

基于纳什议价解的地外驻留平台网络可靠性与效用代价分析

程子敬¹, 赵俊楠², 崔玉文², 石乐义²

(1. 北京卫星信息工程研究所天地一体化信息技术国家重点实验室, 北京 100086;

2. 中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院, 山东 青岛 266580)

摘 要: 针对地外驻留平台网络中设备昂贵、对链路可靠性要求极高等特点, 将影响网络性能的可靠性和效用代价这 2 个基本要素视作多目标优化问题进行分析, 建立了网络可靠性与效用代价模型, 形式化描述了 2 个优化目标之间的联系。在此基础上, 运用合作博弈中的纳什议价模型对可靠性与效用代价进行公平性折中, 并通过 Matlab 结合 CVX 计算得到可靠性与效用代价同时最优的纳什议价解集。进一步动态调整威胁值并重复博弈, 即可得到同时保证可靠性与效用代价的公平性的帕累托最优目标值。最后, 通过对一个典型地外驻留平台网络拓扑链路进行纳什议价求解, 阐述了在网络业务量与链路容量值已知时, 如何对链路数和链路容量进行设置以降低效用代价。这对于地外驻留平台网络的优化部署有重要意义。

关键词: 地外驻留平台; 纳什议价; 帕累托最优; 可靠性; 效用代价

中图分类号: TP393.06

文献标识码: A

Reliability and cost efficiency analysis for deep space habitat network based on Nash bargaining solution

CHENG Zi-jing¹, ZHAO Jun-nan², CUI Yu-wen², SHI Le-yi²

(1. State Key Laboratory of Space Ground Integrated Information Technology,

Beijing Satellite Information Engineering Research Institute, Beijing 100086, China;

2. College of Computer & Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Focusing on the deep space habitat network requirements of high reliability and expensive links, two impact factors to the network performance were regarded as a multi-objective optimization problem, which were network reliability and cost efficiency model, and the relations between the two factors were formalized. Thereafter, the Nash model of cooperative game was used to make a fairness compromise to the network reliability and cost efficiency, and the Nash bargaining solution set was acquired through the Matlab platform with CVX. Further, through changing the threat value dynamically and performing the repeated game, the Pareto optimal solution could be obtained which can ensure the fairness of reliability and cost efficiency simultaneously. Finally, the Nash bargaining method was applied to a typical deep space habitat network topology, and described in detail how to set up the link numbers and link capacity in order to reduce the cost when the network traffic and the link capacity were given. The proposed work is important for the deployment and optimization of the deep space habitat network.

Key words: deep space habitat, Nash bargaining, Pareto optimality, reliability, cost efficiency

1 引言

地外驻留平台 (deep space habitat) 是一类规模大、任务复杂的超大型航天器的总称, 包含了近地轨道空间站、静止轨道空间站、地月空间站、月球

基地和火星基地等, 是空间信息网络的重要天基载体。地外驻留平台网络则是支撑航天器进行数据计算、传输与存储的核心平台。受自身硬件设备限制以及恶劣环境的影响, 地外驻留平台网络的拓扑约束条件高, 设备链路造价昂贵, 可用资源远少于地

收稿日期: 2016-09-19; 修回日期: 2016-10-19

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目 (No.91438117, No.91538202)

Foundation Item: The National Natural Science Key Foundation of China (No.91438117, No.91538202)

面通用网络，极易发生故障并且难以维修^[1]。因此，如何在保障地外驻留平台网络可靠性的前提下，提高设备链路的负载效率，减少不必要的设备链路冗余开销，成为地外驻留平台网络部署优化中亟需解决的重要问题。

