

# 基于两阶段帕累托优化的卫星 下行链路功率分配方法

王蔚龙<sup>1</sup>, 李勇军<sup>1</sup>, 赵尚弘<sup>1</sup>, 辛 宁<sup>2</sup>, 赵海燕<sup>1</sup>, 张泰江<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077; 2. 中国空间技术研究院通信卫星事业部, 北京 100094)

**摘 要:** 多波束卫星下行链路在实现高传输速率和低功耗之间相互制约, 是影响多波束卫星系统通信性能的重要因素之一. 本文提出两阶段多波束卫星下行链路多目标功率分配方法, 建立多波束卫星下行链路功率分配模型, 第一阶段采用凸优化算法实现下行链路传输速率的优化匹配, 将传输速率匹配的解作为第二阶段启发式算法的初始解, 得出的帕累托解可表示优化后的性能, 为链路传输速率和功耗提供了平衡点. 研究表明, 在相同传输速率条件下, 两阶段优化方法将链路功耗降低了 17.6%, 且收敛速度较快.

**关键词:** 功率分配; 多波束卫星; 传输速率匹配; 启发式算法; 凸优化; 帕累托前沿; 多目标优化

**中图分类号:** TN927      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2021)06-1101-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.12263/DZXB.20200609

## Power Allocation Based on Two-Stage Pareto Optimization in Satellite Downlink

WANG Wei-long<sup>1</sup>, LI Yong-jun<sup>1</sup>, ZHAO Shang-hong<sup>1</sup>, XIN Ning<sup>2</sup>, ZHAO Hai-yan<sup>1</sup>, ZHANG Tai-jiang<sup>1</sup>

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

2. Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In the multibeam satellite downlink, the realization of high data rate and low power consumption restrict each other, which is one of the important factors that affect the communication performance of the multibeam satellite system. The two-stage multibeam satellite downlink multi-objective power allocation method is proposed. The multibeam satellite downlink power allocation model is built. In the first stage, a convex optimization algorithm is used to achieve downlink data rate matching, and the data rate matching solution is employed as the initial solution of heuristic algorithm in the second stage. The optimized performance is represented by the obtained Pareto solution, which provides a balance for the link data rate and power consumption. The numerical results show that under the same data rate, two-stage optimization method reduces link power consumption by 17.6% and the propose method converges fast.

**Key words:** power allocation; multi-beam satellite; data rate matching; heuristic algorithm; convex optimization; Pareto frontier; multi-objective optimization

## 1 引言

随着通信技术的不断发展, 卫星系统需要动态灵活的自适应系统为用户提供大容量、快响应的多媒体交互服务. 业务量的增加使天上资源受限问题更为突出, 已经成为目前阻碍空天地网络一体化和信息速率高速化发展的严重瓶颈<sup>[1]</sup>. 多波束卫星系统在资源分配, 覆盖范围和路由选择方面具有较高灵活性, 是未来

高吞吐量卫星系统的研究重点之一<sup>[2]</sup>. 在星上功率资源稀缺的背景下, 需要合理分配受限的功率资源来充分发挥多波束技术的潜能, 而且功率分配应当考虑实际的流量需求, 优化卫星传输功率性能的同时满足用户传输速率需求<sup>[3]</sup>.

目前已有一些工作通过基于认知通信技术<sup>[4]</sup>、能效优化策略<sup>[5]</sup>、自适应编码调制策略<sup>[6]</sup>和容量满意度因子<sup>[7]</sup>的功率分配方法在不同场景下求解卫星通信资

源分配问题.但是上述工作在优化资源分配的同时未涉及最小化卫星功耗.星上功率资源紧缺,对卫星的寿命和重量具有直接的影响<sup>[1]</sup>.因此需要在优化系统传输性能的同时,引入降低功耗的量化函数,以同时响应链路的流量需求和功率消耗.

本文研究了多波束卫星下行链路功率资源分配问题,引入满意度因子(Satisfaction Factor, SF),提出了一种两阶段多目标功率优化方法,旨在满足卫星下行链路的通信速率需求的同时最小化卫星总功耗.基于启发式算法确定了传输速率和功耗之间的优化折衷曲线,通过仿真分析验证了两阶段优化方法的有效性.

