交价格的总和。如果该用户请求最终请求资源的实际价格不超过该用户的报价, 则资源请求成功; 否则请求失败, 用户等待下一轮分配。

对于本文分配原则给出以下规定:

1) 保证每个用户请求分配到的占优资源(占优资源即当前用户所需的所有资源类型中占比最大的资源类型)的价格是所有资源中价格最低的资源。

2) 每个用户请求须根据自身承受能力进行报价, 不能为了得到价格低廉的资源在报价时故意使价格高于其能够承受的范围。

3) 用户请求报价和资源定价是在本轮资源分配之前已经定好的, 在每一轮资源分配的过程中不能进行修改, 这样能够在一定程度上保证资源分配的公平性。

该分配原则的优点在于:

1) 将报价高的用户请求与价格低的资源进行匹配。对于用户请求, 报价高的用户可以获得相对低的资源使用价格, 而用户的报价与成功请求价格的差值称为用户请求的效用。报价越高的用户请求获得的效用可能会越大。对于资源提供方, 价格低的资源提供方可以优先与报价高的用户进行匹配, 因此, 价格低的资源的利用率可能会更高或者资源的收益更大。

2) 以资源的定价作为用户与资源成交价格的标准, 用户请求报价与资源成交价格之间的剩余价值归用户所有, 能够激励用户使用资源, 提高资源的利用率以及用户请求的工作效率, 达到双赢的效果。

3) 以资源报价为成交价格符合个人理性原则, 即用户的请求成功价格不能高于自己的报价, 资源提供方的资源分配成功价格不得低于自己的报价。

2 基于定价机制的卫星网络资源共享分配

2.1 资源分配模型

为实现拍卖模型和资源分配模型(见图 2)的更好结合, 引入如下模块:

1) 资源抽象模块: 对物理网络进行监控, 将物理网络资源抽象为数据信息, 将信息传递给资源分配模块。

2) 用户调度模块: 调度网络中的用户根据加入网络的用户订阅服务, 将信息传递给资源分配模块。

3) 资源分配模块: 根据资源抽象模块和用户调度模块上传的信息, 对资源进行分配。

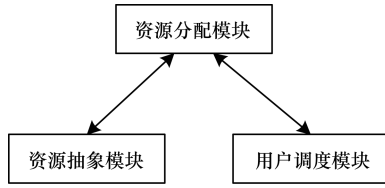


图2 资源分配模型

根据资源和用户请求信息,本文将卫星网络中的资源定义为 M 种,记为 $R = \{1, 2, \dots, M\}$,表示卫星资源种类的集合,将用户请求定义为 N 种,记为 $U = \{1, 2, \dots, N\}$,表示用户请求的集合。第 i 个用户请求的资源需求向量表示为 $T_i = \{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{ij}, \dots, T_{im}\}$,其中, T_{ij} 表示用户 i 中所有业务对资源 j 的需求量的总和,可以表示为 $T_{ij} = a_i \cdot t_{ij}$,用户请求的资源占比表示为 $D_i = \{D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{ij}, \dots, D_{im}\}$, D_{ij} 表示用户请求 i 中的业务对资源 j 的需求量占资源 j 总量的比例,且 $D_{ij} > 0$ 。对 D_i 做归一化处理可以得到 $d_i = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{ij}, \dots, d_{im})$,其中, $d_{ij} = \frac{D_{ij}}{D_{ij}^*}$, $j^* = \arg\max_{j \in R} D_{ij}$ 。当 $d_{ij} = 1$ 时,则认为资源 j 为用户 i 的占优资源,即资源 j 为用户 i 中业务需求量最大的资源。

令 w_i 表示用户请求 i 对每种资源的共享资源量,则有 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$,即所有用户请求对每种资源的需求总和为 1。当有 $k \in \{1, 2, \dots, N\}$ 个用户请求同时请求同一种类型的资源时,令 a_i^k 表示用户请求 i 分配到的占优资源的数量,即用户请求 i 的子任务对这一类型的资源需求的数量。定义用户请求 i 对该资源的占优资源数量为:

$$D_i^k = \max \left\{ \frac{a_i^k d_{ij}}{w_i} \mid j = 1, 2, \dots, m \right\} \quad (6)$$