目前，提高网络可靠性的研究工作很多，常见的方法是通过建立模型进行可靠性评估或进行算法优化设计^[2]，如通过节点数据排队等待过程建立通信网络流量模型^[3]、对一些典型网络拓扑结构的可靠性进行建模分析^[4]、基于神经网络对网络构建能量函数^[5]、基于可靠度寻求网络可靠性优化算法^[6]和从额外连通度判断可靠程度^[7]等，但针对空间信息网络特点进行可靠性与效用优化的研究工作还很少。通常，网络拥塞是影响网络可靠性的重要因素，而解决网络拥塞需要使网络达到负载均衡。为了解决这一问题，已有的算法包括可调的能量均衡拓扑控制算法^[8]、分布式的能耗均衡拓扑控制算法^[9]和抗干扰信道分配算法^[10]等，但上述算法主要针对传感器节点组成的网络，并不适用于空间信息网络。

在空间信息网络可靠性研究方面，文献[11]分析讨论了空间信息网络的可靠性评价指标，包括抗毁性、生存性、有效性及其计算方法，应用概率分析方法得到系统可靠性的数学模型，并给出了系统可靠性与节点和链路可靠性的关系。文献[12]则结合空间信息网络体系架构设计需求，分析并选择自然连通度作为网络的抗毁性测度，提出了一种基于自然连通度的空间信息网络结构优化模型，设计了一种具有免疫审查的人工免疫算法并进行模型求解，具有很强的抗毁性。

文献[13]研究了基于容迟网络（DTN, delay tolerant network）的空间信息网络互联问题，阐述了 DTN 应用于空间信息网络的体系结构，分析了组成要素和工作模式，并针对路由机制、安全机制和服务质量控制等问题进行了关键技术分析。文献[14]针对星际网络通信中网络拓扑变化问题，提出了基于 DTN 的排队延迟和链路失效消息传递模型，提高了准确度和路由性能。文献[15]进一步采用协议代理方案的异构协议互联方法，实现了空间节点上的 DTN 网关及协议转换功能，开销较小且应用灵活。

以上研究都是从可靠性评价指标、数学模型和网络架构设计等方面进行空间信息网络可靠性研究，这与本文基于博弈理论进行网络可靠性和

效用代价的推理分析是不同的。文献[16,17]与本文研究方法最相近，基于博弈理论进行多目标优化问题求解，将 2 个目标要素视为可以设定自己性能门限的博弈局中人，博弈双方都可以改变自己的性能门限，来使自己的目标值得到优化，在理论上研究了业务量工程中负载均衡和能量效率的问题。文献[16,17]只是针对业务量工程的负载均衡和能量效率进行了博弈分析，本文将合作博弈中的纳什议价模型^[18]应用于地外驻留平台网络物理拓扑的可靠性与效用代价问题求解，通过对网络可靠性与效用代价进行公平性折中，达到在保证空间网络拓扑可靠性的同时，能够有效提高效率 and 节约成本，从而为空间信息网络的设计和部署提供理论支持。

2 合作博弈概述

博弈论也称对策论，是一门研究相互影响的决策主体所做行动及后果的理论^[19]。博弈分析过程中设定局中人完全理性，能够根据对方的行动决定自己的行动策略，以追求自身利益最大化。博弈方式有多种不同的分类方法。通常，按照局中人是否存在协作，将博弈分为非合作博弈和合作博弈。前者的著名案例就是囚徒困境^[20]，每个囚徒通过已知的信息进行理性分析，无论对方如何选择，“坦白”对自身都是最佳策略，因此，囚徒们会选择（“坦白”，“坦白”）策略从而达到博弈均衡。然而，尽管“坦白”策略对每个局中人个体都是最佳的，但对于所有局中人集体并非最优，这归根结底是因为囚徒之间没有开展有效的合作。如果存在一个有约束的协议，原来不能实现的合作方案就可能实现，这就是合作博弈^[21]。合作博弈中，博弈结果能够使整体的效益有所提升，或者至少有一方的收益有所增加且其他各方利益不受损失，因此适合于解决多目标优化问题^[22]。不同于单目标优化问题，多目标优化通常兼顾 2 个以上同等重要的目标，旨在提升所有目标的性能，而不以牺牲某一目标为代价优化其他目标。可靠性和效用代价正是地外驻留平台网络的多目标优化问题，本文将采用合作博弈中的纳什议价模型，推理分析在保障网络可靠性的前提下如何节约效用代价。

