

基于能量效率的分布式星群下行链路功率分配方法研究

王蔚龙, 赵尚弘, 李勇军

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077)

摘要: 针对多波束卫星通信系统星上资源稀缺和能量利用效率不高的问题, 本文提出了分布式星群网络下行链路中兼顾系统功耗和数据速率的功率分配方法, 通过合理的资源分配来优化系统的能量效率. 首先建立分布式星群功率分配模型, 将复杂的分式问题转化为易于求解的减法形式问题, 然后基于凸优化理论, 提出功耗-数据速率权衡功率分配算法, 并讨论了能量效率(energy efficiency)与频谱效率(spectral efficiency)之间的权衡关系. 仿真结果验证了提出算法的有效性和 EE-SE 权衡关系, 并分析了电路功耗对系统性能的影响.

关键词: 分布式星群网络; 卫星通信; 能量效率; 凸优化; 空间网络架构; 星地链路; 多波束卫星

中图分类号: TN927 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)06-1177-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.06.019

Power Allocation in Distributed Satellite Cluster Downlink Based on Energy Efficiency

WANG Wei-long, ZHAO Shang-hong, LI Yong-jun

(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: Aiming at the problem of scarcity of on-board resources and low energy utilization efficiency in multi-beam satellite communication system, this paper proposed the power allocation algorithm in distributed satellite cluster network downlink considering both system power consumption and data rate. And the energy efficiency of the system is optimized by reasonable resource allocation. First we built distributed satellite cluster power allocation model and transformed the problem of fractional form to simple subtractive form. Then based on convex optimization, the power-data rate trade off power allocation algorithm is proposed, and the trade-off between energy efficiency (EE) and spectral efficiency (SE) is discussed. The numerical results validate the effectiveness of the proposed algorithm and the EE-SE tradeoff, and the influence of circuit power on system performance is also analyzed.

Key words: distributed satellite cluster network; satellite communications; energy efficiency; convex optimization; space network architecture; satellite-terrestrial link; multi-beam satellite

1 引言

为满足不断发展的星上通信任务需求, 提供高质量、低功耗的通信服务, 基于分布式星群网络 (Distributed Satellite Cluster Network, DSCN) 的空间网络架构成为卫星通信领域备受关注的研究方向^[1]. DSCN 是一种分布式的网络结构, 能够整合现有系统资源并以合理的方式分配它们, 分布式星群是网络中的节点, 它取代了传统的单个卫星^[2,3]. 星群内的卫星部署在相邻的轨道上, 它们通过星间链路能够更有效地解决多样化的

通信任务. 由于分布式星群 (Distributed Satellite Cluster, DSC) 的全面性和复杂性, 应该合理分配有限的星上功率资源, 使系统 EE 最大化.

传统的移动无线网络设计侧重于双向接入和大容量传输, 频谱效率是广泛接受的无线网络优化标准. 但是由于卫星载荷受到严格限制, 星上资源紧张, 在卫星网络设计中需要以能量效率为导向^[4]. 此外, 急剧增长数据传输量和多媒体服务任务使卫星通信的能耗需求迅速上升, 作为当前卫星通信网络技术发展的性能指标, EE 优化问题引起了越来越多的关注^[5]. 在同样的通

信条件下,EE 最大化方案可以优化功率分配,同时保证最低数据速率要求^[6]. 博弈论^[7]、边缘计算策略^[8]、帕累托优化^[9]和加权求和法^[5]等思想在不同的应用场景中被用于求解 EE 资源分配问题. 虽然上述工作从不同的角度研究了如何提升系统的 EE 性能,但是都没有涉及关于 DSCN 的 EE 资源优化讨论.

本文以 DSC 中的 EE 为优化目标,采用凸优化工具,提出功耗-数据速率权衡功率分配算法. 该算法能够明显提升系统的性能,缓解星上功率资源紧缺的问题.

2 系统模型及问题描述

空间信息网络能够通过不同空间平台获取、传输和处理网络信息,如图 1 所示.