## 2 系统模型与问题描述

### 2.1 卫星下行链路通信场景

考虑具有  $K$  个波束的高吞吐量多波束卫星下行链路系统,第  $k$  个波束覆盖范围内有  $L$  个固定用户.假设使用在 Ka 波段工作的 GEO 卫星,为卫星载荷配备多端口放大器等必要模块来实现灵活的功率分配<sup>[8]</sup>.参考实际应用情景,假设频率复用因子为 4,卫星下行链路的总带宽平分 4 份,每一份的带宽再进一步平分到每个波束<sup>[9]</sup>.波束布局如图 1 所示,覆盖范围内有 30 个波束.

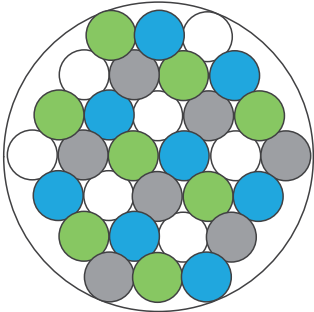


图1 卫星覆盖范围内的波束布局

假设卫星下行链路信道为阴影 Rician 分布,卫星信道功率增益概率密度函数如下所示<sup>[10]</sup>

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

其中  $h$  代表通道功率增益,  ${}_1F_1(\cdot, \cdot, \cdot)$  为合流超几何函数<sup>[11]</sup>,  $\alpha = [2bm / (2bm + \Omega)]^m / 2b$ ,  $\delta = \Omega / [2b(2bm + \Omega)]$ ,  $\beta = 1/2b$ .  $2b$  是散射分量的平均功率,  $\Omega$  是平均功率,  $m$  是 Nakagami 衰落参数. 将式(1)重写为<sup>[10]</sup>:

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

### 2.2 多目标功率分配问题

带宽和功率资源是卫星下行链路中需要被分配的资源,  $B_i$  为链路可用带宽,根据频率复用因子等分为 4 份,每一份可用带宽由每条波束下的  $L$  个载波平均共

享,载波是用于传输数据流的基本频谱实体.用  $B_u$  表示载波带宽,则  $B_u = B_i / (4L)$ .  $P_i$  表示下行链路总功率,将  $P_i$  分配给不同的卫星波束.如果  $P_{k,l}$  表示卫星分配给第  $k$  个波束的第  $l$  个载波的功率,则约束条件为

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L P_{k,l} \leq P_i \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^L P_{k,l} \leq P_k^{\max} \quad (4)$$

其中  $P_k^{\max}$  表示第  $k$  个波束的最大功率,系统对卫星下行链路总功率和单个波束的功率加以限制.优化变量是  $P_{k,l}$ ,波束转发器中放大器是相同的,每个波束中分配给用户的功率受到限制.由于分配给载波的功率与相应的带宽成比例,所以需要为波束中带宽相同的载波分配相等的功率,功率被平均分配至光束下的载波.优化变量转变为卫星第  $k$  个波束的功率  $P_k$ ,  $P_{k,l} = P_k / L$ ,则式(3)和式(4)可简化为

$$\sum_{k=1}^K P_k \leq P_i \quad (5)$$

$$P_k \leq P_k^{\max} \quad (6)$$

多目标优化问题旨在最小化卫星下行链路功耗,同时满足链路传输速率需求.卫星下行链路总功耗为优化目标之一,而另一个优化目标是 SF. SF 是评估卫星系统传输速率需求满意度的参数,它的值越大,系统提供的传输速率就越接近所需的传输速率,系统性能越好.通过优化 SF 来改善传输速率性能, SF 为<sup>[12]</sup>:

$$\text{SF} = \frac{\sum_{k=1}^K \min(R_k^o, R_k^r)}{\sum_{k=1}^K R_k^r}, \quad k = 1, \dots, K \quad (7)$$