3 纳什议价模型与帕累托最优

纳什议价是指博弈参与者通过协商和讨价还

价来解决利益分配问题的一种方法。纳什议价解则是指博弈的参与人经过多次的讨价还价之后逐渐剔除不满足纳什公设的解后获得的均衡解。纳什议价模型寻求最佳方案过程中，会得到一些满足条件的纳什议价解。这些解中必然存在一个 x^* ，使解集中不存在满足条件的其他解 x 使 $f_n(x) \leq f_n(x^*)$, $n=1,2,\dots,N$ 。这样的解被称作帕累托最优解 (Pareto optimality) [23]。

纳什议价的博弈场景中，博弈双方通过宣称自身的威胁值 (threat value) 实现自身的性能优化，因此，纳什议价博弈又可称为威胁值博弈。通过议价可以得到很多满足条件的纳什均衡点，但如果博弈的任一方随意改变威胁值，那么将会导致博弈双方议价失败。因此，需要在博弈过程中动态调整威胁值，通过多次重复博弈可以保证博弈双方达成一致。

本文使用合作博弈中的纳什议价方法进行网络可靠性和效用代价博弈推理，通过完全信息动态博弈，对讨价还价过程进行模拟，据此建立议价模型，寻求使整体利益得到提升的方法。

4 网络拓扑可靠性与效用代价分析

下面将分析网络可靠性与效用代价的纳什议价解。借鉴相关研究，首先给出地外驻留平台网络可靠性与效用代价博弈的形式化描述如下。

网络拓扑可靠性描述为

$$f_l(x) = \min \sum_{l_n} \frac{x_{l_i}}{c_{l_i} - x_{l_i}} \quad (1)$$

其中， l_i 表示节点间的第 i 条链路； x_{l_i} 是在网络可靠性最差的情况下，流经节点间第 i 条链路的业务量；且 $x = \sum_{l_n} x_{l_i}$ ；用函数 $f_l(x)$ 表示链路的可靠性；

x_{l_i} 不超过流经链路的容量 c_{l_i} 。

网络效用代价描述为

$$g_l(y) = \min \sum_{l_n} (y_{l_i})^\alpha \quad (2)$$

其中， y_{l_i} 是在效用代价最小的情况下，流经节点间第 i 条链路的业务量；且 $y = \sum_{l_n} y_{l_i}$ ；函数 $g_l(y)$ 表示链路的效用代价，且假设在本文的所有网络拓扑中，所有代价消耗均体现于链路中；参数 α 为能耗函数 $g_l(y)$ 的影响因子，受设备等因素影响。

假设 a_R 、 a_E 为网络可靠性和效用代价的初始威

胁值，纳什议价解的优化问题可以描述为

$$\max \log(a_R - f_l(x)) + \log(a_E - g_l(y)) \quad (3)$$

当给定网络拓扑参数时，根据网络可靠性和效用代价模型计算，就可以得到可靠性和效用代价的最优和最差结果。进一步，将网络可靠性和代价的最差结果作为纳什议价的初始威胁值，根据式(3)进行重复博弈，若最终能够得到使多目标性能等比例提升的优化解，就表明纳什议价成功，系统的整体性能也将得到优化。

4.1 简单节点对网络的可靠性分析

下面以简单网络为实例，分析简单节点对于网络可靠性的影响。图 1 给出了一个具有不同容量链路的网络，网络中有 3 条从节点 s 到节点 d 的平行链路，容量分别是 $c_1=1\ 000$ 、 $c_2=2\ 000$ 、 $c_3=1\ 500$ 。为便于计算，设置能耗函数影响因子 $\alpha=1.5$ 。

