

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314332

基于改进粒子群算法的多波束卫星带宽功率联合分配

尹旭东¹ 王恒² 行鸿彦¹ 蒋建瑞¹

(1.南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044; 2.国防科技大学第六十三研究所 南京 210007)

摘要: 由于卫星平台的限制,卫星转发器的功率和带宽资源都是有限的,资源利用率的提升就显得尤为重要。针对多波束卫星通信系统中的带宽功率联合分配问题,本文提出了一种基于改进粒子群算法的带宽功率联合分配方案。该方案以最小系统总二阶业务拒绝量为优化目标,通过引入了惯性权重、局部抑制机制和罚函数的改进的粒子群算法求其最优解,最终在系统的总容量和用户获取容量的公平性之间取得平衡。仿真结果表明,与传统算法进行对比,本文所提出的基于改进粒子群算法的方法能够显著提高多波束卫星通信系统的带宽功率联合分配的效果。

关键词: 多波束卫星;粒子群算法;波束间干扰;罚函数;带宽功率联合分配

中图分类号: TN927.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Joint bandwidth and power allocation of multi-beam satellite based on improved particle swarm optimization algorithm

Yin Xudong¹ Wang Heng² Xing Hongyan¹ Jiang Jianrui¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. The Sixty-third Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Due to the limitation of the satellite platform, the bandwidth and power resources of the satellite transponder are limited, and the improvement of resource utilization is particularly important. Aiming at the problem of joint power and bandwidth allocation in multi-beam satellite communication system, this paper proposes a joint bandwidth and power allocation scheme based on improved particle swarm optimization algorithm. The scheme aims to minimize the total second-order service rejection of the system. The optimal solution is obtained by introducing an improved particle swarm optimization algorithm with inertia weight, local suppression mechanism and penalty function. Finally, a balance between the total capacity of the system and the fairness of the user's access capacity is achieved. The simulation results show that compared with the traditional algorithm, the method based on the improved particle swarm optimization algorithm proposed in this paper can significantly improve the effect of joint bandwidth and power allocation of multi-beam satellite communication system.

Keywords: multi-beam satellite; PSO; inter-beam interference; penalty function; joint bandwidth and power allocation

0 引言

在卫星通信系统的用户人数和需求日益增加的背景下,对于提高卫星通信系统性能和效率的研究变得尤为重要。其中,如何高效地利用功率和带宽资源,是实现高性能卫星通信的核心。多波束卫星通信系统中每个波束可以独立指向不同的用户或地区,从而提供更大的容量和更高的通信质量。然而,波束之间存在相互干扰的问题,如果不合理分配功率和带宽,可能导致系统性能下降和用户体验不佳。为了解决不断增长的业务需求与有限带宽功率资源之间的矛盾,需要从系统层面优化资源配置。在带宽和功率

给定的条件下,根据用户的业务申请量和信道条件等条件合理地为用户分配资源,以满足更多用户的业务需求和提高系统的总体性能。因此,本文针对考虑波间干扰的多波束卫星带宽功率联合分配问题进行了研究。

在功率和带宽资源分配的问题上,相关领域已经进行了一定的研究。针对多波束卫星通信系统,文献[1]聚焦于Rician衰落信道模型下的探讨,提出了一种功率分配问题。文献[2]在考虑如何降低衰落对用户获得容量影响的基础上,给出了一种动态与静态的带宽分配算法。文献[3]以用户获得容量与其业务申请量之比的最小值的最大化为研究目标,提出了一种带宽和载波的联合分配算法。

收稿日期:2023-08-09

然而,上述研究或多或少都有些考虑不到的问题,为了在系统的总容量和用户获取容量的公平性之间实现一个平衡,文献[4-6]以系统总二阶业务拒绝量的最小化为目标进行了研究,分别提出了一种最优的带宽和功率分配算法。二阶业务拒绝量即用户业务申请量与其获得容量之差的平方,为了最小系统总二阶业务拒绝量,业务申请量大的用户将获得相对较大的容量,提高了用户获得容量的公平性。文献[7]针对 Ka 波段信号受雨衰影响下的功率分配问题,以最小系统总二阶业务拒绝量为优化目标进行了研究。文献[8]以最小系统总二阶业务拒绝量为优化目标,研究了考虑时延和对地干扰功率的功率带宽联合分配。以上针对最小系统总二阶业务拒绝量为优化目标的算法研究都存在着复杂度相对较高的问题。

