

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.05.005

动态跳波束策略中的自适应波束功率分配算法

李童,姚如贵,樊晔,左晓亚

(西北工业大学电子信息学院,西安 710072)

摘要:多波束卫星发射机的成本很高,同时地面小区的通信需求和通信优先级一直处在动态变化中。通过研究一种动态波束跳跃策略,实现在卫星资源受限和较少发射机数量约束下的广域覆盖和按需服务。区别于传统的分簇波束跳变思想,为了提高卫星系统的频谱效率,考虑在整个频率带宽上应用全局波束跳变。因此考虑在共信道干扰背景下,提出一种新型服务质量指标来衡量波束跳变结果。在卫星资源有限的情况下,各波束提供的通信容量不能满足地面小区的业务请求,基于粒子群算法选择的波束跳变图案,提出了一种自适应波束功率分配算法。该算法通过优先级加权,最小化波束业务容量需求差值,进而提高服务质量水平。最后,通过仿真验证了所提算法的性能优越性。

关键词:动态波束跳跃策略;共信道干扰;服务质量指标;自适应波束功率分配算法

中图分类号:V443;TN253

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2022)05-0042-06

Adaptive beam power allocation algorithm in dynamic beam hopping strategy

LI Tong, YAO Rugui, FAN Ye, ZUO Xiaoya

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The cost of multi-beam satellite transmitters is high, while the communication demand and communication priority of ground cells are always in dynamic change. This paper investigates a dynamic beam hopping strategy to achieve comprehensive area coverage and on-demand services under limited satellite resources and fewer transmitters. Unlike the traditional cluster beam hopping idea, in order to improve the spectral efficiency of the satellite system, global beam hopping is considered to be applied over the whole frequency bandwidth in this paper. Therefore, a new quality of service metric is considered to measure the beam hopping results in the context of co-channel interference. In the case of limited satellite resources, the communication capacity provided by each beam cannot meet the service requests of ground cells. An adaptive beam power allocation algorithm is proposed based on the particle swarm optimization algorithm for the beam hopping pattern. The algorithm minimizes the beam capacity requirement gap by weighted priority, and improves the quality of service level. Finally, the performance superiority of the algorithm is verified by simulation.

Key words: dynamic beam hopping strategy; co-channel interference; quality of service; adaptive beam power allocation algorithm

0 引言

下一代卫星通信系统的目标是提高吞吐量和

实现更高的频谱效率^[1-2]。在传统多波束卫星通信系统中,所有波束同时工作。频谱和功率被平均或以固定比例分配给每个波束,不可能根据服务需求

收稿日期:2022-04-21; 修回日期:2022-06-11

基金项目:国家自然科学基金(编号:61871327, 61701407, 61801218)

引用格式:李童,姚如贵,樊晔,等. 动态跳波束策略中的自适应波束功率分配算法[J]. 空间电子技术, 2022, 19(5): 42-47. LI T, YAO R G, FAN Y, et al. Adaptive beam power allocation algorithm in dynamic beam hopping strategy[J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(5): 42-47.

动态调整系统^[3]。因此,随着宽带通信卫星的发展,开发了具有时间分片技术的跳波束系统^[4]。

与传统的多波束通信卫星系统相比,采用跳波束技术的卫星系统是一种全新的高灵敏度系统,具有安全系数高、响应速度快、通信容量大等优点^[5]。跳波束卫星系统可以根据每个波束内地面小区的服务需求,动态调整按需覆盖服务的功率分配策略,进一步提高卫星系统的频谱利用效率,减少资源浪费^[6]。跳波束技术作为一种灵活的覆盖方式,需要制定有效的波束跳动策略来达到预期的服务质量,同时提高频谱效率^[7]。随着地面小区中用户数和通信需求的增长,小区资源需求最终将超过通信卫星的容量限制^[8]。