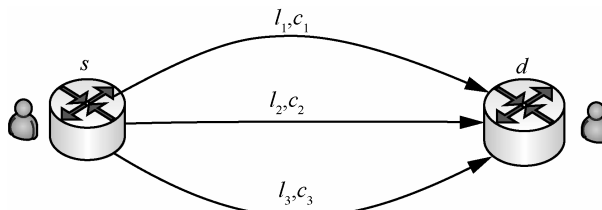


图 1 链路容量不相等网络

当节点 s 与节点 d 通信 900 单位的业务时，根据可靠性和效用代价模型，并使用 Matlab CVX [24] 工具即可求解得到可靠性 R 和效用代价 E 的最优最差结果： $\{R_{best}=0.678\ 3, E_{worst}=0.622\ 3, R_{worst}=0.493\ 0, E_{best}=0.855\ 5\}$ 。

为了公平折中，将初始威胁点 (a_R, a_E) 设为 $(0.855\ 5, 0.622\ 3)$ ，得到网络可靠性和代价分别为 0.719 1 和 0.522 7。

图 2 给出了所求问题的帕累托边界以及 2 个极端状态，直线轨迹为博弈迭代过程中威胁值的变化情况。该轨迹说明当初始威胁值被设置为 $(0.855\ 5, 0.622\ 3)$ 时，求得的最优结果便会收敛到公平折中的解。可见，当节点对之间进行业务传送时，3 条不同容量的链路之间存在可靠性与效用代价的折中解。但当 3 条链路完全相同时，3 条链路流经的通信量分别为 $x_1 = x_2 = 299.996\ 5$, $x_3 = 300.007\ 1$ (网络可靠性最小时)； $y_1 = y_2 = 299.972\ 6$, $y_3 = 300.054\ 8$ (网络代价最小时)。此时，可以视为 3 条链路将通信业务量均分传输。在这种情况下，重复博弈无解，网络可靠性与代价纳什议价失败。所以如果在

网络节点间增加相同的链路，根据负载均衡原理，网络会选择均分业务，由于任务分配与能量消耗固定，对于越简单的任务传输，越难寻求既保证可靠性又能兼顾代价的最优方案。

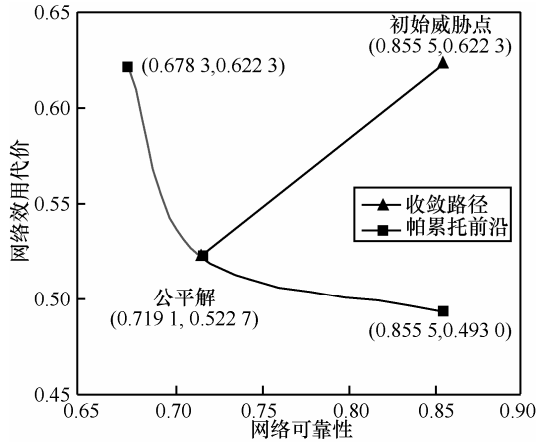


图 2 威胁点迭代轨迹

简化上述网络，设置为双链路平行拓扑结构，参数设置及计算结果如表 1 所示，对比可以得出一些有效的结论：当不同容量值链路均可达到纳什均衡，可以选择容量较小的一组以节省拓扑开销；当节点之间进行通信的业务量较小时，多链路拓扑难以进行纳什议价，所以可以适当减少链路，以均衡可靠性和代价等。

4.2 空间网络的可靠性研究

空间网络拓扑中，航天员使用的网络并不仅仅是简单的节点到节点的通信。空间与地面间的通信需要经中继卫星、通信卫星等进行转发。图 3 给出了一个典型的空间网络通信拓扑，下面对这个空间网络的可靠性与代价进行分析。