根据占优资源的定义,式(6)可化简为 $D_i^k = \frac{a_i^k}{w_i}$ 。

由于卫星网络自身的特性以及业务请求的特点,假设所有的用户请求会在不同时刻到达系统,即用户 k 会在用户 $k-1$ 之后到达。用户请求进入资源分配系统后不会私自离开系统,直到该用户请求中所有的子业务全部完成后才会离开,但是每个用户所需的资源并不会随着等待时间的变化而变化。当资源分配系统中有 k 个用户时,会得到一个共享的动态多资源公平分配方案 $A^k = (A_1^k, A_2^k, \dots, A_i^k, \dots, A_m^k)$,其中 $A_i^k = (A_{i1}^k, A_{i2}^k, \dots, A_{ij}^k, \dots, A_{im}^k)$ 为用户 i 的资源分配向量。 A_{ij}^k 表示用户 i 在资源 j 上分配得到的资源数量,满足如下公式:

$$\sum_{i=1}^k A_{ij}^k \leq \sum_{i=1}^k w_{ij}, \forall j \in R \quad (7)$$

对于任意用户 $i, i \leq k-1, k \geq 2$,其分配结果是一个不可逆的过程,表示为:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M A_{ij}^k \geq \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M A_{ij}^{k-1} \quad (8)$$

由式(8)可知,前 $k-1$ 个用户请求分配到的资源 j 一定不能超过前 k 个用户请求分配到的资源 j 。

基于以上分析,本文建立一种基于共享的虚拟资源分配策略,目标是当系统中存在 N 个用户时,最大化占优资源份额 M_i^k ,从而得到用户请求 i 的最大占优资源份额数,再根据本文的定价原则,计算出用户请求 i 的收益,表示为:

$$V_i = p_{\text{total}} - M_i^i \times p_{\text{base}}^i - p_{\text{base}}^i \times \left(\frac{C^j - f^j}{C^j - l^i(t)} \right)^{n^j} \times (T_{ij} - M_i^i) \quad (9)$$

式(10)代表模型的目标函数,模型的目标是整体资源分配的剩余价值最大,整体剩余价值 V 是整个资源分配过程中分配成功的用户报价-资源供应者的报价。

$$\max V = \sum_i V_i \quad (10)$$

在该目标函数中,所求的是参与资源分配的全部用户请求在能够满足自身资源需求的同时使收益最大化,从而实现整体资源分配收益的最大化。根据本文提出的定价原则可知,每个用户请求的最大占优资源是该用户请求需求最大的资源也是价格最低的资源,且其他资源需求也是在满足用户请求的情况下的最低价格,这就保证了用户请求在满足资源需求的情况下成本最低。

为使得到的结果更加精确,对该目标函数进行约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N T_i \leq \sum_{j=1}^M C^j \\ T_i \geq M^k w_i, \forall i \leq k \\ T_i^k \geq T_i^{k-1}, \forall i \leq k-1 \\ \sum_{i=1}^k T_i d_{ij} \leq \sum_{i=1}^k w_i, \forall j \in R \end{cases} \quad (11)$$

第1个约束条件是用户所需的资源总量不能超过资源总量;第2个约束条件是当资源分配系统中有 k 个用户请求时,第 i 个用户请求所需的资源总量一定不低于其最大占优资源的份额;第3个约束条件说明的是当资源分配系统中有 k 个用户时,对任意用户分配到的占优资源份额数不小于资源分配系统中有 $k-1$ 个用户时的分配数量,满足分配的不可逆性;第4个约束条件是当资源分配系统中有 k 个用户时,资源分配系统可以分配的资源数量最多为 $\sum_{i=1}^k w_i$ 。

2.2 资源分配算法

根据数学符号定义,资源列表中的卫星资源的集合为 m ,记为 $R = \{1, 2, \dots, m\}$,用户集合为 $U = \{1, 2, \dots, n\}$ 。具体步骤如下:

1) 进行资源分配前,资源抽象模块和用户调度模块会将当前时段的资源信息和用户请求信息上传至资源分配模块,当前时段的资源信息和用户请求

信息分别记为 U^n 和 R^m , 获得双方的整体信息后, 按照定价规则进行排序, 排序后生成用户资源需求列表和资源信息列表。

(1) 资源抽象模块将汇集该时段的资源信息集合, 用户调度模块将收到的用户请求整理汇总。资源分配模块提取上述两个模块的信息后, 为每个用户请求及其所包含的业务和资源提供方及其包含的单位资源赋予不同的标号, 用户请求标号列表记为 $user_id$, 业务标号列表记为 job_id , 资源提供方标号列表记为 $resource_id$, 单位资源标号列表记为 $unit_id$ 。

(2) 整理每个用户请求信息, 生成 $user$ 资源需求列表 $user_need$ 。对于每一个 $user$, $user_need$ 中记录着 $user$ 的标号及每个 $user$ 所能承受的最高价格。

(3) 整理每个业务请求信息, 生成 job 资源需求列表 job_need 。对于每一个 job , job_need 中记录 job 的标号, 每个 job 所属 $user$ 的标号及 job 的报价。

(4) 生成所有 job 的资源需求矩阵 $job_combination$ 。行数等于 n_job , 列数是总的资源类型数 r , 标号为 $i \in job_id$ 的 job 对应着行向量 $(t_i^1, t_i^2, \dots, t_i^j, \dots, t_i^r)$, $j \in R$, 其中 t_i^j 表示标号为 i 的 job 对第 j 类资源的需求量。

(5) 整理每种资源的信息, 生成 $unit$ 信息列表 $unit_serve$ 。对于每一个 $unit$, $unit_serve$ 中记录着 $unit$ 的标号, $unit$ 所属的资源类型的标号, $unit$ 的初始定价。

(6) 生成所有 $unit$ 的资源组合矩阵 $unit_combination$ 。行数等于 n_unit , 列数是总的资源类型数 r , 标号为 $l \in unit_id$ 的 $unit$ 对应的行向量为 $(q_l^1, q_l^2, \dots, q_l^j, \dots, q_l^r)$, $j \in R$, 其中 q_l^j 表示标号为 l 的 $unit$ 可提供的 j 类资源的数量。

(7) 生成所有 $unit$ 的资源单价矩阵 $unit_price$, 行数为 n_unit , 列数为总的资源类型数 r , 标号为 $l \in unit_id$ 的 $unit$ 对应的行向量为 $(u_l^1, u_l^2, \dots, u_l^j, \dots, u_l^r)$, $j \in R$, 其中 u_l^j 表示标号为 l 的 $unit$ 中第 j 类资源的使用价格。

(8) 按照 job 的报价, 对列表中所有 job 进行降序排列。

(9) 计算每类资源包含的单位资源的平均价格, 标号为 $l \in unit_id$ 的 $unit$ 资源的平均价格 $meanprice(l)$ 由式(12)计算得到。根据求得的平均价格, 对资源进行升序排列。

$$meanprice(l) = \frac{\sum_{j \in R} u_j^l}{r} \quad (12)$$

2) 在完善用户请求和资源信息后, 对用户请求进行资源分配与价格计算, 得到每个用户请求成功分配到相应资源后所付出的代价。

(1) 对于用户中的第 i 个 $user$, 获取该 $user$ 所属用户请求的标号 $this_user_id$, 检查该用户请求的前 i 个 $user$ 是否已经完成资源匹配, 如果已经完成, 则 $i = i + 1$,

重复该步骤, 检查下一个 $user$; 否则, 进行步骤(2)。当 $i > n_user$ 时, $user$ 的循环结束, 跳到步骤(9)。

(2) 从 $user_need$ 中读取当前第 i 个 $user$ 中包含的 job 个数, 记为 n^s , 依次对每一个 job 进行资源匹配, 进行步骤(3), job 的循环变量 h 从 1 开始到 n^s 结束。当 $h > n^s$ 时, job 的循环结束, 跳到步骤(7)。