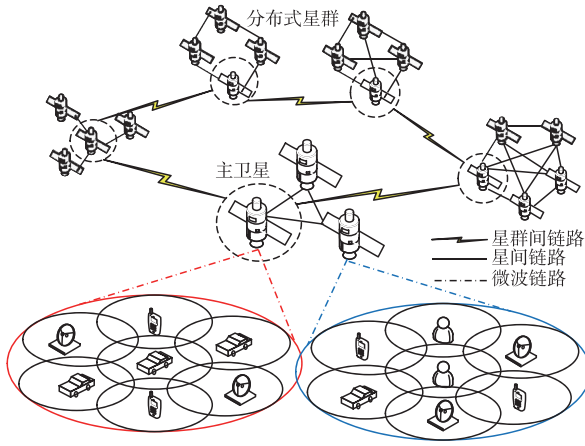


图1 分布式星群网络场景

网络由骨干网和接入网组成. 天基骨干网采用模块化的分布式星群网络结构,由在 Ka 频段工作的 L 个 GEO 星群组成. 每个星群由 M 个具有星上处理能力的小卫星组成,每颗卫星包含 K 个波束为 N 个用户提供服务. 选择星群中星上资源充裕且没有传播阻塞的卫星作为主卫星,负责整合星群内部的信息并与其他星群建立光链路. 本文主要关注卫星下行链路的功率分配问题,假设星地链路采用莱斯衰落模型,卫星信道功率增益的概率密度函数如下所示:

$$f_h(h) = \alpha \exp(-\beta h) {}_1F_1(m, 1, \delta h) \quad (1)$$

其中 h 为信道衰落因子, ${}_1F_1(\cdot, \cdot, \cdot)$ 表示合流超几何函数^[10], $\beta = 1/2b$, $\alpha = [2bm/(2bm + \Omega)]^m / 2b$, $\delta = \Omega / [2b(2bm + \Omega)]$. $2b$ 为散射部分的平均功率, Ω 为 LoS 部分的平均功率. m 为 Nakagami 衰落参数且取整数. 因此根据文献[11],可以将式(1)改写为:

$$f_h(h) = \frac{\alpha \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(-1)^k (1-m)_k (\delta h)^k}{(k!)^2}}{\exp((\beta - \delta)h)} \quad (2)$$

其中 $(x)_n = x(x+1)\cdots(x+n-1)$ 为阶乘乘. 星地信道

的传输特性受地面站到卫星仰角 θ 的影响^[12].

假设卫星的每个波束的带宽由 N 个用户平均共享, P_m^t 表示卫星 m 的总可用功率,它被优化分配到各个波束以满足传输需求,如果 $P_{m,k,n}$ 表示分配至第 m 个卫星 k 条波束的 n 用户的功率,那么

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N P_{m,k,n} \leq P_m^t \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N P_{k,n} \leq P_{m,k}^{\max} \quad (4)$$

其中 $P_{m,k}^{\max}$ 表示第 k 个波束的最大功率,优化变量为 $P_{m,k,n}$. 在提出的场景中,分配到用户的功率与带宽成比例,根据先前假设,同一波束下的用户平均分配功率. 因此优化变量转变为 $P_{m,k}$, $P_{m,k,n} = P_{m,k}/n$. 由上述讨论可以得出式(3)和式(4)可以被简化为

$$\sum_{k=1}^K P_{m,k} \leq P_m^t \quad (5)$$

$$P_{m,k} \leq P_{m,k}^{\max} \quad (6)$$

本文的总功耗包括分布式星群的传输功率和电路功耗两部分,如式(7)所示:

$$P_t = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K P_{m,k} + P_c \quad (7)$$

其中 P_c 为卫星电路功耗.

根据香农公式, $R_{m,k} = B_c \log_2(1 + \frac{hP_{m,k}}{B_c N_0})$ 表示系统传输速率, N_0 为功率谱密度, B_c 为分配到波束的带宽. SE 和 EE 分别定义为每单位带宽的系统吞吐量和每单位能耗的系统吞吐量,将它们表示为:

$$\eta_{SE} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K R_{m,k}}{B} \quad (8)$$

$$\eta_{EE} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K R_{m,k}}{P_t} \quad (9)$$

为了兼顾分布式星群通信系统中的功耗和数据速率两项指标,在星上功率与频谱资源受限的情况下,将波束间功率分配问题建模如式(10):

$$\begin{aligned} \max f_2(P) &= \eta_{EE} \\ \text{s. t. } &\sum_{k=1}^K P_{m,k} \leq P_m^t \\ &0 \leq P_{m,k} \leq P_{m,k}^{\max}, m=1, \dots, M; k=1, \dots, K. \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)的目标函数是结构复杂的分式,无法使直接使用凸优化的方法求解. 因此需要使用适当的方法,将原问题转化为可以求解的凸优化问题,得出最优的功率分配策略.