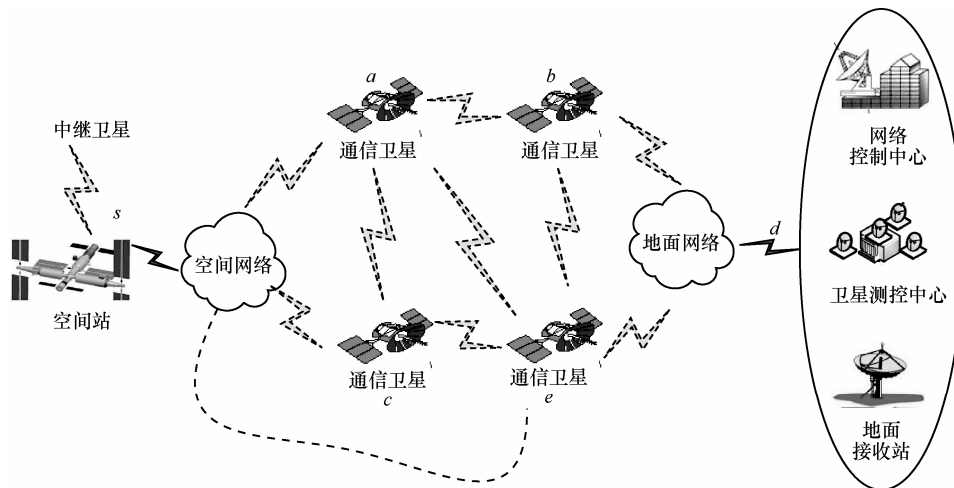


图 3 一个典型的空间网络通信拓扑

表 1 双链路网络不同参数结果对比

参数设置	(可靠性, 代价)	
	优化前	优化后
$c_1=1\ 000, c_2=2\ 000, x=900$	(1.108 5, 0.722 5)	(0.852 1, 0.630 8)
$c_1=2\ 000, c_2=3\ 000, x=900$	(0.466 8, 0.248 3)	(0.427 1, 0.221 9)
$c_1=1\ 000, c_2=2\ 000, x=500$	负数解, 议价失败	

假设源点 s 与目的节点 d 间通信的业务量为 1 000，每条链路容量为 4 500。如果要求流量转发次数少于 4，那么从 s 到 d 一共有 4 条可达路径，分别为 $s \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow d$ 、 $s \rightarrow a \rightarrow e \rightarrow d$ 、 $s \rightarrow c \rightarrow e \rightarrow d$ 和 $s \rightarrow e \rightarrow d$ 。

求解

$$\begin{cases} x_{l_1} + x_{l_2} + x_{l_3} + x_{l_4} = 1\ 000 \\ \min \left[\frac{3x_{l_1}}{4\ 500 - x_{l_1}} + \frac{3x_{l_2}}{4\ 500 - x_{l_2}} + \frac{3x_{l_3}}{4\ 500 - x_{l_3}} + \frac{2(1\ 000 - x_{l_1} - x_{l_2} - x_{l_3})}{4\ 500 - (1\ 000 - x_{l_1} - x_{l_2} - x_{l_3})} \right] \end{cases}$$

可得： $x_{l_1} = x_{l_2} = x_{l_3} = 45.587\ 1$ ， $x_{l_4} = 863.238\ 8$ 。

求解

$$\begin{cases} y_{l_1} + y_{l_2} + y_{l_3} + y_{l_4} = 1\ 000 \\ \min \left[3 \left(\frac{y_{l_1}}{4\ 500} \right)^{1.5} + 3 \left(\frac{y_{l_2}}{4\ 500} \right)^{1.5} + 3 \left(\frac{y_{l_3}}{4\ 500} \right)^{1.5} + 2 \left(\frac{1\ 000 - y_{l_1} - y_{l_2} - y_{l_3}}{4\ 500} \right)^{1.5} \right] \end{cases}$$

可得 $y_{l_1} = y_{l_2} = y_{l_3} = 190.078\ 1$ ， $y_{l_4} = 429.784\ 5$ 。

由计算结果可以看出，当链路容量相等时，转

发次数相同的 3 条可达路径流量相等。相对于转发 3 次到达目的节点的第 4 条可达路径, 只转发了 2 次, 在纳什折中方案里明显被分配了更多的业务量。

依次计算网络可靠性的最优/最差目标为 (0.566 8, 0.608 1), 网络代价的最优/最差目标为 (0.137 2, 0.177 2)。将初始威胁值设为 (0.608 1, 0.177 2), 计算求解可得 4 条链路的通信量分别为 (116.713 8, 116.713 9, 116.705 3, 649.867 0)。此时的可靠性与代价的目标值为 (0.577 2, 0.1474)。可知, $\frac{0.6081-0.5772}{0.6081-0.5668} = \frac{0.1772-0.1474}{0.1772-0.1372} = 75\%$ 说明可靠性和效用代价经优化后性能提升的比例相等, 这刚好满足公平性的定义。