近年来,粒子群算法凭借其控制参数较少、易于实现、且并行性强等优点得到广泛应用。文献[9]采用一种改进的粒子群(particle swarm optimization, PSO)优化算法用于搜索卫星通信网络中的博弈均衡解。文献[10]基于 PSO 算法提出了一种时频资源的联合分配方法,旨在实现用户节点的效用总和的最大化。粒子群算法优点虽多,但其却有着后期收敛慢,易陷入局部最优解的缺点。因此,本文对基本粒子群算法进行了优化改进,同已有的改进的粒子群算法一样引用了动态的惯性权重策略,但同时本文根据需求设计了一种动态罚函数,每次迭代根据违反约束条件粒子的比例动态调整惩罚程度。

综上所述,本文以最小系统总二阶业务拒绝量为优化目标,研究考虑波束间干扰的多波束卫星通信系统带宽功率联合分配问题。通过改进的粒子群算法对该问题进行求解,得出一种优化后的联合分配方案,并通过实验和仿真验证其有效性。

1 问题模型

设一个 FDMA 多波束卫星通信系统有 K 个波束 B_i , $i \in \{1, 2, \dots, K\}$, 系统总的功率资源和带宽资源分别记为 P_{total} 和 W_{total} 。波束 B_i 的业务申请量记为 T_i , 分配给波束 B_i 的功率和带宽分别记为 P_i 和 W_i 。其分配的功率 P_i 发射到第 i 个波束覆盖区域的链路衰减因子记为 α_i^2 , 同时,由于波束旁瓣的存在,发射到波束 j 的链路衰减因子为 α_{ji}^2 , 则第 i 个波束 B_i 受到的总干扰 I_i^{total} 为^[11]:

$$I_i^{\text{total}} = \sum_{j=1, j \neq i}^K P_j \alpha_{ij}^2 \quad (1)$$

由以上条件可知,第 i 个波束在加高斯白噪声信道下的容量公式 C_i 为:

$$C_i = W_i \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_i^2 P_i}{W_i N_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^K P_j \alpha_{ij}^2} \right) \quad (2)$$

用 $h_{ji} = \alpha_{ji}^2 / \alpha_i^2$ 表示波束 i 对波束 j 的干扰系数, $i, j \in \{1, 2, \dots, K\}$, 为了更好的表示系统中各波束间的干扰,引

入波束间干扰矩阵 \mathbf{H} :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1K} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{K1} & h_{K2} & \cdots & h_{KK} \end{bmatrix} \quad (3)$$

\mathbf{H} 由干扰系数 h_{ij} 组成, $i = j$ 时 $h_{ij} = 0$ 。此时,第 i 个波束在加高斯白噪声信道下的容量公式 C_i 就可以表示为:

$$C_i = W_i \log_2 \left(1 + \frac{P_i}{W_i N_0 / \alpha_i^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^K P_j h_{ij}} \right) \quad (4)$$

根据式(2)和(4)可以得知,波束 B_i 获得的容量随着分配给其的功率 P_i 和带宽 W_i 的增加而增加,由于波束间干扰的存在,当向其它波束分配的功率增加时,波束 B_i 所得到的容量随之减少。

为了保证系统总容量和用户获得容量的公平性,保证波束实际获得的资源量与业务申请量相近,本文以最小系统总二阶业务拒绝量为优化目标,在不损失功率和带宽资源的前提下,将多波束卫星带宽功率资源联合分配问题建模为带约束的数学优化问题^[11-13]:

$$\min_{\{P_i, W_i\}} \sum_{i=1}^K (T_i - C_i)^2 \quad (5)$$

s. t.

