# 基于不完美CSI的低轨卫星通信系统鲁棒资源分配算法

吴翠先[①] 董燚恒[①] 徐勇军*[①②] 张海波[①②] 薛 青[①]

[①](重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

[②](浙江省信息处理与通信网络重点实验室 浙江 310058)

**摘 要**：为了解决低轨卫星通信系统因资源受限导致的能量与速率不平衡的问题，同时考虑信道不确定性对实际卫星通信系统性能衰退的影响，该文提出一种基于最大化最小能效的鲁棒资源分配算法。首先，考虑每个用户中断速率约束、功率分配系数约束和最大发射功率约束，基于高斯信道不确定性，构建了联合优化卫星波束成形向量与功率分配因子的鲁棒资源分配模型。所描述的问题是一个含参数摄动的非凸、非确定性多项式难问题，很难直接求解。为此，基于丁克尔巴赫、伯恩斯坦不等式、半正定松弛和交替优化等方法将其转化为等价的凸优化问题，并提出一种基于迭代的混合鲁棒波束成形与功率分配算法。仿真结果表明，该文算法具有较好的能效和较强的鲁棒性。

**关键词**：低轨卫星通信；波束成形；能效优化；鲁棒性

**中图分类号**：TN927+.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2024)02-0671-09

**DOI**: 10.11999/JEIT230086

# Robust Resource Allocation Algorithm for Low Orbit Satellite Communication System Based on Imperfect CSI

WU Cuixian[①] DONG Yiheng[①] XU Yongjun[①②] ZHANG Haibo[①②] XUE Qing[①]

[①](*School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing* 400065, *China*)

[②](*Zhejiang Provincial Key Laboratory of Information Processing, Communication and Networking, Zhejiang* 310058, *China*)

**Abstract**: In order to solve the imbalance problem between power consumption and transmission in low orbit satellite communication systems caused by the limited resource, a robust resource allocation algorithm is proposed to maximize the minimum energy efficiency of multiple users by considering the effect of channel uncertainties on the performance degradation of real satellite communication systems. Firstly, a robust resource allocation model with Gaussian channel uncertainties is formulated by jointly optimizing the beamforming vectors and power allocation factors of the multi-beam satellite, meanwhile the outage rate constraint of each user, the power allocation factor constraint and the maximum transmit power constraint are considered simultaneously. The formulated problem is a non-convex and NP-hard with parametric perturbation, which is difficult to solve it directly. To this end, the original problem is converted into a convex one by using Dinkelbach's method, Bernstein-type inequality, semi-definite relaxation and the alternating optimization technique, and an iteration-based hybrid robust beamforming and power allocation algorithm is proposed. Simulation results verify that the proposed algorithm has good energy efficiency and strong robustness.

**Key words**: Low orbit satellite communication; Beamforming; Energy-efficient optimization; Robustness

---

收稿日期：2023-02-22；改回日期：2023-07-13；网络出版：2023-07-19

*通信作者：徐勇军 xuyj@cqupt.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金(62271094, U21A20448)，重庆市教委科学技术研究项目(KJZD-K202200601)，重庆市自然科学重点基金(CSTB2022NSCQ-LZX0009)，浙江省信息处理与通信网络重点实验室开放课题(IPCAN-2302, IPCAN-2303)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62271094, U21A20448), The Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJZD-K202200601), The Key Fund of Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2022NSCQ-LZX0009), The Open Project of Zhejiang Provincial Key Laboratory of Information Processing, Communication and Networking (IPCAN-2302, IPCAN-2303)

## 1 引言

卫星移动通信系统是利用人造地球卫星作为中继站向各类陆海空用户提供宽带互联网接入等通信服务的网络，能够解决地面通信覆盖不足等问题，具有广阔的市场需求[1]。此外，卫星通信对灾难应急通信、军事国防作用重大，发展卫星通信拥有极其重要的战略意义。在沙漠及山区偏远地区等环境下，传统地面通信铺设技术难度大，通过卫星通信可以解决跨度大的地区通信质量差的问题，是实现全域网络信息覆盖以及普惠共享的前提[2]。