在典型的空间网络拓扑中, 当源节点与目的节点间通过多条路径对业务量进行传输时, 拓扑链路的可靠性与效用代价是可以进行纳什议价的, 通过不同链路业务量的分配, 能得出使网络可靠性与效用代价均能达到最优状态的方案。同理, 对于其他空间光网络拓扑的部署, 也可以通过本文的纳什议价方案对不同的链路业务量进行分配, 以求达到既保证可靠性, 又能节约成本的目的。

5 结束语

地外驻留平台的网络与航天员的飞行安全以及各种重要的航天任务息息相关, 因而可靠性成为首要考虑的关键技术。通常采用增加可行链路的方法提高网络拓扑的可靠性, 但随着节点连通度的增加, 网络拓扑随之扩展, 网络的成本代价也随之提高。如何既保证网络拓扑具有足够的可靠性, 又能节约成本是本文追求的目标。

本文基于纳什议价的理论对上述 2 个目标进行最优化解。通过重复博弈和最初威胁值的设定, 得出最终的帕累托最优解, 在保证双方达到最佳状态的同时也兼顾了 2 个目标的公平性。最后将纳什议价理论应用于网络拓扑中, 通过纳什议价方案对网络进行优化部署, 该方案对于地外驻留平台网络系统的优化设计和部署具有指导作用。

参考文献:

[1] 郭超. 空间信息网络拥塞控制与路由研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
GUO C. Research on congestion control and routing for space information network[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.

[2] ZHOU P, JIN R Y, FAN L W. Reliability and economic evaluation of power system with renewables: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 537-547.

[3] 赵娟, 郭平, 邓宏钟, 等. 基于信息流动力学的通信网络性能可靠性建模与分析[J]. *通信学报*, 2011, 32(8): 159-164.
ZHAO J, GUO P, DENG H Z, et al. Modeling and analysis of performance reliability for communication networks based on traffic dynamics[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(8): 159-164.

[4] 何益海, 沈珍, 尹超. 基于过程质量数据的制造系统可靠性建模分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(8): 1027-1032.
HE Y H, SHEN Z, YIN C. Reliability analysis modeling of manufacturing systems based on process quality data[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(8): 1027-1032.

[5] DASH R K, BARPANDA N K, TRIPATHY P K, et al. Network reliability optimization problem of interconnection network under node-edge failure model[J]. *Applied Soft Computing*, 2012, 12(8): 2322-2328.

[6] 王洋. 计算机网络可靠性优化设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
WANG Y. The computer network reliability optimization design[D]. Changchun: Jilin University, 2014.

[7] 梁家荣, 白杨, 王新阳. 评估交换超立方体网络可靠性的一种新方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 37(3): 693-699.
LIANG J R, BAI Y, WANG X Y. A new method used for evaluating reliability of the exchanged hyper-cube network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 37(3): 693-699.

[8] 唐宏, 王惠珠. 基于无线信号不规则性的无线传感网多层次拓扑控制算法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(9): 2246-2253.
TANG H, WANG H Z. Wireless signal irregularity based hierarchical topology control algorithm for wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(9): 2246-2253.

[9] 李小龙, 冯东磊, 彭鹏程. 一种基于势博弈的无线传感器网络拓扑控制算法[J]. *物理学报*, 2016, 65(2): 028401-1-10.
LI X L, FENG D L, PENG P C. A potential game based topology control algorithm for wireless sensor networks[J]. *Acta Physical Sinica*, 65(2): 028401-1-10.

[10] SAIFULLAH A, XU Y, LU C, et al. Distributed channel allocation protocols for wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 25(9): 2264-2274.