(3) 对于第 h 个 job , 从 $user_need$ 中读取 job 的标号 $this_job_id$, 再按照 $unit_serve$ 的顺序, 依次寻找第一个能够满足当前 job 资源需求的 $unit$, 进行步骤(4)。

(4) 对于第 j 个 $unit$, 检查该 $unit$ 的全部资源是否已经被使用, 如果是, 则 $j = j + 1$, 重复该步骤, 对下一个 $unit$ 进行检查; 否则, 进行步骤(5), 当 $j > n_unit$ 时, 即 $unit$ 循环结束, 跳到步骤(8), 这说明所有的 $unit$ 已检查完毕, 但是没有与当前 job 匹配的 $unit$, 因此, 当前 job 资源匹配失败, 在步骤(8)中, 将清空该 $user$ 中所有 job 的历史信息。

(5) 对于第 j 个 $unit$, 检查其是否满足第 h 个 job 的资源需求, 如果是, 则进行步骤(6); 否则, $j = j + 1$, 跳回到步骤(4)。

(6) 记录第 j 个 $unit$ 和第 h 个 job 的资源匹配信息。从 $resource_id$ 中获取第 j 个 $unit$ 所属资源的标号, 从 $unit_price$ 中获取第 j 个 $unit$ 所对应的行向量 $(u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_r)$, $j \in R$, 这一行向量表示该 $resource_id$ 中各 $unit$ 的使用价格, 从 $job_combination$ 获取第 h 个 job 对应的行向量 $(t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_r)$, $j \in R$, 这一行向量表示标号为 h 的 job 对各类资源的需求量。计算第 h 个 job 与第 j 个 $unit$ 之间的资源交易价格:

$$this_job_price = (t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_r) \cdot (u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_r)^T \quad (13)$$

在计算第 h 个 job 的资源交易价格后, $h = h + 1$, 检查下一个 job , 返回到步骤(3)。

(7) 计算标号为 i 的 $user$ 成交价格 $user_price(i)$:

$$user_price(i) = \sum_{h=1}^{n^s} this_job_price \quad (14)$$

若求得的 $user_price(i)$ 高于用户请求 i 的承受范围, 进行步骤(8); 若不低于其承受范围, 则匹配成功, 记录匹配成功信息, $i = i + 1$, 检查下一个 $user$, 返回步骤(1)。

(8) 当前 $user$ 资源匹配失败, 清空其相关的所有历史记录, $i = i + 1$, 检查下一个 $user$, 返回步骤(1)。

(9) 该时段资源分配结束, 资源分配模块整理本轮资源匹配信息, 告知参与资源分配的用户请求与资源提供方。

3 仿真结果与分析

在进行资源利用率仿真时, 设置竞拍的资源种类为 1, 参与竞争的资源提供方数目为 5, 在资源数量一定的情况下, 测定在不同需求下资源的利用率。仿真结果证明了在资源数目充足的情况下, 资源利

用率随着资源请求数量的增加而增加,而在资源不足或者资源基本饱和的情况下,基本持平并且保持了较高的资源利用率,结果如图 3 所示。

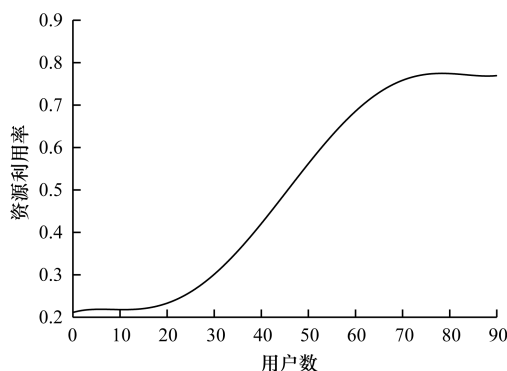


图 3 资源利用率

在进行资源分配公平性仿真时,仿真中设置的竞拍资源数目为 3,参与竞争的用户和资源提供方双方数目为 20,其中用户和资源提供方的比例为 3:1。在资源分配过程中,每个竞价者都根据其资源组合的真实估价以及定价规则进行出价,每个参与竞争用户和资源提供方的竞拍参数包括竞拍资源种类组合的资源需求及资源报价,如表 1、表 2 所示。