其中,  $R_k^o$  表示第  $k$  个波束提供的传输速率,  $R_k^r$  表示第  $k$  个波束中的用户需要的传输速率,为用户提供的传输速率应不低于用户需要传输速率的一半.假设  $R_k^r$  已知,  $K$  维向量  $\mathbf{P}$  是优化问题的解集,为了实现卫星下行链路功耗与链路传输速率之间的权衡,将多目标功率分配问题表示如下:

$$\min \begin{cases} f_1(\mathbf{P}) = \sum_{k=1}^K P_k \\ f_2(\mathbf{P}) = 1/\text{SF} = \frac{\sum_{k=1}^K R_k^r}{\sum_{k=1}^K \min(R_k^o, R_k^r)} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^K P_k \leq P_i \quad (9a)$$

$$0 \leq P_k \leq P_k^{\max} \quad (9b)$$

$$R_k^o \geq \frac{R_k^r}{2}, \quad k = 1, \dots, K \quad (9c)$$

其中

$$R_k^o(\mathbf{P}) = B_u C(P_k), k = 1, \dots, K \quad (10)$$

目标函数  $f_2$  是 SF 的倒数.  $R_k^o(\mathbf{P})$  用表示功率效用的带宽归一化的容量  $C(P_k)$  来确定,  $C(P_k)$  如下所示

$$C(P_k) = \log(1 + g_k P_k) \quad (11)$$

其中  $g_k$  是第  $k$  个波束的下行信道功率增益:

$$g_k = \frac{G_s(e) G_c(k) h_k \lambda}{(4\pi d)^2 N_0} \quad (12)$$

其中  $d$  是传输距离,  $N_0$  是噪声功率,  $\lambda$  是波长,  $G_s(e)$  和  $G_c(k)$  分别是卫星天线的功率增益和第  $k$  个波束中用户天线的功率增益,  $h_k$  是下行链路的信道功率增益<sup>[13]</sup>. 假设系统提供的传输速率不超过系统的需求量, 且只有一个用户访问波束的每个载波, 则式(8)中的问题  $f_2$  可简化为:

$$\min \frac{R_k^r}{B_u \log(1 + g_k P_k)} \quad (13)$$

上式中的功率分配问题是 NP-hard<sup>[14]</sup>.

### 3 基于凸优化和启发式算法的两阶段功率分配方法

#### 3.1 基于凸优化的链路传输速率匹配

优化卫星下行链路传输速率, 并将此作为求解式(8)中多目标功率分配问题的初始值. 根据式(13)可得第一阶段传输速率匹配问题:

$$\min f_3(\mathbf{P}) = \frac{R_k^r}{\min(R_k^o, R_k^r)} \quad (14)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^K P_k \leq P_t \quad (15a)$$

$$0 \leq P_k \leq P_k^{\max} \quad (15b)$$

$$R_k^o \geq \frac{R_k^r}{2}, k = 1, \dots, K \quad (15c)$$

上述问题的 Hessian 矩阵半正定,  $f_3$  为凸函数. 采用凸优化算法计算上述功率分配问题的最优解, 定义拉格朗日函数如下:

$$L(P_k, \omega, \mathbf{v}) = \frac{R_k^r}{B_u \log_2(1 + g_k P_k)} + \omega \left( \sum_{k=1}^K P_k - P_t \right) + \mathbf{v} (P_k - P_k^{\max}) \quad (16)$$

该问题的 KKT 条件表示如下<sup>[15]</sup>:

$$\frac{\partial L}{\partial P_k} = \frac{-R_k^r g_k}{\ln 2 B_u (1 + g_k P_k) \log_2^2(1 + g_k P_k)} + \omega + \mathbf{v} = 0 \quad (17)$$

$$\omega \left( \sum_{k=1}^K P_k - P_t \right) = 0 \quad (18)$$

$$\mathbf{v} (P_k - P_k^{\max}) = 0 \quad (19)$$

通过式(17), 利用牛顿法可求出优化解  $P_k$ , 对  $P_k^m$  使用泰勒展开, 得到二阶近似的结果如下:

$$\frac{\partial L}{\partial P_k} + \frac{\partial^2 L}{\partial P_k^2} (P_k^{m+1} - P_k^m) = 0 \quad (20)$$