波束成形是卫星通信系统中一个重要技术。在卫星通信系统中，波束成形技术根据一定的准则和算法自适应地调整阵列天线阵元激励的权值，使阵列接收信号经过加权叠加后，输出信号在采取的准则下最优[3]。同时，该技术能够实现干扰抑制，进一步提高通信链路的容量[4]。因此，学术界和工业界开始对低轨卫星通信系统的波束成形问题进行重点研究。考虑多播波束低轨卫星通信系统，文献[5]提出了一种安全波束成形算法，通过同时满足卫星和地面用户的信干噪比和干扰中断概率约束，以最小化卫星总的发射功率。文献[6]研究了波束成形策略的性能极限问题，提出了一种基于速率分割的波束成形算法，该算法考虑在完美信道状态信息(Channel State Information, CSI)下减轻组间干扰，实现多个同信道多播组之间最大最小公平性的问题。在星地融合通信系统中，文献[7]考虑基站和卫星最大发射功率约束，通过联合优化基站和卫星的波束向量，研究最大最小公平性的波束成形设计问题。文献[8]通过联合优化基站与卫星的波束成形向量，在资源分配、回程链路和服务质量(Quality of Service, QoS)约束条件下，最大化基站与卫星协作系统中每组用户的和速率。

为了增强信道的鲁棒性，文献[9]基于信道相位不确定性，提出了低轨卫星物联网预编码算法，并采用一种非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)方案，以支持大规模物联网。该算法考虑用户QoS约束，使得整个系统总功耗最小。文献[10]研究了一种基于NOMA的多用户鲁棒波束形成方案，通过满足用户数据速率约束，以提高多波束卫星物联网的频谱效率。文献[11]采用NOMA方案联合优化设计星地综合网络，该方案在卫星和蜂窝用户的单天线发射功率和QoS约束下，最大化系统和速率。文献[12,13]基于信道相位不确定性，研究了鲁棒多组多播波束成形问题，通过考虑每根天线功率约束，以实现最大化最坏情况下的信干噪比。文献[14]研究了在信道状态信息存在相位误差的情况下，卫星物联网与地面网络共存的鲁棒多组多播波束成形问题，并在用户中断概率约束和卫星功耗约束下，最大化系统和速率。针对多小区多播系统，文献[15]提出了一种利用二次变换和最优化最小化方法的嵌套迭代算法，该算法考虑每个用户QoS和卫星发射总功率约束，最大化系统资源效率。文献[16]通过将鲁棒波束成形与NOMA相结合的下行传输方案，以提高频谱效率和用户公平性。该方案利用CSI，保证每个用户的发射功率和QoS要求的情况下，最大化公平效用和速率。

上述现有工作[5–8]假设信道状态信息都是准确获得的，忽略了信道估计误差对系统传输性能的影响。然而，由于卫星馈电链路的波动与天气因素的影响，在实际低轨卫星通信系统中，完美的CSI是很难获得的。因此，为了减少通信中断，通过提前考虑低轨卫星通信系统的鲁棒设计是有必要的。

另外，尽管目前的工作[9–16]研究了鲁棒波束成形问题，但这些工作缺乏对地面用户公平性传输以及能量-速率平衡的研究，不能直接用于本文低轨卫星传输系统。首先，大多数卫星通信场景的鲁棒系统模型是以追求速率最大化为目标，忽略了能量对系统的影响，这与本文系统模型完全不同。其次，卫星系统中具有完美CSI的最优传输模型舍弃了对用户公平性传输的考虑，其模型求解过程比本文工作简单，因为本文工作不仅需要对非凸问题进行转换，还要考虑鲁棒性约束和目标函数非凸转换过程以及合理分配用户功率，这对提高低轨卫星通信系统传输鲁棒性和系统能量利用率具有重要意义。

为此，本文针对多波束低轨卫星通信系统鲁棒传输问题，提出一种基于最大化最小能效的鲁棒资源分配算法，具体贡献如下：

(1)不同于理想CSI的波束成形算法[6]，本文针对高斯信道不确定性，考虑每个用户和每个地球站的中断概率约束以及最大传输功率约束，建立了一个含不完美CSI的最大最小鲁棒能效最大化资源分配问题。该问题是一个非线性、多变量、含参数摄动的非凸优化问题，很难直接对其求解。

(2)为了求解上述非凸优化问题，首先利用丁克尔巴赫方法将非线性目标函数转化为等价的减法形式；然后，利用伯恩斯坦近似不等式将中断概率约束转化为确定性约束条件。最后，针对目标函数与约束条件中的非凸性，利用半正定松弛、交替优化方法将其转化为等价的凸优化问题，并提出了一种基于迭代的混合鲁棒波束成形与功率分配算法。

(3)仿真结果表明，与传统算法相比，本文算法具有较好的能效和鲁棒性，并降低了地面用户中断概率。

符号定义：$(\cdot)^{\mathrm{H}}$和$(\cdot)^{\mathrm{T}}$分别表示矩阵或向量的共轭转置和转置，$||\cdot||$表示欧式范数，$|\cdot|$表示复数的模，$\mathbb{E}[\cdot]$表示随机变量的期望，$\mathbb{C}^{M\times N}$表示$M\times N$维复数矩阵，$\mathrm{Tr}(\cdot)$和$\mathrm{rank}(\cdot)$分别表示矩阵的迹和秩，$\boldsymbol{X}\succ\boldsymbol{0}$表示矩阵$\boldsymbol{X}$为正定矩阵，$\boldsymbol{X}\sim\mathcal{CN}(\boldsymbol{m},\boldsymbol{V})$表示$\boldsymbol{X}$服从复高斯分布，其中$\boldsymbol{m}$和$\boldsymbol{V}$分别为均值向量与协方差矩阵。