已有研究分析了跳波束卫星通信系统的灵活性和容量,并设计了相应的优化算法,提出了以系统容量或时延公平性为优化目标的时隙和功率分配方案。在文献[9]中,研究了下行链路跳波束卫星系统中灵活资源分配的容量优化算法。基于波束覆盖区域的业务需求,提出了两种启发式算法,并讨论了跳变的容量上限。根据服务分布调整波束大小,文献[10]提出了一种波束资源管理算法,通过覆盖更多的波束位置,使更多的小区用户能够访问和充分利用波束带宽资源。考虑每个波束使用部分频带和各波束均匀功率分配,文献[11]提出了遗传算法(genetic algorithm, GA)在跳波束卫星中优化资源分配的应用,与重点考虑波束跳变的容量公平性不同,文献[12]从时延公平性角度出发设计相应波束跳变策略。

综上所述,在现有文献的动态跳波束策略中,没有考虑到在有限的卫星资源、地面小区优先级差异、不均匀的业务需求的实际通信场景中的波束跳变策略。针对上述实际应用场景,设计了一种新颖的服务质量(quality of service, QoS)指标,在采用粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法求解波束跳变图案的动态跳波束策略中,提出了一种自适应波束功率分配(adaptive beam power allocation algorithm, APA)算法,用来最大化系统 QoS。

1 系统模型

1.1 模型建立

如图 1 所示,考虑一个地球同步轨道(geostationary, GEO)跳波束卫星的通信系统。这个卫星连接到地球上的网关,通过网关建立连接到卫星的馈线。任意一个时隙中, GEO 卫星的 K 个波束均全频

率复用的带宽 B , 以时分复用方式服务 N 个地面小区。在任意一个时隙中, GEO 卫星可以点亮 K 个地面小区。其中 GEO 卫星的第 k 个波束表示为 $k \in [1, K]$, 第 n 个地面小区表示为 $n \in [1, N]$ 。分配给 GEO 卫星第 k 个波束的功率可以表示为 $P_k \in \mathbf{P}$, $\mathbf{P} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 表示波束功率分配情况, $\sum_{k \in K} P_k = P^{\text{TOL}}$, P^{TOL} 波束总功率为 P^{TOL} 。GEO 卫星的跳波束图案表示为 $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N \times K}$, 其中 $x_{n,k} \in \mathbf{X}$ 表示 GEO 卫星第 k 个波束对第 n 个地面小区的服务情况, $x_{n,k} = 1$ 表示两者之间建立了连接, 反之亦然。由于地面通信业务优先级不同, 每个地面小区的优先级权重 Q_n 也不同。 N 个地面小区的优先级权重可表示为 $\mathbf{Q} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, 其中 $Q_n \in \mathbf{Q}$ 。

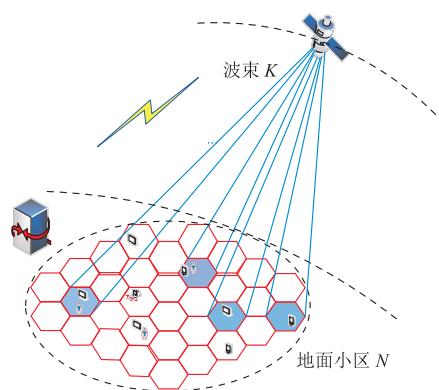


图 1 跳波束卫星系统模型

Fig. 1 Beam hopping satellite system model

从图 2 可以看出, 在任何时隙中, GEO 卫星可以根据网关获取地面情况, 设计并执行由跳波束图案 $\mathbf{X}$ 和相应波束功率 $\mathbf{P}$ 组成的动态跳波束策略。