其中上标  $m$  代表第  $m$  次迭代. 根据式(20), 计算功率的迭代公式如下:

$$P_k^{m+1} = P_k^m - \Delta P_k \quad (21)$$

当  $\Delta P_k < \varepsilon$  时迭代停止. 考虑以下公式更新拉格朗日算子  $\omega^m$  和  $\mathbf{v}^m$ :

$$F(\omega, \mathbf{v}) = \max_{\mathbf{P}} L(P_k, \omega, \mathbf{v}) \quad (22)$$

使用梯度法更新  $\omega^{m+1}$  和  $\mathbf{v}^{m+1}$  的值

$$\omega^{m+1} = \left[ \omega^m - \zeta \left( \sum_{k=1}^K P_k - P_t \right) \right]^+ \quad (23)$$

$$\mathbf{v}^{m+1} = \left[ \mathbf{v}^m - \xi (P_k - P_k^{\max}) \right]^+ \quad (24)$$

其中  $\zeta, \xi > 0$  是迭代步长,  $z^+ = \max\{z, 0\}$ . 凸优化算法可以在初始化操作中获得更高质量的局部最优解. 如果不使用第一阶段的最优解, 则下一阶段的解将朝着系统性能降低的方向移动. 传输速率优化算法的步骤如算法 1 所示.

#### 算法 1

- 1: 初始化  $P_k^0, \omega^0$  和  $\mathbf{v}^0$ ;
- 2: 重复
- 3: 利用式(21)牛顿算法计算  $P_k^{m+1}$ ;
- 4: 如果  $\Delta P_k < \varepsilon$ , 则
- 5: 停止迭代并返回最优解;
- 6: 否则
- 7: 根据梯度算法, 利用  $P_k^{m+1}$  更新  $\omega^{m+1}$  和  $\mathbf{v}^{m+1}$ ;
- 8:  $m = m + 1$ ;
- 9: 结束;

#### 3.2 基于免疫克隆算法的卫星下行链路功率分配

免疫克隆算法用于解决第二阶段的卫星下行链路多目标功率分配问题, 该算法收敛速度较快, 且计算复杂度低. 通过人工免疫机制可以获得均匀分布的帕累托解集, 使下行链路在功耗和传输速率之间取得权衡. 人工免疫系统由克隆, 不一致突变, 抗体选择和更新过程组成. 将免疫克隆算法的抗原与抗体定义如下:

抗原: 式(8)所示的多目标功率分配问题;

抗体:  $a_i$ , 表示多目标功率分配问题的解, 是卫星分配给第  $i$  个波束的功率值.

抗原克隆阶段需要生成足够数量的解决方案, 为功率分配提供足够的候选解. 采用第一阶段功率分配的解作为多目标功率分配问题的初始抗体. 然后在克隆过程中, 扩增初始抗体的数量用于突变. 克隆算子表示如下:

$$Q_c(a_i(v)) = \{a_i^1(v), a_i^2(v), \dots, a_i^R(v)\}, \quad a_i^k(v) = a_i(v), k = 1, 2, \dots, R \quad (25)$$

其中  $a_i(v)$  表示多波束功率分配问题中分配给第  $i$  个波束的功率候选解,  $a_i^k(v)$  表示由第  $i$  个波束克隆出的第  $k$

个功率解,  $i = 1, 2, \dots, N, v$  和  $R$  分别为算法迭代次数和克隆比例,  $v = 1, 2, \dots, v_{\max}$ . 至此, 多波束功率分配问题解的数量从  $N$  扩展到  $RN$ .