## 2　系统模型与问题描述

本文考虑一个多用户多波束卫星系统下行链路传输场景，如图1所示。该场景中每个覆盖区域由一颗多波束低轨道地球(Low Earth Orbit, LEO)卫星提供服务，卫星采用了多馈源单反射面天线，并配置多个馈源，可以形成$M$个波束，每个波束服务$N$个地面用户。多波束卫星基于的方式向地面用户发送信息，位于覆盖区域内的$K$个网内地球站同时会接收来自卫星的信号。定义$\forall m\in M==\{1,2,\cdots,M\}$，$\forall n\in N==\{1,2,\cdots,N\}$和$\forall k\in\mathcal{K}==\{1,2,\cdots,K\}$分别为卫星波束、地面用户和地球站数量的集合。

定义降雨衰减矢量为$\boldsymbol{r}_n=[r_{1,n},r_{2,n},\cdots,r_{M,n}]^{\mathrm{T}}$，其中雨衰信道系数$r_{m,n}$表示幅度，由于波束增益与卫星天线方向图和接收机位置有关[1]，远场波束增益矢量为$\boldsymbol{b}_n=[b_{1,n},b_{2,n},\cdots,b_{M,n}]^{\mathrm{T}}$，根据Ka波段信号传播特性[17]，卫星到第$m$个波束内第$n$个用户的下行信道可以建模为

$$\boldsymbol{h}_{m,n}=\sqrt{G_{m,n}C_{m,n}}\boldsymbol{b}_n^{1/2}\odot\boldsymbol{r}_n^{1/2}\odot e^{j\boldsymbol{\varphi}_n}\tag{1}$$

其中，$\odot$表示哈达玛积，$\boldsymbol{\varphi}_n=[\varphi_{1,n},\varphi_{2,n},\cdots,\varphi_{M,n}]^{\mathrm{T}}$

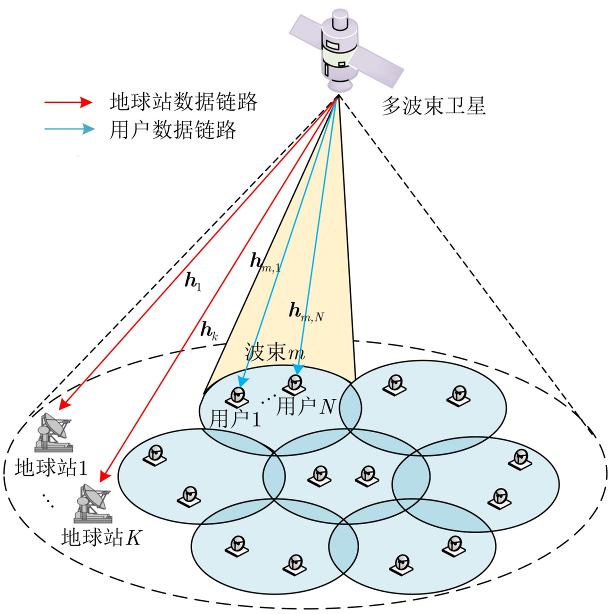


图 1 系统模型

是独立且在$[0,2\pi)$间均匀分布的卫星到第$m$个波束内第$n$个用户的信道相位矢量，且

$$C_{m,n}=\left(\frac{c}{4\pi f_c d_{m,n}}\right)^2\tag{2}$$

$$G_{m,n}[\mathrm{dB}]=\begin{cases}G_{\max}, & 0^\circ<\phi_{m,n}<1^\circ\\ 32-25\log_2(\phi_{m,n}), & 1^\circ<\phi_{m,n}<48^\circ\\ -10, & 48^\circ<\phi_{m,n}<180^\circ\end{cases}\tag{3}$$

其中，$C_{m,n}$表示卫星到第$m$个波束内第$n$个用户的自由空间损耗，$d_{m,n}$表示卫星信号传输到第$m$个波束内第$n$个用户的距离，$f_c$表示卫星通信下行链路的载波频率，$c$表示光速。$G_{m,n}$表示第$m$个波束内第$n$个用户的抛物面天线增益，$G_{\max}$为抛物面天线轴向的最大增益，$\phi_{m,n}$为第$m$个波束内第$n$个用户相对于卫星天线主轴的离轴角。