表 1 参与竞争用户的竞拍参数

编号	资源需求			资源报价		
	1	2	3	1	2	3
1	6	17	10	22	15	20
2	6	16	8	26	16	21
3	4	13	5	30	24	28
4	14	12	6	14	16	30
5	4	13	5	31	23	27
6	5	11	13	34	17	15
7	5	11	13	34	17	15
8	6	12	17	22	13	15
9	4	14	9	23	18	22
10	2	23	13	32	12	15
11	5	10	9	27	20	21
12	4	11	18	30	17	12
13	12	17	10	13	12	15
14	6	13	7	24	16	20
15	6	22	15	15	10	12

表 2 资源提供方的竞拍参数

编号	资源需求			资源报价		
	1	2	3	1	2	3
1	18	50	42	24	13	12
2	15	43	31	30	46	20
3	10	20	17	32	20	27
4	20	63	23	22	10	21
5	27	31	36	13	17	15

根据基于定价的卫星网络资源共享分配策略对模型进行求解,可得到每个用户的请求效用。通过

仿真得到如图 4 所示的结果,其中,总报价表示用户对需求资源的总竞价价格,总支出表示用户的资源请求成功价格。可以看出,报价高的用户不一定能得到高的收益,说明在定价机制和资源分配模型的约束下,能够保证一定的公平性。

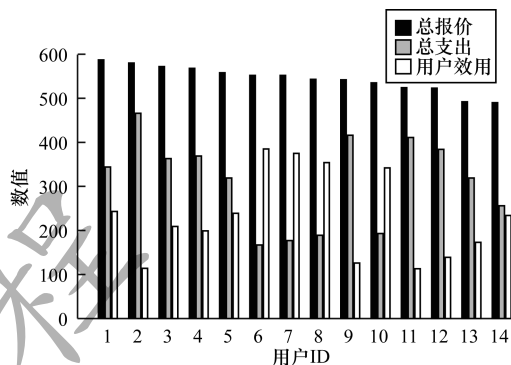


图 4 本文资源共享分配策略下的用户请求效用结果

本文引入微观经济学理论中的边际成本思想是为了提高稀缺资源效益,实现资源的最大效用。为此,本文对资源在不同用户请求与资源供给比情况下的效用进行仿真,结果如图 5 所示。可以看出,在基于定价的资源共享分配策略下,资源效用的增长率随着资源请求率的上升而上升。

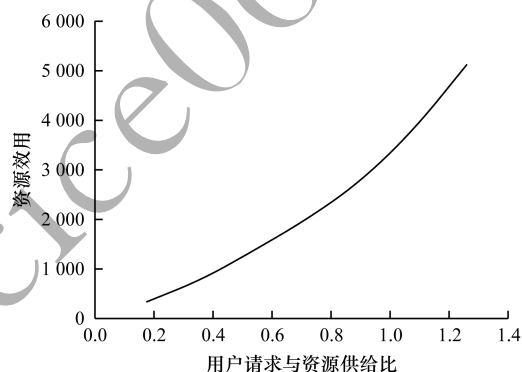


图 5 本文资源共享分配策略下的资源效用结果

4 结束语

为合理高效地分配卫星网络资源以实现资源的最大效用,本文提出一种基于定价的共享分配策略。该策略将市场定价机制引入到资源分配中,通过对用户请求和卫星网络资源的定价进行约束,确保资源之间的公平竞争性,并利用共享资源分配中求解占优资源份额的思想对每个用户请求的占优资源份额进行求解,再对用户请求的代价进行求和,最终得到用户请求的最小代价,使用户请求获得最大收益。仿真结果表明,该策略能够合理高效地分配卫星网络资源,从而最大限度地实现稀缺资源的潜在价值。下一步将对本文资源共享分配策略的资源定价公平性、资源分配时隙设置、时间效率优化等方面做进一步研究。