不一致突变过程可改善克隆抗体的多样性. 克隆完成后, 用变异算子随机改变功率分配问题解  $a_i^k(v)$  的值. 不一致变异算子为:

$$\begin{aligned} Q_2^0(a_i^k(v)) &= a_i^k(v) + (b_u - a_i^k(v))(1 - r^{(1-v/v_{\max})^2}) \\ Q_2^1(a_i^k(v)) &= a_i^k(v) - (a_i^k(v) - b_d)(1 - r^{(1-v/v_{\max})^2}) \end{aligned} \quad (26)$$

其中  $v_{\max}$  是最大迭代次数,  $b_u$  和  $b_d$  分别是抗体的上限和下限,  $r$  是  $[0, 1]$  中的随机数. 随机选择一个整数  $w$ , 若  $w$  可被 2 整除, 则采用  $Q_2^0(a_i^k(v))$  作为变异算子, 否则选择  $Q_2^1(a_i^k(v))$ .

最后进行抗体的选择和更新. 突变结束后通过比较的方法从获得的解中选择非支配解. 为保证帕累托前沿的均匀性和解数量的可控性, 还需从解集中移除密集分布的非支配解. 抗体更新时, 首先按照目标函数值的升序对非支配解集进行排序, 排序后的目标函数集表示如下:

$$\begin{aligned} S(A) &= [F_s(f_1(A)) \quad F_s(f_2(A))] \\ &= \begin{bmatrix} f_1(a_1(v)) & f_2(a_1(v)) \\ f_1(a_2(v)) & f_2(a_2(v)) \\ & \dots \\ f_1(a_{RN}(v)) & f_2(a_{RN}(v)) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (27)$$

其中  $F_s(\cdot)$  是升序排序函数. 然后计算非支配解的拥挤距离  $d_i$ :

$$d_i = d_{i1} + d_{i2} \quad (28)$$

$$d_{ij} = \frac{f_j(a_{i+1}(v)) - f_j(a_{i-1}(v))}{\eta + f_{j,\max} - f_{j,\min}} \quad (29)$$

其中  $\eta = 0.00001$ ,  $f_{j,\max}$  和  $f_{j,\min}$  分别是多目标功率分配问题目标函数  $f_j(\cdot)$  的最大值和最小值. 根据计算结果排除具有较低  $d_i$  的非支配解, 直到解的数量等于预期值. 将基于免疫克隆算法的多目标功率分配算法表示如下.

#### 算法 2

- 1: 将第一阶段的最优解作为第二阶段的初始解;
- 2: 设定初始条件  $N, R$  和  $v_{\max}$ ;
- 3: 重复
- 4: 根据  $Q_c(\cdot)$  克隆初始解;
- 5: 根据  $Q_2(\cdot)$  对克隆的解进行不一致突变;
- 6: 选择所有的非支配解;
- 7: 舍弃密集分布区的解;
- 8:  $v = v + 1$ ;
- 9: 直到  $v = v_{\max}$ ;
- 10: 返回 抗体更新后的解

## 4 仿真与分析

仿真分析的系统参数如表 1 所示, 卫星下行链路阴影衰落场景的参数参考文献 [16] 的表 3.

表 1 系统参数

参数	数值
卫星波束数目 $K$	[23, 30]
距离 $d$	36000km
频段	Ka
每个卫星的带宽 $B$	187MHz
卫星下行链路总功率 $P_t$	1230W
卫星波束最大功率 $P_{\max}$	75W
噪声功率 $N_0$	$10^{-10}$ W
$G_s(e)$	50dB
$G_c(k)$	30dB

图 2 所示为第一阶段卫星下行链路传输速率优化匹配的结果. 采用 ILS 场景,  $R_{\text{opt}}$  是凸优化后的链路提供传输速率,  $R_{\text{ave}}$  是功率平均分配方案的传输速率, 而  $R_r$  是链路所需传输速率. 与  $R_{\text{ave}}$  相比,  $R_{\text{opt}}$  更能满足链路传输速率需求. 利用凸优化进行功率分配, 能够获得更大的 SF 并减少功耗. 与功率平均分配方案相比, 优化后的 SF 增加了 8.4%, 功耗降低了 5.1%. 第一阶段功率分配后实现了更好的传输速率匹配, 有效提高了链路资源利用率.