根据图1所示的传输模型，卫星的发送信号可以表示为

$$\boldsymbol{x}=\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\sqrt{\alpha_{m,n}}\boldsymbol{w}_m s_{m,n}\tag{4}$$

其中，$\boldsymbol{w}_m\in\mathbb{C}^{M\times1}$为卫星分配给第$m$个波束的权向量，$s_{m,n}$为卫星第$m$个波束发送给第$n$个用户的信号，满足$\mathbb{E}[|s_{m,n}|^2]=1$。$\alpha_{m,n}\in[0,1]$表示卫星第$m$个波束内第$n$个用户的功率分配系数，满足$\sum_{n=1}^{N}\alpha_{m,n}=1$。则卫星第$m$个波束内第$n$个用户接收到的信号为

$$y_{m,n}=\boldsymbol{h}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{x}+n_{m,n}\tag{5}$$

其中，$n_{m,n}\sim\mathcal{CN}(0,\sigma_{m,n}^2)$表示卫星第$m$个波束内第$n$个用户接收端均值为0，方差为$\sigma_{m,n}^2$的加性高斯白噪声。

由于本系统是多波束卫星系统的下行传输场景，为提高传输信号质量，每个地面用户对相同波束的信号进行串行干扰抵消(Successive Interference Cancellation, SIC)。基于现有的工作[9,10]，在相同的频率和时间域，卫星以NOMA原理发射多个信号，在第$m$个波束中，假设信道质量$||\boldsymbol{h}_{m,1}||\le||\boldsymbol{h}_{m,2}||\le\cdots\le||\boldsymbol{h}_{m,N}||$，则在用户的接收端可以采用SIC来消除同一波束内的干扰。因此，卫星第$m$个波束内第$j$个用户可以移除来自同一波束内第$n(1\le n<j\le N)$个用户的信号，然后将后续用户信号视为噪声，以此类推。因此为了支持预期的SIC技术，以便检测来自较弱用户的信号，需要在NOMA方案中应用条件$|\boldsymbol{h}_{m,1}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_m|^2\le|\boldsymbol{h}_{m,2}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_m|^2\le\cdots\le|\boldsymbol{h}_{m,N}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_m|^2$。传输信号在经过卫星信道$\boldsymbol{h}_{m,n}$和SIC处理后，卫星中第$m$个波束内第$n$个用户接收到的信号可以表示为

$$
\begin{aligned}
y_{m,n} =& \underbrace{\sqrt{\alpha_{m,n}}\boldsymbol{h}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_m s_{m,n}}_{\text{期望信号}} \\
&+ \underbrace{\sum_{j=n+1}^{N}\sqrt{\alpha_{m,j}}\boldsymbol{h}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_m s_{m,j}}_{\text{同一波束内其他用户干扰信号}} \\
&+ \underbrace{\sum_{i\neq m}^{M}\sum_{n=1}^{N}\sqrt{\alpha_{i,n}}\boldsymbol{h}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_i s_{i,n}}_{\text{其他波束干扰信号}} + \underbrace{n_{m,n}}_{\text{加性高斯白噪声}}
\end{aligned} \tag{6}
$$

卫星第$m$个波束内第$n$个用户的输出信干噪比可以表示为

$$
\gamma_{m,n} = \frac{\alpha_{m,n}|\boldsymbol{h}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_m|^2}{\displaystyle\sum_{j=n+1}^{N}\alpha_{m,j}|\boldsymbol{h}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_m|^2 + \sum_{i\neq m}^{M}\sum_{n=1}^{N}\alpha_{i,n}|\boldsymbol{h}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_i|^2 + \sigma_{m,n}^2} \tag{7}
$$

其中，分子表示卫星第$m$个波束分配给第$n$个用户的功率，分母的第1项表示来自同一波束中其他用户对第$n$个用户的干扰功率，第2项表示来自卫星其他波束的跨层干扰功率。因此，卫星第$m$个波束内第$n$个用户的瞬时可达速率可以表示为$R_{m,n} = \log_2(1+\gamma_{m,n})$。

卫星第$m$个波束内第$n$个用户的功率消耗可以表示为

$$
P_{m,n} = \zeta\alpha_{m,n}||\boldsymbol{w}_m||^2 + P_{m,n}^{cir} \tag{8}
$$

其中，第1项表示用户接收到的功率，$\zeta \ge 1$表示功率放大因子，它取决于发射机的设计和实现[1]，$P_{m,n}^{cir}$表示用户电路功率消耗。由此，可以得到卫星第$m$个波束内第$n$个用户的能量效率表达式为

$$
\eta_{m,n} = \frac{R_{m,n}}{P_{m,n}} = \frac{\log_2(1+\gamma_{m,n})}{\zeta\alpha_{m,n}||\boldsymbol{w}_m||^2 + P_{m,n}^{cir}} \tag{9}
$$