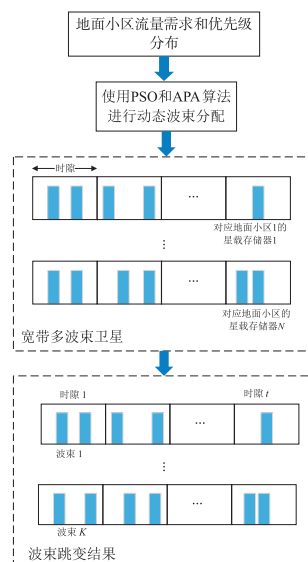


图 2 跳波束卫星系统流程图

Fig. 2 Beam hopping satellite system procedure diagram

1.2 问题建立

在任何时隙内,由于 GEO 卫星的每一个波束都采用全频复用,因此波束间会存在严重的共信道干扰。类似于文献[13]中的表达式,对于第 n 个地面单元而言,第 k 个卫星波束的增益 $B_{n,k}$ 表示为:

$$B_{n,k} = G_{\max} \times \left\{ \frac{J_1[u(n,k)]}{2u(n,k)} + 36 \frac{J_3[u(n,k)]}{u(n,k)^3} \right\}^2 \quad (1)$$

其中 $G_{\max}$ 为峰值波束增益。 J_1 和 J_3 分别表示一阶和三阶贝塞尔函数, $u(n,k) = 2.01723 \times \frac{\sin[\theta(n,k)]}{\sin(\theta_{3dB})}$ 。卫星波束增益和干扰示意图如图 3 所示。

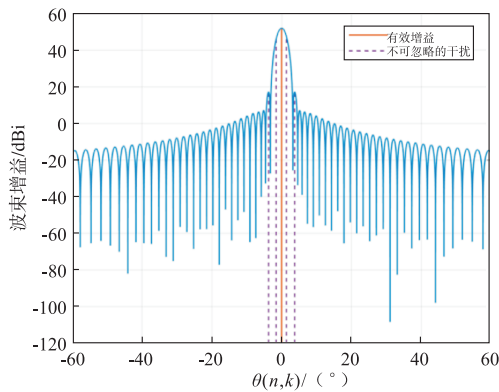


图 3 卫星波束增益和干扰示意图

Fig. 3 Satellite beam gain and CCI illustration

在图 3 中, $\theta(n,k)$ 表示第 n 个地面小区中信号入射方向与第 k 个波束中心点的夹角。地面小区 n 和波束 k 之间的距离越远,角度 $\theta(n,k)$ 越大。因此,地面小区 n 受到距离较近波束 k 的显著共信道干扰,如果地面小区 n 与波束 k 距离足够大时,共信道干扰可以忽略不计。在晴空条件下, $h_{n,k}$ 表示 GEO 卫星的第 k 个波束和地面小区 n 之间的信道系数,采用文献[14]中的表达式, $h_{n,k}$ 可表示为:

$$h_{n,k} = \frac{B_{n,k} G_r}{(4\pi S_n)^2} \quad (2)$$

其中 G_r 为常数,表示地面小区对波束的接收增益。 S_n 为地面小区 n 与 GEO 卫星之间的距离。根据式(2),当波束 k 点亮地面小区 n 时,地面小区 n 的信干噪比 (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) 可表示为:

$$\gamma_n = \frac{|h_{n,k}|^2 P_k}{\sum_{k'=1, k' \neq k}^K |h_{n,k'}|^2 P_{k'} + \sigma^2} \quad (3)$$

在式(3)中 $I_n = \sum_{k'=1, k' \neq k}^K |h_{n,k'}|^2 P_{k'}$ 表示地面小区 n 遭受到来自其他波束 k' 的共信道干扰, σ^2 为噪声功率。进一步可得地面小区 n 的系统容量 C_n 为:

$$C_n = B \times \lg(1 + \gamma_n) \quad (4)$$

动态跳波束策略的关键是时间分片,在任意时隙中,只有一部分地面小区可以得到波束服务。通过求解最优跳波束图案 $\mathbf{X}$ 和波束功率 $\mathbf{P}$,确保高优先级小区的优先传输,最小化式(4)中实际系统容量 C_n 和流量 R_n 需求之间差异。因此,优化目标表示为:

$$\begin{cases} \text{opt. P1: } \max \sum_{n_p=1}^N x_n Q_n, \\ \text{P2: } \min \sum_{n_p=1}^N x_n (R_n - C_n) \end{cases} \quad (5)$$