3 EE 功率优化算法及 EE-SE 权衡

3.1 功耗-数据速率权衡功率分配算法

根据非线性分式规划理论^[13],可以将计算复杂度

较高的分式问题

$$\hat{x} = \max R/P \quad (11)$$

转化为易于求解的减法形式的等价问题:

$$H(\hat{x}) = \max \{R - \hat{x}P\} = 0 \quad (12)$$

最大的 \hat{x} 对应于 EE 的最大值, 给定 x 的情况下, 可以解决减法形式的式(13). x 和 $H(x)$ 在每次迭代中都会被更新, 直到算法收敛. 采用这种函数等价变换方法, 将式(10)的目标函数转化如下:

$$\max \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K B_c \log_2 \left(1 + \frac{hP_{m,k}}{B_c N_0}\right) - x \left(\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K P_{m,k} + P_c\right) \quad (13)$$

转换后, 容易证明式(13)的函数为凹函数, 且满足 Slater 约束条件^[14]. 因此, 采用拉格朗日对偶法解决式(13)的问题, 得出拉格朗日函数如下:

$$\begin{aligned} L(P_{m,k}, \alpha, \beta) = & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K B_c \log_2 \left(1 + \frac{hP_{m,k}}{B_c N_0}\right) \\ & - x \left(\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K P_{m,k} + P_c\right) \\ & + \alpha \left(\sum_{k=1}^K P_{m,k} - P_m^t\right) \\ & + \beta (P_{m,k} - P_{m,k}^{\max}) \end{aligned} \quad (14)$$

其中 α 和 β 表示非负的拉格朗日算子. 对拉格朗日函数求偏导, 得出该问题的 KKT 条件:

$$\frac{\partial L}{\partial P_{m,k}} = \frac{B_c h}{(B_c N_0 + hP_{m,k}) \ln 2} - x = 0 \quad (15)$$

$$\alpha \left(\sum_{k=1}^K P_{m,k} - P_m^t\right) = 0 \quad (16)$$

$$\beta (P_{m,k} - P_{m,k}^{\max}) = 0 \quad (17)$$

采用牛顿迭代法寻找式(15)中 $P_{m,k}$ 的最优解, 根据 $P_{m,k}$ 的泰勒展开式, 取二阶近似:

$$\frac{\partial L}{\partial P_{m,k}} + \frac{\partial^2 L}{\partial P_{m,k}^2} (P_{m,k}^{k+1} - P_{m,k}^k) = 0 \quad (18)$$

其中, k 为迭代次数. 计算功率的迭代式表示如下:

$$P_{m,k}^{k+1} = P_{m,k}^k - \Delta P_{m,k} \quad (19)$$

当 $\Delta P_{m,k} < \varepsilon$ 时迭代终止. 使用下面的式(20)求解拉格朗日算子:

$$F(\alpha, \beta) = \max L(P_{m,k}, \alpha, \beta) \quad (20)$$

因此利用梯度法更新 α^{k+1} 和 β^{k+1} 的值:

$$\alpha^{k+1} = [\alpha^k - \zeta \left(\sum_{k=1}^K P_{m,k} - P_m^t\right)]^+ \quad (21)$$

$$\beta^{k+1} = [\beta^k - \xi (P_{m,k} - P_{m,k}^{\max})]^+ \quad (22)$$

其中, $\zeta, \xi > 0$ 是迭代步长, $z^+ = \max\{z, 0\}$. 根据以上讨论, 功耗-数据速率权衡功率分配算法如下所示. 提出算法的计算复杂度由迭代次数决定, 则该算法的计算复杂度为 $O(N_1 N_2)$, 其中 N_1 和 N_2 分别为拉格朗日算子和 $H(x)$ 收敛时的迭代次数.

算法 1

```

1: Set  $x=1$  and Initialize  $P_{m,k}^0$ ;
2: repeat
3: Initialize  $\alpha$  and  $\beta$ ;
4:   repeat
5:     Calculate  $P_{m,k}^{k+1}$  with Newton's method;
6:     if  $\Delta P_{m,k} < \varepsilon$ , then
7:       Break
8:     else
9:       Update  $\alpha^{k+1}$  and  $\beta^{k+1}$  with  $P_{m,k}^{k+1}$ ;
10:    Update  $x$ ;
11:  until  $H(x) < \varepsilon$ 