$$C_i = W_i \log_2 \left(1 + \frac{P_i}{W_i N_0 / \alpha_i^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^K P_j h_{ij}} \right) \leq T_i \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^K P_i \leq P_{\text{total}} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^K W_i \leq W_{\text{total}} \quad (8)$$

约束条件式(6)表示一个波束获得的总容量不应该超过其业务申请量,以防止有限的功率和带宽资源出现浪费。约束条件式(7)和(8)代表所有波束分配到的总功率和总带宽不应该超过系统的总功率和总带宽。

2 粒子群算法设计

2.1 标准粒子群算法

粒子群算法以其并行性强、收敛速度快、控制参数较少、易于实现等特点而受到广泛关注。通过模拟粒子在搜索空间中的移动和信息交流过程,粒子群算法能够在复杂的多变量问题中找到全局最优解。

在粒子群算法中,粒子在寻求最优位置的途中会陆续的调整自身的位置与速度。假设粒子的搜索空间为 S , 群体中粒子的数目为 N , 每一个粒子都包含 3 种属性,分别为:位置、速度和自身历史最优位置。粒子的 3 种属性依次用 \mathbf{X} 、 \mathbf{V} 和 \mathbf{P} 来表示,则在第 t 次迭代时第 i 个粒子的位置为 $\mathbf{x}_i^t = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iL})$, 速度为 $\mathbf{v}_i^t = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iL})$, 自身历史最优位置为 $\mathbf{p}_i^t = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iL})$, 其中 L 表示搜索空间的维度,粒子的位置表示粒子 i 在当前迭代次数 t

时优化目标的解,位置和速度在进行下一次迭代时进行如下更新^[16]:

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = \omega \mathbf{v}_i^t + c \cdot r [\mathbf{p}_i^t - \mathbf{x}_i^t] + c_g \cdot r_g [\mathbf{p}_{i_g}^t - \mathbf{x}_i^t] \quad (9)$$

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1} \quad (10)$$

式中: ω 为惯性权重, ω 值越大,上一次迭代的速度的影响就越大。 c 和 c_g 被称为学习因子, c 影响个体部分, c_g 影响群体部分。 r 和 r_g 表示分布在 $[0,1]$ 之间的随机数, $\mathbf{p}_{i_g}^t$ 表示迭代到目前为止所有粒子中的最优位置。此外,为了防止粒子做无规律的运动,在算法中将粒子的速度限制在一定的范围 $[\mathbf{v}_{\min}, \mathbf{v}_{\max}]$ 内,当粒子的速度超过限制范围,就把粒子的速度重新设置,通常设置为粒子速度范围的边界, $\mathbf{v}_{\min} = -\mathbf{v}_{\max}$ 。

在式(9)的右侧由3部分组成,第1部分为“动量”部分,反映了粒子运动的习惯,第2部分和第3部分分别为“认知”和“社会”部分,反应了粒子向自身和群体历史最优的位置靠近的趋势^[17]。

2.2 改进的粒子群算法

标准粒子群算法很容易遇到问题,比如容易早熟,从而陷入局部最优解,难以兼顾到算法对于不同时期的不同需求。针对以上问题,本节提出了相应的解决办法。

在前文中提到的惯性权重 ω 很难使算法能够兼顾到不同时期对于搜索能力的需求,只能够在全局探索能力和局部开发能力两者之间做出一个取舍,使得算法很难得到理想的优化目标值。为了解决此问题,动态的调整惯性权重的取值,文献^[17]提出了一种新的策略:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{t}{T_{\max}} (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \quad (11)$$

式中: ω_{\max} 表示惯性权重的最大值, ω_{\min} 则表示惯性权重的最小值, t 和 T_{\max} 分别表示算法的当前迭代次数和最大迭代次数。当迭代次数逐渐增加时, ω 随之线性的减少,既保证了前期的全局探索能力,也保证了后期的局部开发能力。 ω_{\max} 和 ω_{\min} 的取值通常选取为0.9和0.4^[18]。