同理，第$k$个地球站的信噪比可以表示为

$$
\gamma_k = \frac{\displaystyle\sum_{m=1}^{M}|\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_m|^2}{\sigma_k^2} \tag{10}
$$

其中，$\boldsymbol{h}_k \in \mathbb{C}^{K\times 1}$表示卫星与第$k$个地球站的信道矢量，$\sigma_k^2$表示均值为零的加性高斯白噪声。因此，第$k$个地球站的瞬时可达速率可以表示为$R_k = \log_2(1+\gamma_k)$。

基于上述信道模型，在实际的多波束卫星通信网络中，LEO卫星是通过地面信关站获取CSI的，这就会导致信道由于终端移动性等不确定因素存在反馈误差、估计误差等。因此，本文基于高斯信道不确定性模型[18]建立与卫星相关的传输链路信道不确定性模型为

$$
\boldsymbol{h}_{m,n} = \tilde{\boldsymbol{h}}_{m,n} + \Delta\boldsymbol{h}_{m,n}, \Delta\boldsymbol{h}_{m,n} \sim \mathcal{CN}(\boldsymbol{0}, \boldsymbol{E}_{m,n}) \tag{11}
$$

$$
\boldsymbol{h}_k = \tilde{\boldsymbol{h}}_k + \Delta\boldsymbol{h}_k, \Delta\boldsymbol{h}_k \sim \mathcal{CN}(\boldsymbol{0}, \boldsymbol{E}_k) \tag{12}
$$

其中，$\tilde{\boldsymbol{h}}_{m,n}$和$\tilde{\boldsymbol{h}}_k$分别为$\boldsymbol{h}_{m,n}$与$\boldsymbol{h}_k$的信道增益估计值，$\Delta\boldsymbol{h}_{m,n}$和$\Delta\boldsymbol{h}_k$为其相应的信道估计误差，并且$\boldsymbol{E}_{m,n} \succ \boldsymbol{0}$和$\boldsymbol{E}_k \succ \boldsymbol{0}$。

为了提高卫星系统波束中每个地面用户的最小能量效率，综合考虑每个用户和每个地球站的中断概率约束以及每个波束的最大功率约束，本文建立如下基于最大化每个地面用户最小能效的资源分配模型。

$$
\begin{aligned}
&\max_{\{\boldsymbol{w}_m,\alpha_{m,n}\}} \min_{\forall n} \frac{R_{m,n}}{P_{m,n}} \\
&\text{s.t.} \mathrm{C}_1: \Pr(R_{m,n} > R_{m,n}^{\min}) \ge 1-\varepsilon_{m,n} \\
&\quad \mathrm{C}_2: \Pr(R_k > R_k^{\min}) \ge 1-\varepsilon_k \\
&\quad \mathrm{C}_3: \sum_{m=1}^{M}||\boldsymbol{w}_m||^2 \le P_{\max} \\
&\quad \mathrm{C}_4: \sum_{n=1}^{N}\alpha_{m,n} = 1, \alpha_{m,n} \in [0,1]
\end{aligned} \tag{13}
$$

其中，$\mathrm{C}_1$为卫星第$m$个波束内第$n$个用户的速率概率约束，即可达速率$R_{m,n}$大于最小速率阈值$R_{m,n}^{\min}$的概率至少为$1-\varepsilon_{m,n}$，$\varepsilon_{m,n}$表示第$m$个波束内第$n$个用户的中断概率；$\mathrm{C}_2$为第$k$个地球站的速率概率约束，即可达速率$R_k$大于最小速率阈值$R_k^{\min}$的概率至少为$1-\varepsilon_k$，$\varepsilon_k$表示第$k$个地球站的中断概率；$\mathrm{C}_3$为卫星波束的最大功率约束，$P_{\max}$为卫星发射的总功率；$\mathrm{C}_4$为波束内用户的功率分配系数约束。由于目标函数和中断概率约束条件，式(13)是一个含概率与变量耦合分式规划问题，该问题为非凸问题，难以直接求解。