[11] 李云飞. 空间通信中的网络可靠性分析[J]. *现代电子技术*, 2012, 35(23): 45-48.
LI Y F. Analysis of network reliability in space communication[J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, 35(23): 45-48.

[12] 董飞鸿, 吕晶, 巩向武, 等. 空间信息网络结构抗毁性优化设计[J]. *通信学报*, 2014, 35(10): 50-58.
DONG F H, LYU J, GONG X W, et al. Optimization design of structure invulnerability in space information network[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(10): 50-58.

[13] 林闯, 董扬威, 单志广. 基于 DTN 的空间网络互联服务研究综述[J]. *计算机研究与发展*, 2014, 51(5): 931-943.
LIN C, DONG Y W, SHAN Z G. Research on space internetworking service based on DTN[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2014, 51(5): 931-943.

[14] BEZIRGIANNIDIS N, TSAPELI F, DIAMANTOPOULOS S, et al. Towards flexibility and accuracy in space DTN communications[C]// *The 8th ACM MobiCom Workshop on Challenged Networks*. ACM, 2013: 43-48.

- [15] 周红彬, 李勇, 吴静, 等. 异构协议空间信息网络的 DTN 互联方法研究[J]. 武汉大学学报工学版, 2015, 48(5): 734-738.
ZHOU H B, LI Y, WU J, et al. DTN based interconnection technique for heterogeneous space network[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(5): 734-738.
- [16] ZHAO Y, WANG S, XU S, et al. Load balance vs energy efficiency in traffic engineering: a game theoretical perspective[C]//2013 Proceedings IEEE INFOCOM. Turin, Italy, 2013: 530-534.
- [17] 赵阳明. 数据中心网络中路由与资源分配问题研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
ZHAO Y M. Routing and resource allocation in data center networks[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [18] 刘蕴, 冯穗力, 叶梧. 基于纳什议价解的 IEEE 802.16 网络流量控制方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 38(10): 47-51.
LIU Y, FENG S L, YE W. Flow control based on Nash bargaining solution for IEEE 802.16 networks[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 38(10): 47-51.
- [19] NEUMANN J, MORGENSTERN O. Theory of games and economic behavior[M]. Princeton: Princeton University Press, 1944.
- [20] TUCKER A W. A two-person dilemma[J]. Readings in Games and Information, 1950: 7-8.
- [21] 黄开枝, 洪颖, 罗文字, 等. 一种基于博弈的联盟组网方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7):1562-1568.
HUANG K Z, HONG Y, LUO W Y, et al. Security coalition method based on game theory[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(7): 1562-1568.
- [22] 林闯, 陈莹, 黄霁崑, 等. 服务计算中服务质量的多目标优化模型与求解研究[J]. 计算机学报, 2015, 38(10): 1907-1923.
LIN C, CHEN Y, HUANG J W, et al. A survey on models and solutions of multi-objective optimization for QoS in services computing[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(10):1907-1923.
- [23] SHRIMALI G, AKELLA A, MUTAPCIC A. Cooperative inter-domain traffic engineering using Nash bargaining and decomposition[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(2): 341-352.
- [24] GRANT M, BOYD S. CVX users' guide for CVX version 1.22[EB/OL]. <http://www.doc88.com/p-740649272629.html>, 2016.

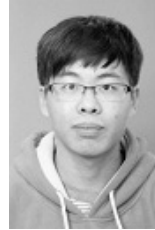
作者简介:



程子敬 (1972-), 男, 河北秦皇岛人, 博士, 北京卫星信息工程研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为空间信息网络、空间通信协议、航天器高速信息网络等。



赵俊楠 (1991-), 女, 吉林松原人, 中国石油大学 (华东) 硕士生, 主要研究方向为网络安全、博弈理论。



崔玉文 (1992-), 男, 山东济宁人, 中国石油大学 (华东) 硕士生, 主要研究方向为网络安全、隐蔽通信。



石乐义 (1975-), 男, 山东临朐人, 博士, 中国石油大学 (华东) 教授、硕士生导师, 主要研究方向为网络安全、博弈理论和移动计算。