其中 Q_n 是地面小区 n 的优先级权重,地面小区优先级权重为 $\mathbf{Q} = [1, \dots, Q_N]$ 。因为在每个时隙中地面小区的状态都是变化的,所以每个时隙都需要动态地处理式(5)中的 NP-hard 问题。为了简化多目标优化问题,有必要找到一个目标函数,它提供实际可用容量和理想情况之间不匹配的度量,以及优先级权重水平的度量。根据复数的性质,实部和虚部可以分别用来表示这两个度量。因此,式(5)可以被简化为:

$$W_n = \frac{Q_n}{Q_{\max}} + j \frac{T_n}{R_n} \quad (6)$$

其中 $T_n = \min(C_n, R_n)$ 。进一步, GEO 卫星中的优化问题可以表述为:

$$\begin{cases} \text{opt. P: } \max F = \sum_{n_p=1}^N x_n |W_n|, \\ \text{s. t. S1: } \sum_{n=1}^N x_n = K, \\ \text{S2: } \sum_{k=1}^K P_k = P^{\text{TOL}}, \\ \text{S3: } \sum_{n_p=1}^N x_n C_n \leq C^{\text{TH}}, \\ \text{S4: } \frac{1}{6}\pi \leq \theta_{w_n} \leq \frac{1}{3}\pi, \end{cases} \quad (7)$$

考虑在卫星各波束采用相同的调制与编码方式背景下,波束功率一般与波束带宽成比例^[15],因此当波束全频复用时,波束功率均匀分配。对于式(7)中的 NP-hard 优化问题,当各波束功率均匀分配

时,文献[15]中的 PSO 算法直接得到最优跳波束图案 $\mathbf{X}$ 。但是均匀波束功率分配不能满足地面小区需求差异明显的场景,为了进一步提高系统服务质量,在基于 PSO 算法得到的最优跳波束图案 $\mathbf{X}$,提出一种 APA 算法。

2 APA 算法设计

在初始化期间,总发射功率 P^{TOL} 在 K 个波束中平均分配,每个波束根据粒子群算法得到的跳波束图案 $\mathbf{X}$ 点亮对应地面小区。 γ 表示平均归一化加权容量-请求比率, $\bar{\gamma}$ 为参照对比值,最大迭代次数为 I ,地面小区 n 的优先级因子比率由 η_n 给出。根据初始化的功率计算初始容量 C_n^1 ,在循环中, γ 首先由参照对比值 $\bar{\gamma}$ 更新,用于下一次判断,并且必须满足 $\gamma > \bar{\gamma}$ 且 $i < I$ 的循环条件,否则算法结束。具体算法流程如算法 1 所示。

算法 1 自适应波束功率分配算法

Algorithm 1 APA algorithm

输入:卫星总发射功率 P^{TOL} ,跳波束图案 $\mathbf{X}$,最大迭代次数 I ,地面优先级权重 $\mathbf{Q}$

1. 初始化: $i = 1$ $P_k = \frac{P^{\text{TOL}}}{K}$, $\gamma = 0$, $\bar{\gamma} = -\infty$, $I = 10$, 计算初始容量 C_n^1 ;
2. While $i \leq I$;
3. $i = i + 1$, $\bar{\gamma} = \gamma$;
4. 对于 $\forall k$, 计算 $\gamma_k = x_{n,k} \times \frac{Q_n}{\max(\mathbf{Q})} \times \left[\frac{\min(R_n, C_n^{i-1})}{R_n} \right]$;
5. 计算 $\gamma = \frac{\sum_{k=1}^K \gamma_k}{K}$;
6. 如果 $\gamma \leq \bar{\gamma}$, 算法结束, 直接输出结果;
7. 对于 $\forall k$, 计算 $P_k = P^{\text{TOL}} \times \frac{\gamma_k}{\sum_{k=1}^K \gamma_k}$;
8. 根据式(4)计算 C_n^i ;
9. End while
10. 输出:波束功率分配 $\mathbf{P}$ 。