## 3 鲁棒资源分配算法设计

### 3.1 分式目标函数转换

式(13)是一个非凸问题，为了使该问题容易处理，定义$\boldsymbol{W}_m = \boldsymbol{w}_m\boldsymbol{w}_m^{\mathrm{H}}$，基于丁克尔巴赫理论[19]，分式目标函数可以转化为减法形式，再定义$\eta_{m,n}^*$，$\boldsymbol{W}_m^*$和$\alpha_{m,n}^*$分别为最优的能效、波束成形矩阵以及功率分配系数。则目标函数可以转换为

$$
\eta_{m,n}^* = \max_{\{W_m,\alpha_{m,n}\}} \min_{\forall n} \frac{R_{m,n}}{P_{m,n}} = \min_{\forall n} \frac{R_{m,n}(\boldsymbol{W}_m^*, \alpha_{m,n}^*)}{P_{m,n}(\boldsymbol{W}_m^*, \alpha_{m,n}^*)} \tag{14}
$$

为得到最优解$\boldsymbol{W}_m^*$和$\alpha_{m,n}^*$，当且仅当

$$\max_{\{W_m,\alpha_{m,n}\}} \min_{\forall n}\{R_{m,n}-\eta^*_{m,n}P_{m,n}\} = \min_{\forall n}\{R_{m,n}(\boldsymbol{W}^*_m,\alpha^*_{m,n})-\eta^*_{m,n}P_{m,n}(\boldsymbol{W}^*_m,\alpha^*_{m,n})\} \tag{15}$$

然而，$\eta^*_{m,n}$是一个未知量，因此，需要定义函数$f(\eta_{m,n})$

$$f(\eta_{m,n})=\max_{\{W_m,\alpha_{m,n}\}} \min_{\forall n}\{R_{m,n}(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n}) - \eta_{m.n}P_{m,n}(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n})\} \tag{16}$$

由式(16)可知，当函数$f(\eta_{m,n})=0$时可以求得最优解$\eta^*_{m,n}$。因此，可以使用二分法求解$f(\eta_{m,n})=0$并获得$\eta^*_{m,n}$，该算法如算法1所示。

对于给定的$\eta_{m,n}$，可以通过等价变化去求解问题(13)，问题就可以写为

$$\begin{aligned}&\max_{\{\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n}\}} \min_{\forall n}\{R_{m,n}(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n}) - \eta_{m.n}P_{m,n}(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n})\}\\ &\text{s.t. } \mathrm{C}_3: \sum_{m=1}^{M}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{W}_m)\le P_{\max}\\ &\quad \mathrm{C}_5: \mathrm{rank}(\boldsymbol{W}_m)=1\\ &\quad \mathrm{C}_1,\mathrm{C}_2,\mathrm{C}_4\end{aligned} \tag{17}$$

其中，约束$\mathrm{C}_3$和约束$\mathrm{C}_4$为线性约束，但由于非凸目标函数和概率约束$\mathrm{C}_1$，约束$\mathrm{C}_2$以及秩一约束$\mathrm{C}_5$，问题(17)仍然难以求解。为此，定义$\boldsymbol{H}_{m,n}=\boldsymbol{h}_{m,n}\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}_{m,n}$，则$R_{m,n}(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n})$可以转化为

$$R_{m,n}(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n})=\log_2\left(1+\frac{\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{W}_m)}{\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{T}_{m,n})+\sigma^2_{m,n}}\right) \tag{18}$$

其中$\boldsymbol{T}_{m,n}=\sum_{j=n+1}^{N}\alpha_{m,j}\boldsymbol{W}_m+\sum_{i\ne m}^{M}\sum_{n=1}^{N}\alpha_{i,n}\boldsymbol{W}_i$。$\eta_{m.n}P_{m,n}(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n})$可以转化为

$$\eta_{m.n}P_{m,n}(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n})=\eta_{m,n}(\zeta\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{W}_m)+P^{\mathrm{cir}}_{m,n}) \tag{19}$$

结合式(18)和式(19)，目标函数可以转化为

$$\max_{\{\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n}\}} \min_{\forall n}\left\{\log_2\left(1+\frac{\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{W}_m)}{\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{T}_{m,n})+\sigma^2_{m,n}}\right) - \eta_{m,n}(\zeta\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{W}_m)+P^{\mathrm{cir}}_{m,n})\right\} \tag{20}$$

再次引入辅助变量$\tau_{m,n}$，其表达式为

$$\tau_{m,n}=\min_{\forall n}\left\{\log_2\left(1+\frac{\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{W}_m)}{\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{T}_{m,n})+\sigma^2_{m,n}}\right) - \eta_{m,n}(\zeta\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{W}_m)+P^{\mathrm{cir}}_{m,n})\right\} \tag{21}$$