在多波束卫星通信系统带宽功率联合分配的问题中,为了克服约束条件的限制,应用粒子群算法,本文引入了自适应罚函数的机制^[19]。当约束条件不满足时,罚函数的值较大,当满足约束条件时,罚函数值为0。此外,相较于其他针对约束条件的处理办法,罚函数法的计算复杂度较小。自适应罚函数是一种用于处理约束问题的有效方法,能够将约束条件纳入目标函数中,并通过调节罚函数的惩罚参数来平衡目标函数的优化和约束条件的满足,本文设计的自适应罚函数公式如下:

$$\Phi(\mathbf{P}, \mathbf{W}) = e^{m(1-r)} \left[\sum_{i=1}^K u_i(\mathbf{P}, \mathbf{W}) + v(\mathbf{P}, \mathbf{W}) + \omega(\mathbf{P}, \mathbf{W}) \right] \quad (12)$$

$$u_i(\mathbf{P}, \mathbf{W}) = \begin{cases} (T_i - C_i)^2, & T_i < C_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (13)$$

$$v(\mathbf{P}, \mathbf{W}) = \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^K P_i - P_{\text{total}} \right)^2, & \sum_{i=1}^K P_i > P_{\text{total}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$\omega(\mathbf{P}, \mathbf{W}) = \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^K W_i - W_{\text{total}} \right)^2, & \sum_{i=1}^K W_i > W_{\text{total}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中: m 为常数, r 表示种群中满足约束条件的粒子比例, $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_K]$, $\mathbf{W} = [W_1, W_2, \dots, W_K]$ 。

在算法的迭代过程中,通过监测违反约束条件粒子的比例来自适应地调整罚函数的惩罚参数。当违反约束条件的粒子较少时,罚函数的惩罚参数较小,以鼓励探索更广泛的搜索空间。相反,当违反约束条件的粒子较多时,罚函数的惩罚较大,以限制搜索空间,使其更加集中在可行解的区域。将罚函数用到本文所建立的数学模型中,可将带约束条件的优化目标函数转换成如下不带约束条件的优化目标函数:

$$\min_{(\mathbf{P}, \mathbf{W})} \left[\sum_{i=1}^K (T_i - C_i)^2 + \Phi(\mathbf{P}, \mathbf{W}) \right] \quad (16)$$

s. t.

$$P_i \in \mathbb{R}, 0 \leq P_i \leq P_{\text{total}}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (17)$$

$$W_i \in \mathbb{R}, 0 \leq W_i \leq W_{\text{total}}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (18)$$

通过引入自适应罚函数,能够有效地处理问题中的约束条件,将问题中的约束条件纳入到目标函数中。可以帮助优化算法在搜索过程中自动调整约束的权重,使得搜索能够更好地收敛到满足约束条件的最优解。

2.3 算法的实现

粒子的数目决定了算法搜索空间的覆盖程度和计算复杂度。粒子群大小的选择应该综合考虑问题的特点、计算资源的限制以及算法的性能需求。合理选择初始位置和速度可以帮助算法更好地探索搜索空间,并快速找到较优解。以下为较常用的一种方法^[20]:

$$\mathbf{x}_i^0 = \mathbf{x}_{\min} + r(\mathbf{x}_{\max} - \mathbf{x}_{\min}) \quad (19)$$

$$\mathbf{v}_i^0 = \mathbf{v}_{\min} + r(\mathbf{v}_{\max} - \mathbf{v}_{\min}) \quad (20)$$

式中: r 为 $[0,1]$ 范围内的随机数, \mathbf{x}_{\max} 和 \mathbf{v}_{\max} 分别表示搜索空间中粒子位置和速度的上界, \mathbf{x}_{\min} 和 \mathbf{v}_{\min} 分别表示搜索空间中粒子位置和速度的下界。