在每次迭代中,通过步骤 4 和 5,任意波束 k 的功率直接根据归一化加权供需比 γ_k 获得。波束功率实现了由业务驱动的按需分配,因此平均加权容量-请求比率不断增加,保证了算法的快速收敛性。值得注意的是,本功率分配算法是面向时隙快速求解功率分配 $\mathbf{P}$ 的及时性迭代算法。因此在时效性和迭代次数的约束下,当步骤 6 中 γ 不再增加时,本

算法立刻停止并输出最优功率分配结果 $\mathbf{P}$ 。

3 仿真校验

3.1 仿真参数

由于所提 APA 算法是以时隙为单位由业务驱动的及时性算法,因此各时隙之间并不存在相关性。为保证仿真校验的公平性和确保所提 APA 算法的有效性,地面随机选择一个时隙进行仿真验证。图 4 给出了地面小区数 $N = 49$ 时各小区的优先级权重和流量需求情况。在表 1 中给出 GEO 跳波束卫星系统的仿真参数,同时在表 2 中给出求解最优跳波束图案时的 PSO 算法参数设置情况,其中 $c1, c2, v^{\max}, v^{\min}$ 为该算法的固有参数,具体参见参考文献[15]。

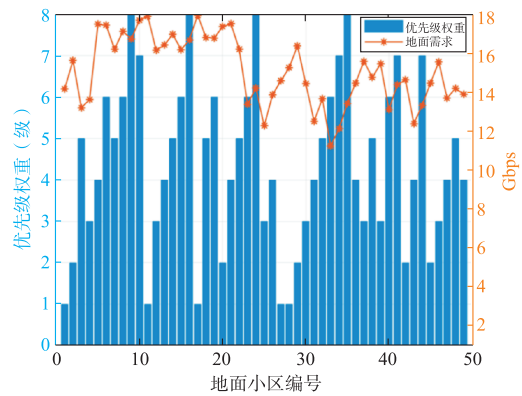


图 4 地面各小区优先级权重和流量需求示意图

Fig. 4 Diagram of priority weights and traffic requirements for each cell

表 1 GEO 跳波束卫星系统仿真参数

Tab. 1 GEO beam hopping satellite system simulation parameters

参数	数值
卫星类型	GEO
卫星容量限制 $C^{\text{TH}}/\text{Gbps}$	25
频带	Ka
带宽/MHz	500
地面小区半径/km	1000
地面小区数量/个	49
卫星波束数量/个	3 ~ 8
卫星 $\theta_{\text{3dB}}/(\circ)$	0.13
最大卫星天线增益/dBi	52
最大接收天线增益/dBi	40
卫星发射总功率/dBW	20, 30
噪声功率/dBW	-117

表 2 PSO 算法仿真参数

Tab. 2 PSO algorithm simulation parameters

参数	数值
最大权重 $w^{\max}$	0.8
最小权重 $w^{\min}$	0.2
学习因子 c_1, c_2	1.8
最大飞行速度 $v^{\max}/(\text{cm/s})$	6
最小飞行速度 $v^{\min}/(\text{cm/s})$	-6
粒子数/个	20
迭代次数/次	100

3.2 仿真结果

当卫星发射总功率 $P^{\text{TOL}} = 30 \text{ dBW}$, 波束数目 $K = 4$, 图 5 显示了平均归一化加权供需比 γ 的值随着 APA 算法的迭代次数 i 增加而不断增加, 最终收敛到最优解。当 APA 算法收敛到最优解时, 得到最优波束功率分配 P 。