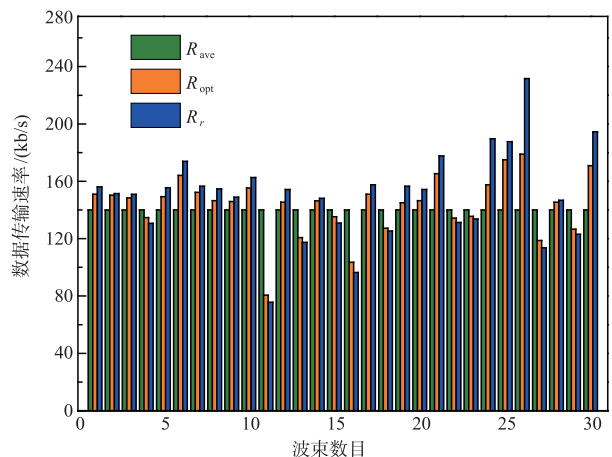


图 2 卫星下行链路传输速率需求

图 3 对传统单阶段和本文提出的两阶段多目标功率分配方法的性能进行了对比, 仿真采用 ILS 场景. 帕累托前沿为两阶段多目标功率优化的结果, 如图 3 红色点所示. 文献 [17] 提出的单阶段多目标功率分配方法没有对初始解进行优化, 仿真结果如图 3 蓝色点所示.

采用两阶段多目标功率分配方法,当解的最小 1/SF 为 1.086 时,相应的功耗为 1143W(点  $E_2$ )。然而,当采用单阶段多目标功率分配方法时,1192W 的功耗所对应的最小 1/SF 为 1.114(点  $E_1$ )。因此,所提出的两阶段多目标功率分配方法将 1/SF 的最小解降低了 3.7%,同时将最大功耗降低了 4.3%。图 3 所示点  $E_3$  的 1/SF 为 1.118,功耗为 983W)为两阶段功率分配方法的帕累托解集中,1/SF 值接近单阶段方法最小 1/SF 值的点。比较点  $E_1$  和点  $E_3$  可以得出,当传输速率匹配程度相近时,两阶段多目标功率分配方法能够将系统总功耗降低 17.6%。两阶段功率分配方法获得的帕累托前沿能够提供关于传输速率满意度因子和功率之间折衷平衡的信息,有助于制定权衡决策。

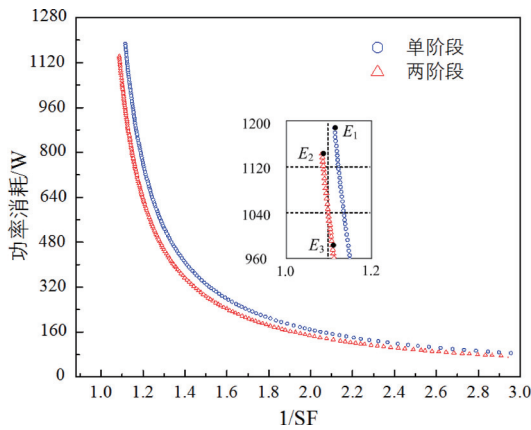


图3 多目标功率分配得到的帕累托前沿

图 4 比较了不同算法的收敛速度,采用 ILS 场景,仿真参数如表 2 所示。单阶段功率分配方法仅采用免疫克隆算法,没有优化初始解<sup>[17]</sup>,GA (Genetic Algorithm) 根据遗传算法推广得出<sup>[18]</sup>。如图 4 所示,纵轴表示迭代计算时获得的非支配解数量,两阶段功率分配方法收敛速度较快。这是因为与遗传算法相比,免疫克隆算法具有多值搜索能力,在相同迭代次数下效率更高。而与单阶段功率分配方法相比,两阶段功率分配方法增加了初始解优化步骤,提高了算法后续步骤的搜索效率。

图 5 比较了多目标和单目标功率分配问题的优化结果,仿真采用 ILS 模型。蓝色线条和红色线条分别是两阶段多目标功率分配方法最小功耗和最大功耗两种极端情况下的结果,这两条曲线之间的灰色区域为帕累托可行域,其中的解都是非支配的。对于最小化 1/SF 的目标函数,两阶段多目标资源分配的结果优于单目标优化问题 (Single-objective Optimization Problem, SOP) 求解的结果。如果单目标功率分配问题的目标函数是多目标功率分配问题在相同约束条件下的目标函数之一,则单目标优化问题的最优解包含在帕累托可行区域中。