如果选择的位置的上界和下界不合适,可能会导致粒子无法覆盖到全局最优解所在的区域,从而限制了算法的搜索能力。如果位置的上界和下界设置得太小,搜索空间会被限制在较小的区域,可能会使算法在进入局部最优解时提早收敛。相反,如果位置的上界和下界设置得太大,搜索空间会变得过于广泛,可能会使算法的收敛性和精确性下降。同时,通过调整位置的上界和下界可以控制算法在探索和开发之间的平衡,以获得更好的搜索结果。不同问题的搜索空间可能具有不同的特性,根据问题的特点,可以根据经验或问题的约束条件来选择合适的位置上界和下界。

速度的上界和下界限制了粒子在搜索空间中的移动速度范围。适当选择速度的上界和下界可以控制粒子的移动范围,避免过快或过慢的移动,以确保算法能够充分搜索整个解空间。如果速度的上界和下界设置得太小,粒子的移动速度受限,可能导致算法收敛速度过慢,粒子的移动将受到过多限制,无法有效地搜索解空间。相反,如果速度的上界和下界设置得太大,粒子的移动速度较快,可能会降低算法的搜索精度和稳定性,导致粒子跳过最优解附近的区域,错过潜在的更好解。因此,需要平衡收敛性和多样性的要求来选择合适的速度上界和下界。

针对多波束卫星通信系统带宽功率联合分配问题,本文提出的改进的 PSO 算法的整个流程如下:

- 1) 初始化粒子群,确定粒子群的大小和维度,根据式(19)和(20)初始化每个粒子的位置和速度。
- 2) 根据式(16)计算每个粒子的适应度值。
- 3) 根据粒子的适应度值,更新 p_i^t 和 p_{ig}^t 。
- 4) 利用式(9)和(10)更新每个粒子在 $t+1$ 时刻下的速度和位置。
- 5) 检查是否满足停止条件,例如达到预定的迭代次数或达到了足够好的解。如果满足停止条件,则算法结束;不满足条件就跳至步骤 2) 继续进行迭代。

在每次迭代中,粒子群算法搜索解空间都是经过粒子的速度和位置的更新来进行的。通过个体和社会经验的引导,粒子逐渐收敛于全局最好解,这样就得到了问题的最优或近似最优解。

3 仿真结果与分析

在本文所建立的仿真系统中,多波束卫星的总带宽为 500 MHz,总功率为 200 W,波束的数量为 10。将各波束的业务申请量分别设置为 80、100、120、140、160、180、200、220、240、260 Mbps。根据文献[21]设定波束间的干扰系数为:

$$h_{ij} = \begin{cases} 0.03, & \text{如果 } |j-i|=1 \text{ 或 } |j-i \pm 10|=1 \\ 0.02, & \text{如果 } |j-i|=2 \text{ 或 } |j-i \pm 10|=2 \\ 0.01, & \text{如果 } |j-i|=3 \text{ 或 } |j-i \pm 10|=3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

设每个波束的链路衰减因子与噪声功率谱密度的比值为 $\alpha_i^2/N_0 = 5 \times 10^6 (1 - \sum_{j=1, j \neq i}^K h_{ji})$, $i \in \{1, 2, \dots, K\}$ 。

在仿真分析中,设定粒子群的规模为 600,最大迭代次数为 800,惯性权重的最大值和最小值分别为 0.9 和 0.4,学习因子 c 和 c_g 都为 3.0,速度最大值分别为 1.0 和 2.5,最小值为其相反数,分别对应功率和带宽,罚函数中的 m 设置为 250。

为了验证本文提出的改进的 PSO 联合分配算法的有效性,将之与以下两种资源分配算法进行对比^[22]。

1) 均匀带宽功率分配算法^[23]。该算法把系统的总带宽资源和总功率资源平均的分配给每个用户。该算法使得系统资源管理变得简单,确保了公平性,但用户可能无法获得实际需要的资源用量,且系统总容量的利用率较低,会造成资源的浪费。

2) 比例带宽功率分配算法^[5]。该算法把系统的总带宽资源和系统总功率资源按照每个用户业务申请量占总业务申请的比例分配给每个用户,可以更加有效地利用系统总容量。