此时，原非凸目标函数就转化为了凸优化目标函数问题，问题式(17)就可以重写为优化问题

**算法 1 基于二分法的能效优化策略**

初始化$\eta^+_{m,n}$和$\eta^-_{m,n}$；

(1) $f(\eta^+_{m,n})>0, f(\eta^-_{m,n})<0$；

(2) 设置阈值$\chi_1$和迭代次数$t_1, t_1=0$；

(3) **repeat**

(4) 更新$\eta^{(t_1)}_{m,n}\leftarrow(\eta^+_{m,n}+\eta^-_{m,n})/2$；

(5) 求解问题式(17)，得到最优解$f(\eta^{(t_1)}_{m,n})$；

(6) **if** $f(\eta^{(t_1)}_{m,n})\ge 0$ **then**

(7) 更新$\eta^+_{m,n}\leftarrow\eta^{(t_1)}_{m,n}$；

(8) 否则$\eta^-_{m,n}\leftarrow\eta^{(t_1)}_{m,n}$；

(9) 结束并更新$t_1=t_1+1$；

(10)直到$|f(\eta^{(t_1)}_{m,n})|<\chi_1$；

获得最优$\eta^*_{m,n}=\eta^{(t_1)}_{m,n}$。

$$\begin{aligned}&\max_{\{\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n},\tau_{m,n}\}} \tau_{m,n}\\ &\text{s.t.}\mathrm{C}_1-\mathrm{C}_5, \mathrm{C}_6: \log_2\left(1+\frac{\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{W}_m)}{\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{T}_{m,n})+\sigma^2_{m,n}}\right)\\ &-\eta_{m,n}(\zeta\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{W}_m)+P^{\mathrm{cir}}_{m,n})\ge\tau_{m,n}\end{aligned} \tag{22}$$

其中，$\mathrm{C}_6$又可以写为

$$\begin{aligned}&\log_2\left(1+\frac{\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{W}_m)}{\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{T}_{m,n})+\sigma^2_{m,n}}\right) - \eta_{m,n}(\zeta\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{W}_m)+P^{\mathrm{cir}}_{m,n})\ge\tau_{m,n}\\ &\Rightarrow(\log_2 e)\cdot\ln\left(\frac{\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{T}_{m,n})+\sigma^2_{m,n}+\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{W}_m)}{\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{T}_{m,n})+\sigma^2_{m,n}}\right)\\ &-\eta_{m,n}(\zeta\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{W}_m)+P^{\mathrm{cir}}_{m,n})\ge\tau_{m,n}\end{aligned} \tag{23}$$

再引入辅助变量$A(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n})$和$B(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n})$，其中

$$\begin{aligned}A(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n})&=\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{T}_{m,n})+\sigma^2_{m,n}+\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{W}_m)\\ B(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n})&=\mathrm{Tr}(\boldsymbol{H}_{m,n}\boldsymbol{T}_{m,n})+\sigma^2_{m,n}\end{aligned} \tag{24}$$

此时，$\mathrm{C}_6=(\log_2 e)\cdot\ln(A(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n})-B(\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n}))-\eta_{m,n}(\zeta\alpha_{m,n}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{W}_m)+P^{\mathrm{cir}}_{m,n})\ge\tau_{m,n}$。

问题式(22)中，约束$\mathrm{C}_1$与约束$\mathrm{C}_2$是概率约束，约束$\mathrm{C}_3$和约束$\mathrm{C}_4$是线性约束，约束$\mathrm{C}_5$是秩一的非凸约束，约束$\mathrm{C}_6$是变量耦合的非凸约束，这些非凸约束使得优化问题还是难以求解。

### 3.2 鲁棒约束条件转换

为了获得概率约束$\mathrm{C}_1$与$\mathrm{C}_2$的确定性形式，首先通过一些变换，可以写成

$$\begin{aligned}&\Pr(R_{m,n}>R^{\min}_{m,n})\ge 1-\varepsilon_{m,n}\\ &\Rightarrow\Pr\left\{\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}_{m,n}\left(\alpha_{m,n}\boldsymbol{W}_m-\delta_{m,n}\left(\sum_{j=n+1}^{N}\alpha_{m,j}\boldsymbol{W}_m+\sum_{i\ne m}^{M}\sum_{n=1}^{N}\alpha_{i,n}\boldsymbol{W}_i\right)\right)\boldsymbol{h}_{m,n}\le\delta_{m,n}\sigma^2_{m,n}\right\}\le\varepsilon_{m,n}\end{aligned} \tag{25}$$

其中，$\delta_{m,n}=2^{R_{m,n}^{\min}}-1$，将式(11)代入式(25)，则可以得到

$$\Pr\{(\tilde{\boldsymbol{h}}_{m,n}^{\mathrm{H}}+\Delta\boldsymbol{h}_{m,n}^{\mathrm{H}})\left(\alpha_{m,n}\boldsymbol{W}_m-\delta_{m,n}\left(\sum_{j=n+1}^{N}\alpha_{m,j}\boldsymbol{W}_m+\sum_{i\neq m}^{M}\sum_{n=1}^{N}\alpha_{i,n}\boldsymbol{W}_i\right)\right)(\tilde{\boldsymbol{h}}_{m,n}^{\mathrm{H}}+\Delta\boldsymbol{h}_{m,n}^{\mathrm{H}})\le\delta_{m,n}\sigma_{m,n}^2\}\le\varepsilon_{m,n}\tag{26}$$