表 2 仿真参数

两阶段方法参数	值
初始化解	凸优化
克隆比例 $R$	4
最大迭代次数 $v_{max}$	210
非支配解数量	410
GA 参数	值
种群初始化	Average
种群规模	410
交叉函数	Uniform
交叉概率	0.9
突变概率	0.05
选择函数	Tournament

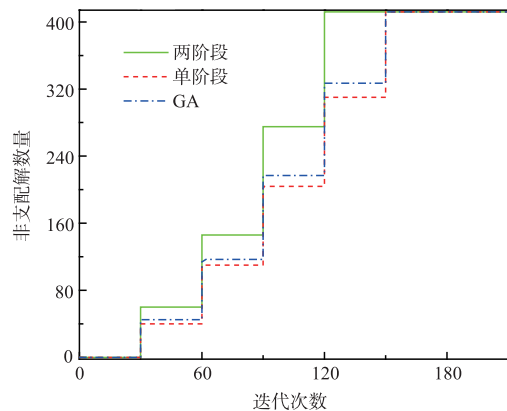


图4 算法收敛速度

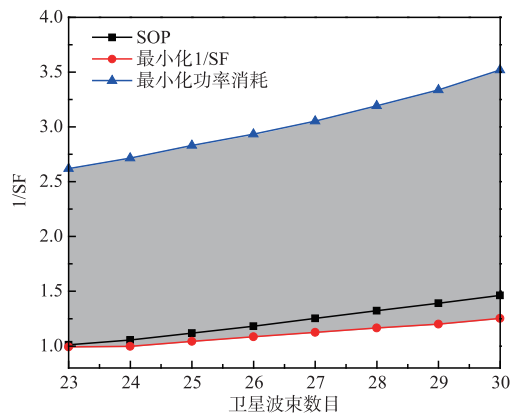


图5 不同波束数下的链路传输速率性能

图 6 所示为在三种卫星信道场景下通过两阶段功率分配方法获得的帕累托前沿,本文提出的两阶段优化机制适用于不同的卫星下行链路场景。当卫星信道情景从 ILS 变为 AS 和 FHS 时,最小 1/SF 分别增加

3.2% 和 7.8%, 相应的功耗分别增加 3.4% 和 4.9%。仿真结果表明帕累托前沿的性能还与卫星下行链路的信道场景有关。当帕累托解位于曲线斜率陡峭的位置时, 可以通过略微降低系统传输速率来大幅降低链路功耗。

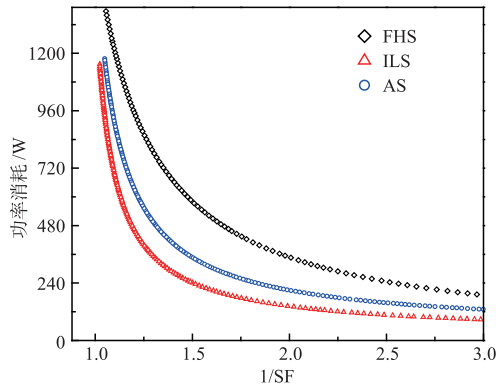


图6 不同卫星场景下的帕累托前沿

## 5 结论

本文研究了卫星下行链路通信场景, 提出了一种两阶段多目标优化方法来分配系统功率。算法第一阶段采用凸优化工具对功率进行初始分配, 使优化后系统提供的传输速率尽可能达到系统所需的传输速率需求。第二阶段采用免疫克隆算法, 合理分配链路传输功率, 获得更准确的帕累托前沿, 使系统在最小化功耗和最大化传输速率之间得到平衡。仿真结果表明, 与单阶段功率分配方法相比, 所提出的两阶段功率分配方法在近乎相同的传输速率下, 将链路功耗降低了 17.6%。本文提出的两阶段功率分配方法与现有 GA 和单阶段算法相比, 具有更快的收敛速度。两阶段功率分配方法为多目标星地链路功率分配问题提供了一组可行的非支配解, 可以广泛的适配系统的实际应用需求。