图 1 所示为不同分配算法为每个波束分配的容量。均匀带宽功率分配算法把系统资源平均分配给每个波束,比例带宽功率分配算法把系统资源按每个波束的业务申请量占总业务申请量的比例分配给每个波束。本文提出的改进的 PSO 联合分配算法根据波束的业务申请量动态的分配系统资源,当波束的业务申请量较大时,为其分配更多的资源,而当波束的业务申请较小时,为其分配的资源也相对较小。虽然比例带宽功率分配算法相较均匀带宽功率分配算法可以更加有效地利用系统总容量,但是从表 1 可以看到本文提出的改进的 PSO 联合分配算法获得的系统总容量更大,资源利用的更加充分。

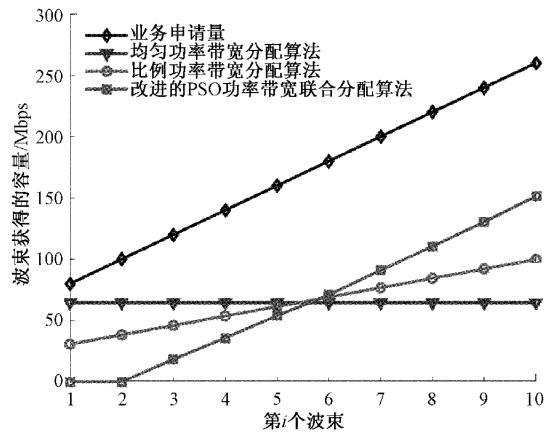


图 1 3 种分配算法为每个波束分配的容量

表 1 3 种分配算法的系统总容量

带宽功率分配算法	$\sum C_i / \text{Mbps}$
均匀带宽功率分配	647.30
比例带宽功率分配	652.56
本文提出的改进的 PSO 算法	662.50

图 2 所示为不同分配算法下每个波束的二阶业务拒绝量。得益于本文提出的改进的 PSO 联合分配算法充分考虑了每个波束获得资源的公平性,并且使资源利用的更加充分,与另外两种算法相比,当波束的业务申请量小的时候,其二阶业务拒绝量要略大,当波束的业务申请量大的时候,其二阶业务拒绝量却小了很多。通过观察表 2 中的系统总二阶业务拒绝量可以看出,本文提出的改进的 PSO 联合分配算法的性能更好,资源分配效果更好。

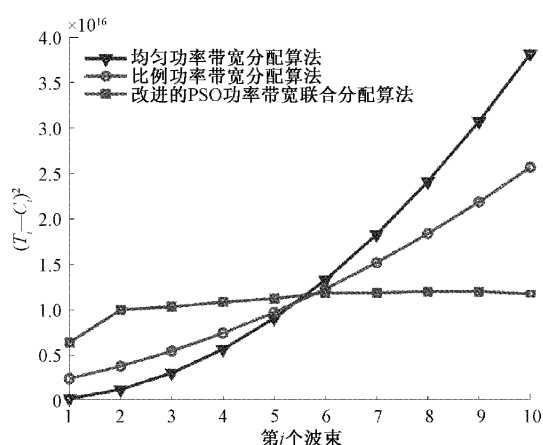


图2 3种分配算法中每个波束的系统二阶业务拒绝量

表2 3种分配算法的系统总二阶业务拒绝量

带宽功率分配算法	$\sum(T_i - C_i)^2$
均匀带宽功率分配	1.44×10^{17}
比例带宽功率分配	1.22×10^{17}
本文提出的改进的 PSO 算法	1.08×10^{17}

4 结 论

本文以最小系统总二阶业务拒绝量为优化目标,通过改进的粒子群算法解决考虑波束间干扰的多波束卫星通信系统带宽功率联合分配的问题,并进行了仿真实验。仿真结果表明,相较于传统的均匀和比例分配算法,本文提出的改进的 PSO 联合分配算法在资源分配上更加公平,系统总二阶业务拒绝量更小,系统总容量更大。