```

3.2 EE-SE 权衡关系

当资源受限时, η_{EE} 和 η_{SE} 之间存在冲突, 在 DSCN 中需要关注如何平衡这两个性能指标. 根据文献[9], 当子载波数充分大时, $\eta_{EE}(\eta_{SE})$ 是关于 η_{SE} 的严格拟凸函数. 如果 $\eta_{SE} \in [R_1/B, R_2/B]$, 则 $\eta_{EE}(\eta_{SE})$

(a) 当 $d(\eta_{EE})/d\eta_{SE}|_{\eta_{SE}=R_1/B} < 0$ 时, 随 η_{SE} 的增加而减小, 且在 $\eta_{SE} = R_1/B$ 处取得最大值;

(b) 当 $d(\eta_{EE})/d\eta_{SE}|_{\eta_{SE}=R_1/B} > 0$ 且 $d(\eta_{EE})/d\eta_{SE}|_{\eta_{SE}=R_2/B} \geq 0$ 时, 随 η_{SE} 的增加而增加, 且在 $\eta_{SE} = R_2/B$ 处取得最大值;

(c) 当 $d(\eta_{EE})/d\eta_{SE}|_{\eta_{SE}=R_1/B} > 0$ 且 $d(\eta_{EE})/d\eta_{SE}|_{\eta_{SE}=R_2/B} < 0$ 时, 随 η_{SE} 的增加, 先增加再减少, 且在 $\eta_{SE} = R_{EE,max}/B$ 处取得最大值.

其中 R_2 表示传输功率最大时的吞吐量, $R_{EE,max}$ 表示取得全局最大 EE 时的吞吐量.

4 仿真结果

为验证本文提出的功率分配算法对 EE 性能的提升, 揭示 EE-SE 之间的权衡关系, 本节进行 DSC 系统仿真实验研究. 假设 DSC 有 3 颗卫星, 每颗卫星的波束数目为 7, 仿真参数如表 1 所示.

表 1 系统仿真参数

| 参数 | 数值 |
|---------|------------------------|
| 频段 | Ka (30GHz) |
| 卫星带宽 | 187 MHz |
| 卫星总传输功率 | 90W |
| 静态电路功率 | 12W |
| 噪声功率 | 10^{-10} mW |
| 点波束仰角 | $[20^\circ, 80^\circ]$ |

图 2 表示波束功率约束和地面站到卫星仰角对能量效率的影响. 当波束功率约束为 50W, $\theta = 30^\circ$ 时, 优化后的分布式星群的能量效率提高了 12.59%, 提出的算法明显提升了系统的性能. 在不同仰角下, EE 随着最大波束功率的增加先增加, 再减小. 最大波束功率的增加

将允许为载波分配更多的功率,根据式(9),当功率达到一定的值后,波束功率的增加速率超过系统吞吐量的增加速率,因此分布式星群的 EE 随功率的增大而减小. EE 随地面站到卫星仰角的增加而增加,这是因为 θ 越大功率增益越大,改善了系统的性能. 此外,图 2 也表示了以 SE 为优化准则和基于加权求和法的功率分配方法^[5]的曲线,在波束最大功率为 65 W 时,本文提出的算法分别提升了 8.63% 和 5.02% 的系统 EE. 以 SE 为优化准则的功率分配方法的计算复杂度与本文相同,基于加权求和法的功率分配方法的计算复杂度为 $O(N_1)$,但是加权系数难以确定.

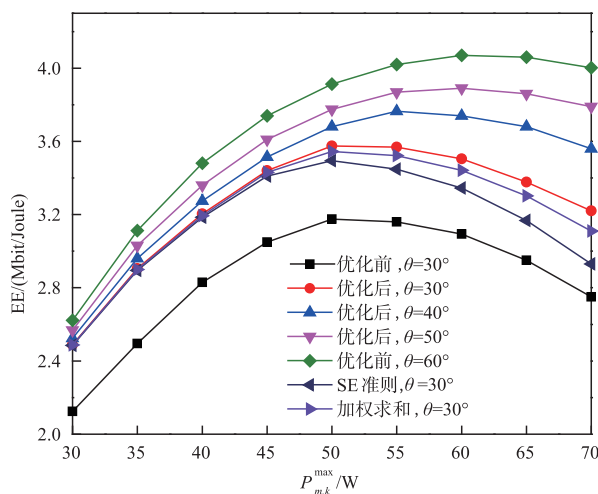


图2 波束功率约束对能量效率的影响

图 3 表示不同卫星仰角下,分布式星群 SE 随波束功率约束的变化趋势. 最大波束功率增加时,星上功率资源增加,分布式星群频谱效率也而增加,并且 SE 增加的趋势逐渐变缓,该结果与式(8)一致. SE 随地面站到卫星仰角的增加而增加,这是由于 θ 越大卫星下行链路的功率增益越大,系统性能有所提升. 传统的 2G、3G