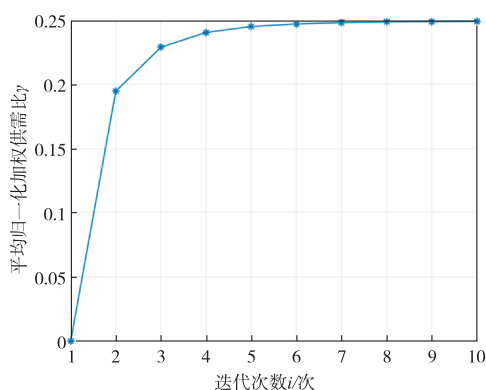


图 5 APA 算法收敛性示意图

Fig. 5 APA algorithm convergence diagram

根据图 4 中给出的地面小区优先级权重 Q 和流量需求 R , 可直接求得按点亮小区优先级权重 Q 和流量需求 R 成比例分配的策略。同时, 在图 6 中给出了基于平均分配, APA 算法, 两种比例分配策略下的总地面小区服务质量 F , 充分体现了所提 APA 算法的高效性。

进一步从图 7 中可以看出, 在卫星发射总功率更大时, 地面小区供需比更高, 这是因为在大功率条件下各波束可以提供给用户更高的信噪比, 进一步满足用户的通信需求。同时, 由于本文提出的 APA 算法可以提供点亮地面小区按需分配的功率, 在相同卫星功率条件下, 可以显著提高地面小区供需比。随着卫星波束的增加, 分配给单波束的功率减小, 同时波束间干扰加剧, 因此地面小区供需比

不断下降。

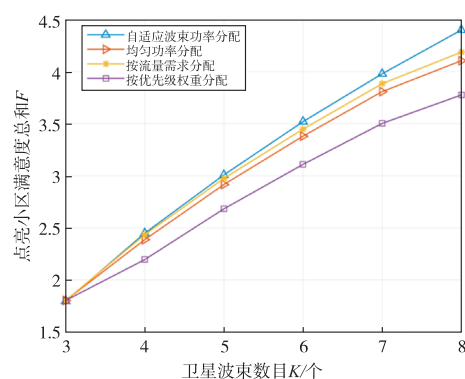
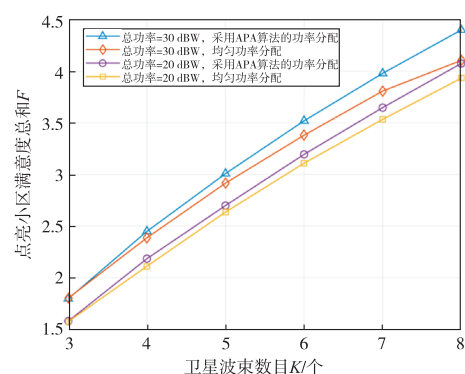
图 6 $P^{\text{TOL}} = 30 \text{ dBW}$, 不同功率分配下的总地面小区服务质量Fig. 6 $P^{\text{TOL}} = 30 \text{ dBW}$, total QoS of cells with different power allocations

图 7 总地面小区服务质量随着卫星波束数目的变化

Fig. 7 Total QoS versus the number of satellite beams

由图 8 可得, 在卫星发射总功率较大时, 地面小区供需比增高, 因此地面小区服务质量变高。与均匀功率分配相比, 随着卫星波束的增加, 所提 APA 算法的优势愈加明显。值得注意的是, 虽然随着点亮小区数目变多, 但是单一小区服务质量呈下降趋势, 因此卫星波束点亮小区的服务质量总和的上升趋势趋于缓慢。

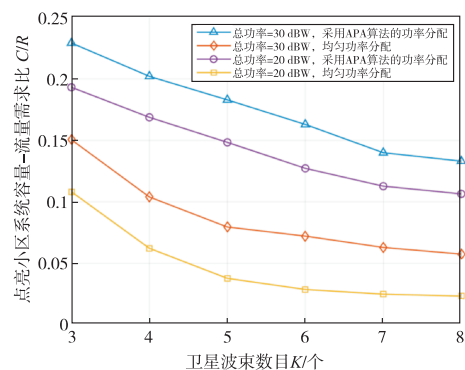


图 8 地面小区供需比随着卫星波束数目的变化

Fig. 8 Capacity-requirement ratio versus the number of satellite beams

4 结论

在地面小区优先级权重和通信流量需求差异较大的实际场景下,结合 PSO 优化算法,采用按需分配的思想设计了一种动态跳波束策略中的 APA 算法。该算法可以显著提高波束点亮小区的流量供需比和 QoS,最后通过仿真说明了所提算法的有效性。