参考文献

- [1] LETZEPIS N, GRANT A J. Capacity of the multiple spot beam satellite channel with Rician fading [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(11): 5210-5222.
- [2] CELANDRONI N, DAVOLI F, FERRO E. Static and dynamic resource allocation in a multiservice satellite network with fading [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2003, 21(4-5): 469-487.
- [3] BARCELÓ-LLADÓ J E, VAZQUEZ-CASTRO M A, LEI J, et al. Distributed power and carrier allocation in multibeam satellite uplink with individual SINR constraints [C]. GLOBECOM 2009-2009 IEEE Global Telecommunications Conference, IEEE, 2009: 1-6.
- [4] CHOI J P, CHAN V W S. Optimum power and beam allocation based on traffic demands and channel conditions over satellite downlinks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005,

4(6): 2983-2993.

- [5] QI F, GUANGXIA L, SHAODONG F, et al. Optimum power allocation based on traffic demand for multi-beam satellite communication systems [C]. 2011 IEEE 13th International Conference on Communication Technology. IEEE, 2011: 873-876.
- [6] PARK U, KIM H W, OH D S, et al. A dynamic bandwidth allocation scheme for a multi-spot-beam satellite system [J]. ETRI Journal, 2012, 34(4): 613-616.
- [7] 谭文彬,林基明,王波. Ka 波段多波束卫星联合优化功率分配算法 [J]. 桂林电子科技大学学报, 2017, 37(6): 452-457.
- [8] 司闯. 基于波束干扰与跨层设计的多波束卫星通信系统资源分配算法研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [9] 张琴芳. 一种基于博弈论和跨层机制的卫星带宽资源分配方法 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [10] 赵鹏博,吕娜,陈柯帆. 粒子群优化的时频联合资源分配算法 [J]. 传感器与微系统, 2016, 35(5): 135-138, 145.
- [11] 史煜,张邦宁,郭道省,等. 考虑波束间干扰的多波束卫星功率带宽联合分配算法 [J]. 计算机工程, 2018, 44(2): 103-106, 113.
- [12] 李君,叶兰兰,金宁,等. OFDMA 系统中容量最大化的资源分配算法 [J]. 计算机工程, 2014, 40(6): 49-52.
- [13] 贾录良,刘爱军,陈浩,等. 具有波束选择的波束间功率带宽联合分配算法 [J]. 军事通信技术, 2014, 35(2): 45-49.
- [14] DING G, WU Q, WANG J. Sensing confidence level-based joint spectrum and power allocation in cognitive radio networks [J]. Wireless Personal Communications, 2013, 72: 283-298.
- [15] BOYD S P, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [16] 丁同,傅晓锦. 基于改进粒子群优化算法和极限学习机的锂离子电池健康状态预测 [J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(5): 163-173.
- [17] 李梦娟. 局域配电网对电动汽车接纳能力评估研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [18] SHI Y, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization [C]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406), IEEE, 1999, 3: 1945-1950.
- [19] XU Y, LI G. Optimal and robust interference efficiency maximization for multicell heterogeneous networks [J]. IEEE Access, 2019, 7: 102406-102416.

- [20] WANG D, TAN D, LEI L. Particle swarm optimization algorithm: An overview [J]. *Soft Computing*, 2018, 22(2):387-408.
- [21] 司闯, 李鹏, 史传胜, 等. 多波束卫星通信系统波束干扰下的资源分配策略研究[J]. *南京信息工程大学学报:自然科学版*, 2022, 14(2):233-240.
- [22] WANG H, LIU A, PAN X, et al. Optimization of power allocation for a multibeam satellite communication system with interbeam interference[J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2014, DOI:10.1155/2014/469437.
- [23] WANG H, LIU A, PAN X, et al. Optimization of power allocation for multiusers in multi-spot-beam satellite communication systems [J]. *Mathematical Problems in engineering*, 2014, DOI: 10.1155/2014/780823.

作者简介

尹旭东, 硕士研究生, 主要研究方向为卫星通信。

E-mail:2871831705@qq.com

王恒(通信作者), 博士, 副研究员, 主要研究方向为卫星通信。

E-mail:406051616@qq.com