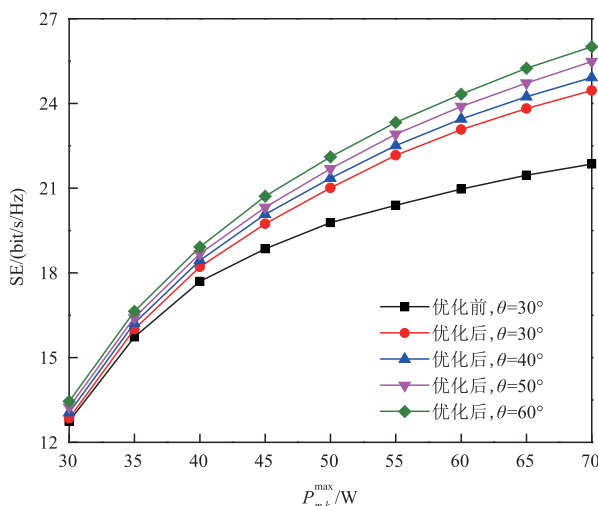


图3 波束功率约束对频谱效率的影响

网络通常以大容量、高速传输为优化目标,侧重考虑 SE;但对于卫星网络,由于星上资源稀缺,需要以能效为主导的设计方案,因此 EE 更适用于卫星通信网络. 从上述讨论中可以看出,不存在同时满足 SE 和 EE 最优化的功率分配方案,因此在实际应用中需要权衡 SE 与 EE 之间的关系,选择合适的功率分配方案.

不同地面站到卫星仰角下,分布式星群 EE 和 SE 之间的关系如图 4 所示. 从图中可以观察到,当 SE 为 21 bit/s/Hz, $\theta = 30^\circ$ 时,优化后分布式星群功率分配方案的 EE 增加了 15.58%. 优化后的 EE-SE 曲线表示不同功率分配策略下的最佳 EE-SE 权衡方案. 此外,曲线显示 EE 存在功率饱和点,当功率超过该点,无论增加多少功率,EE 都不再增加,这与文献[5]中的研究结果一致. 在满足给定 SE 的情况下,不需要一直增加分布式星群的能耗就可以使系统性能达到最优. 因此,基于上述结果可以设计最佳功耗通信网络.