参考文献

- [1] YANG Weiwei, ZHAO Xiaohui. Robust resource allocation for cognitive relay networks with multiple primary users [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2017(1):107.
- [2] SHI Yan, LIU Zengji, SHENG Min. A novel network resource allocation algorithm with load balance guarantees [J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2005, 32(6):885-889. (in Chinese)
史琰, 刘增基, 盛敏. 一种保证负载均衡的网络资源分配算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2005, 32(6):885-889.
- [3] LAGUNAS E, SHARMA S K, MALEKI S, et al. Resource allocation for cognitive satellite communications with incumbent terrestrial networks [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2016, 1(3):305-317.
- [4] WANG Weihua, WANG Xiaojie, LENG Yonglin, et al. A SDN-based elastic resource allocation scheme [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2017, 31(7):145-150. (in Chinese)
王威华, 王小洁, 冷泳林, 等. 一种基于软件定义的弹性网络资源分配方案[J]. 重庆理工大学学报, 2017, 31(7):145-150.
- [5] GUO Lei, NING Zhaorong, SONG Qingyang, et al. A QoS oriented high-efficiency resource allocation scheme in wireless multi-media sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(5):1534-1548.
- [6] QIU Dongdong, YU Jiancheng, LU Xinlong. A novel resource allocation scheme based on multi-satellite terminals in MF-TDMA satellite systems [C]//Proceedings of the 6th International Congress on Image and Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013:1483-1488.
- [7] DOAN T T, BECK C L. Distributed Lagrangian methods for network resource allocation [EB/OL]. [2018-10-11]. <https://arxiv.org/abs/1609.06287v2>.
- [8] JIN Along, SONG Wei, ZHUANG Weihua. Auction-based resource allocation for sharing cloudlets in mobile cloud computing [J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2018, 6(1):45-57.
- [9] CUI Yuxuan. A pricing-based algorithm of routing and resource allocation for satellite networks [D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)
崔宇轩. 一种基于定价的卫星网络选路及带宽资源分配算法 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [10] QIAN Jin, WANG Xiao, GUO Shizeng. An energy-efficient resource allocation algorithm in heterogeneous network [J]. Communications Technology, 2016, 49(2):199-204. (in Chinese)
钱进, 王孝, 郭士增. 基于能效优化的异构网络资源分配算法设计 [J]. 通信技术, 2016, 49(2):199-204.
- [11] JIANG Yong, CHEN Shanzhi, HU Bo. Stackelberg games-based distributed algorithm of pricing and resource allocation in heterogeneous wireless networks [J]. Journal on Communications, 2013, 34(1):61-68. (in Chinese)
姜永, 陈山枝, 胡博. 异构无线网络中基于 Stackelberg 博弈的分布式定价和资源分配算法 [J]. 通信学报, 2013, 34(1):61-68.
- [12] GAJC V, HUANG Jianwei, RIMOLD B. Competition of wireless providers for atomic users [C]//Proceedings of the 47th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Monticello, USA: [s. n.], 2009:1203-1210.
- [13] MOHAMMAD F. Price based spectrum sharing and rate allocation in the downlink of multihop multicarrier wireless networks [J]. IET Networks, 2014, 3(8):252-258.
- [14] LI Xuejun, LIU Xiangjun, ZHU Erzhou. An efficient resource allocation mechanism based on dynamic pricing reverse auction for cloud workflow systems [C]//Proceedings of AP-BPM '15. Busan, South Korea: [s. n.], 2015:59-69.
- [15] SU Jingtao, YANG Shengsong, XU Haitao, et al. A Stackelberg differential game based bandwidth allocation in satellite communication network [J]. China Communications, 2018, 15(8):205-214.
- [16] HU Zhengqun. SIGSO satellite communication resources management [C]//Proceedings of International Conference on Instrumentation and Measurement. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016:43-46.
- [17] SHAKKOTTAI S, RAPPAPORT T S, KARLSSON P C. Cross-layer design for wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(10):74-80.

编辑 陆燕菲