## 参考文献

- [1] Balty C, Gayraud J, Agnieray P. Communication satellites to enter a new age of flexibility[J]. *Acta Astronautica*, 2006, 65(1): 75–81.
- [2] Radhakrishnan R, Edmonson W W, et al. Survey of inter-satellite communication for small satellite systems: physical layer to network layer view [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2442–2473.
- [3] Neely M J, Modiano E, et al. Power allocation and routing in multibeam satellites with time-varying channels [J]. *IEEE ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(1): 138–152.
- [4] Li B, Fei Z, Chu Z, et al. Robust chance-constrained secure transmission for cognitive satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(5): 4208–4219.
- [5] Xu Y, Wang Y, Sun R, et al. Joint relay selection and power allocation for maximum energy efficiency in hybrid satellite-aerial-terrestrial systems [A]. 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications [C]. Valencia, Spain: IEEE, 2016. 1–6.
- [6] 韦亮, 宋高俊, 田亮. 基于部分信道信息的卫星移动链路 ACM 方法[J]. *电子学报*, 2018, 046(9): 2063–2067. Wei Liang, Song Gao-jun, Tian Liang. An ACM method based on partial channel information for mobile satellite link [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 046(9): 2063–2067. (in Chinese)
- [7] Alberti X, Cebrian J M, et al. System capacity optimization in time and frequency for multibeam multi-media satellite systems [A]. 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop [C]. Cagliari, Italy: IEEE, 2010. 226–233.
- [8] Aravanis A I, Bhavani S M R, Arapoglou P D, et al. Power allocation in multibeam satellite systems: a two-stage multi-objective optimization [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(6): 3171–3182.
- [9] Gonthier G. Formal proof-the four-color theorem [J]. *Notices of the AMS*, 2008, 55(11): 1382–1393.
- [10] An K, Lin M, et al. Secure transmission in cognitive satellite terrestrial networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(11): 3025–3037.
- [11] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. *Table of Integrals, Series, and Products* [M]. London: Elsevier, 2007.
- [12] Aravanis A, Bhavani S M R, et al. Multi-objective optimization approach to power allocation in multibeam systems [A]. AIAA International Communications Satellite Systems Conference [C]. Ottawa, Canada: AIAA, 2012. 15202.
- [13] Tan X, Zhang H, Hu J. Link decision algorithm in underlay cognitive radio networks over a Rayleigh fading channel [J]. *IET Communications*, 2014, 8(5): 607–615.
- [14] Talbi E G. *Metaheuristics From Design to Implementation* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [15] Boyd S, Vandenberghe L. *Convex Optimization* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [16] Abdi A, Lau W C, 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.
- [17] Zhong X D, He Y Z, Du Z Q. Downlink power allocation in distributed satellite system based on dynamic multi-objective optimization [A]. *International Conference on*

Wireless Communications & Signal Processing [C]. Nanjing, China: IEEE, 2015. 1 – 5.

[18] Hou Y, Wu N Q, Zhou M C, et al. Pareto-optimization for

scheduling of crude oil operations in refinery via genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2017, 47(3): 517 – 530.

### 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方法.  
E-mail: wwlwangyi@1126.com



**辛宁** 男, 1982 年生于山东烟台, 现为中国空间技术研究院通信卫星事业部高级工程师, 主要方向为天基信息网络架构设计.  
E-mail: xinning7@sina.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.  
E-mail: tz\_228@163.com



**赵海燕** 女, 1980 年生于陕西西安. 现为空军工程大学信息与导航学院讲师. 主要研究方向为卫星网络协议设计.  
E-mail: 583192546@qq.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. 主要研究方向为卫星光通信与网络, 空间微波光子技术.  
E-mail: zhaoshangh@aliyun.com



**张泰江** 男, 1994 年生于江西萍乡. 现为空军工程大学信息与导航学院硕士研究生. 主要研究方向为空间信息网络拓扑控制.  
E-mail: taijiangzhang@163.com