参考文献:

- [1] ZHAO B, LIN M, CHENG M, et al. Outage constrained robust secure beamforming in cognitive satellite-aerial networks[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(8): 2708-2712.
- [2] JOROUGH V, Vázquez M á, PÉREZ-NEIRA A I. Generalized multicast multibeam precoding for satellite communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(2): 952-966.
- [3] 翟华. 融合 5G 的卫星移动通信系统[J]. 空间电子技术, 2020, 17(5): 71-76.
- [4] ZHANG C, ZHAO X D, ZHANG G X. Joint precoding schemes for flexible resource allocation in high throughput satellite systems based on beam hopping[J]. China Communications, 2021, 18(9): 48-61.
- [5] PANTHI S, BREYNAERT D, MCLAIN C, et al. Beam hopping-a flexible satellite communication system for mobility[C]//35th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 2017: 5413.
- [6] SHI S C, LI G X, LI Z Q, et al. Joint power and bandwidth allocation for beam-hopping user downlinks in smart gateway multibeam satellite systems[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(5): 1-11.
- [7] MALEKI S, CHATZINOTAS S, KRAUSE J, et al. Cognitive zone for broadband satellite communications in 17.3 - 17.7 GHz band[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(3): 305-308.
- [8] SHI D Y, LIU F, ZHANG T. Resource allocation in beam hopping communication satellite system[C]//2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), 2020: 280-284.
- [9] ALEGRE R, ALAGHA N, Vázquez-CASTRO M á. Heuristic algorithms for flexible resource allocation in beam hopping multi-beam satellite systems[C]//29th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2011), 2011: 8001.
- [10] TANG J Y, BIAN D M, LI G X, et al. Resource allocation for LEO beam-hopping satellites in a spectrum sharing scenario[J]. IEEE Access, 9(2): 56468-56478.
- [11] ANZALCHI J, COUCHMAN A, GABELLINI P, et al. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems; System simulation and performance comparison with non-hopped systems[C]//2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop, 2010: 248-255.
- [12] HAN H, ZHENG X Q, HUANG Q F, et al. QoS-equilibrium slot allocation for beam hopping in broadband satellite communication systems[J]. Wireless Networks, 2015, 21(8): 2617-2630.
- [13] DIAZ M A, COURVILLE N, MOSQUERA C, et al. Non-linear interference mitigation for broadband multimedia satellite systems[C]//2007 International Workshop on Satellite and Space Communications, 2007: 61-65.
- [14] DESTOUNIS A, PANAGOPOULOS A D. Dynamic power allocation for broadband multi-beam satellite communication networks[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(4): 380-382.
- [15] ESMIN A A A, COELHO R A, MATWIN S. A review on particle swarm optimization algorithm and its variants to clustering high-dimensional data[J]. Artificial Intelligence Review, 2015, 44(1): 23-45.

作者简介:李童(1994—),陕西渭南人,博士研究生。主要研究方向为卫星通信跳波束资源分配技术。E-mail: tongtongli@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者:姚如贵(1980—),安徽芜湖人,博士,教授。近五年主持国家自然科学基金面上项目、青年基金等 4 项国家级课题,主持陕西省自然科学基金基础研究计划面上项目、航空科学基金、航天科学基金、航天支撑基金、深圳市科技计划基础研究(自由探索)项目、留学人员科技活动项目择优资助(优秀类)等 6 项省部级课题,主持五院 CAST 创新基金、航天一院高校联合创新基金重点项目、下一代卫星移动通信重大专项横向课题等 8 项横向课题。主要研究方向为物理层安全、频谱共享、大规模天线、高速宽带数据链技术、AI+无线通信等。E-mail: yaorg@nwpu.edu.cn