图 5 比较了不同电路功耗下的 EE-SE 权衡曲线. 从

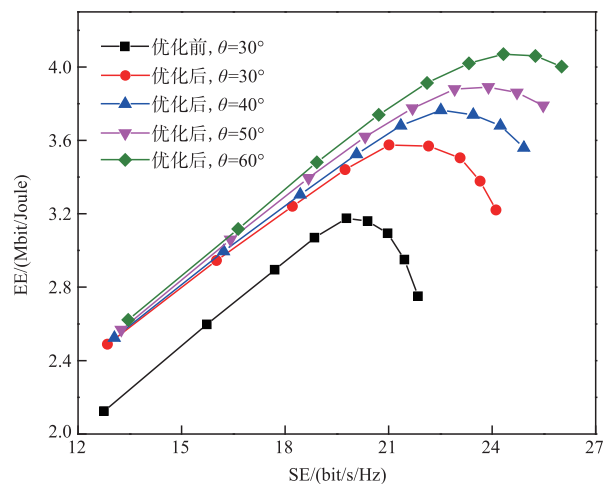


图4 EE-SE权衡曲线

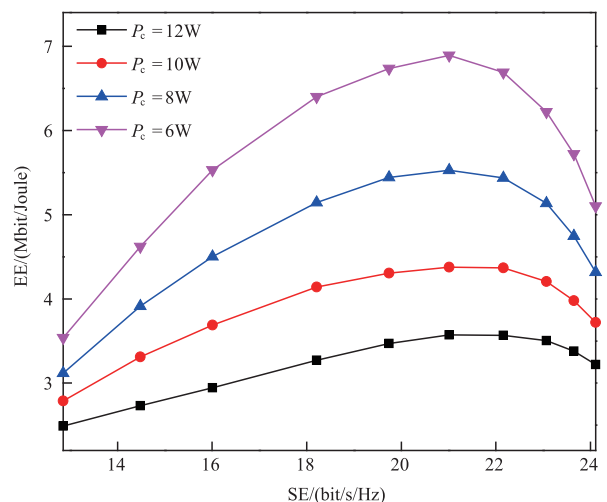


图5 不同电路功耗下的EE-SE权衡曲线

图中可以看出,EE 随着 P_e 的增加而减小. 无论 P_e 如何改变,EE 与 SE 之间总是存在权衡关系,EE-SE 权衡曲线上同样存在 EE 的功率饱和点. 在理想状况下,即 P_e 足够小时,EE 随着 SE 的增加而单调递减;但在实际的分分布式星群系统中, P_e 会破坏 EE 和 SE 之间的单调性关系^[4]. 更确切的说,当考虑 P_e 时 EE-SE 曲线变为钟形,EE 随着 SE 的增加先增加再减小.

5 结论

由于 DSC 星上资源受限,需要在考虑链路衰落特性的情况下合理分配星上功率资源,最大化链路传输效率. 本文研究了以 DSC 能量效率最优为目标的功率分配问题. 首先基于 DSCN 建立功率分配数学模型,根据非线性分式规划理论将复杂的分式问题转化为易于求解的减法形式的问题. 然后,采用拉格朗日对偶法求解简化后的最优化问题,并提出功耗-数据速率权衡功率分配算法,最后讨论了 EE-SE 权衡关系. 仿真结果表明,本文提出的算法能够有效提升分布式星群的 EE 和 SE,验证了 EE 与 SE 之间的权衡关系,同时,电路功耗降低和卫星仰角增加都会提升系统的 EE 性能. 这些结论对设计星上资源紧缺的分布式星群通信系统非常重要. 为进一步提高系统的能量效率,后续研究工作可以考虑多种约束条件下的资源分配问题.

参考文献

- [1] Radhakrishnan R, et al. Survey of inter-satellite communication for small satellite systems; physical layer to network layer view[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 18(4): 2442 – 2473.
- [2] Barnhart D J, et al. Very-small-satellite design for distributed space missions[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2007, 44(6): 1294 – 1306.
- [3] Yu Q Y, et al. Virtual multi-beamforming for distributed satellite clusters in space information networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(1): 95 – 101.
- [4] Chen Y, Zhang S, Xu S, et al. Fundamental tradeoffs on green wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 30 – 37.
- [5] He C, Sheng B, Zhu P, et al. Energy-and-spectral-efficiency tradeoff for distributed antenna systems with proportional fairness[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(5): 894 – 902.
- [6] Wu Q, Li G Y, Chen W, et al. Energy-efficient small cell with spectrum-power trading[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(12): 3394 – 3408.
- [7] Shi R, et al. Game-theoretic approach to energy-efficient resource allocation in device-to-device underlay communica-

tions[J]. IET Communications, 2015, 9(3): 375 – 385.

- [8] You C, Zeng Y, Zhang R, et al. Asynchronous mobile-edge computation offloading; Energy-efficient resource management[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(11): 7590 – 7605.
- [9] Zhong X, Yin H, He Y, et al. Joint downlink power and time-slot allocation for distributed satellite cluster network based on Pareto optimization [J]. IEEE Access, 2017, 5: 25081 – 25096.
- [10] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of integrals, series and products[J]. Mathematics of Computation, 2007, 20(96): 1157 – 1160. x
- [11] An K, et al. Secure transmission in cognitive satellite terrestrial networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(11): 3025 – 3037.
- [12] Abdi A, Lau W C, Alouini M, et al. A new simple model for land mobile satellite channels; first-and second-order statistics[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(3): 519 – 528.
- [13] Dinkelbach W. On nonlinear fractional programming[J]. Management Science, 1967, 13(7): 492 – 498.
- [14] Boyd S, Vandenberghe L. Convex Optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

作者简介



王蔚龙 男, 1992 年生于甘肃临夏. 现为空军工程大学信息与导航学院博士研究生. 主要研究方向为卫星网络资源优化分配, 卫星光网络波长分配方法.

E-mail: wwlwangyi@1126.com



赵尚弘 男, 1964 年生于甘肃兰州. 现为空军工程大学信息与导航学院教授、博士生导师. 主要研究方向为激光原理技术, 卫星光通信与网络, 空间微波光子技术.

E-mail: zhaoshangh@aliyun.com



李勇军 男, 1979 年生于陕西西安. 现为空军工程大学信息与导航学院副教授、博士生导师. 主要研究方向为卫星光通信与网络, 空间微波光子技术.

E-mail: tz_228@163.com