式(26)可以重写为

$$\Pr\{\Delta\boldsymbol{h}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\psi}\Delta\boldsymbol{h}_{m,n}+2\mathrm{Re}(\Delta\boldsymbol{h}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\psi}\tilde{h}_{m,n})\le\delta_{m,n}\sigma_{m,n}^2-\tilde{\boldsymbol{h}}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\psi}\tilde{\boldsymbol{h}}_{m,n}\}\le\varepsilon_{m,n}\tag{27}$$

其中，$\boldsymbol{\psi}=\alpha_{m,n}\boldsymbol{W}_m-\delta_{m,n}\left(\sum_{j=n+1}^{N}\alpha_{m,j}\boldsymbol{W}_m+\sum_{i\neq m}^{M}\sum_{n=1}^{N}\alpha_{i,n}\boldsymbol{W}_i\right)$。

将CSI随机误差重写为$\Delta\boldsymbol{h}_{m,n}=\boldsymbol{E}_{m,n}^{1/2}\boldsymbol{\Lambda}_{m,n}$，其中$\boldsymbol{\Lambda}_{m,n}\sim\mathcal{CN}(\boldsymbol{0},\boldsymbol{I}_{m,n})$，则中断概率约束可以表示为

$$\Pr\{\boldsymbol{\Lambda}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Omega}_{m,n}\boldsymbol{\Lambda}_{m,n}+2Re[\boldsymbol{\Lambda}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Omega}_{m,n}\boldsymbol{\omega}_{m,n}]\le c_{m,n}\}\le\varepsilon_{m,n}\tag{28}$$

其中，$\boldsymbol{\Omega}_{m,n}=\boldsymbol{E}_{m,n}^{1/2}\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{E}_{m,n}^{1/2}$，$\boldsymbol{\omega}_{m,n}=\boldsymbol{E}_{m,n}^{1/2}\boldsymbol{\psi}\tilde{\boldsymbol{h}}_{m,n}$，$c_{m,n}=\delta_{m,n}\sigma_{m,n}^2-\tilde{\boldsymbol{h}}_{m,n}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\psi}\tilde{\boldsymbol{h}}_{m,n}$。

为此，利用伯恩斯坦不等式将式(28)由概率形式转化为确定性形式[20]。式(28)等价的确定性形式如

$$\mathrm{Tr}(\boldsymbol{\Omega}_{m,n})-\sqrt{2\mu_{m,n}}\sqrt{||\mathrm{vec}(\boldsymbol{\Omega}_{m,n})||^2+2||\boldsymbol{\omega}_{m,n}||^2}-\mu_{m,n}s^-(\boldsymbol{\Omega}_{m,n})-c_{m,n}\ge0\tag{29}$$

其中，$\mu_{m,n}=-\ln(\varepsilon_{m,n})$，$s^-(\boldsymbol{\Omega}_{m,n})=\max\{\lambda_{\max}(-\boldsymbol{\Omega}_{m,n}),0\}$。$\lambda_{\max}(-\boldsymbol{\Omega}_{m,n})$表示$(-\boldsymbol{\Omega}_{m,n})$的最大特征值，$\mathrm{vec}(\boldsymbol{\Omega}_{m,n})$表示$\boldsymbol{\Omega}_{m,n}$的拉直矩阵。引入辅助变量$\beta_{m,n}$和$\nu_{m,n}$，式(29)可以重构为

$$\mathrm{Tr}(\boldsymbol{\Omega}_{m,n})-\sqrt{2\mu_{m,n}}\beta_{m,n}-\mu_{m,n}\nu_{m,n}-c_{m,n}\ge0\tag{30}$$

$$\left\|\begin{matrix}\mathrm{vec}(\boldsymbol{\Omega}_{m,n})\\\sqrt{2}\boldsymbol{\omega}_{m,n}\end{matrix}\right\|\le\beta_{m,n}\tag{31}$$

$$\nu_{m,n}\boldsymbol{I}_{m,n}+\boldsymbol{\Omega}_{m,n}\succ\boldsymbol{0}\tag{32}$$

同理，引入辅助变量$\beta_k$和$\nu_k$，问题(22)中的概率约束$\mathrm{C}_2$可以等价地转换成

$$\mathrm{Tr}(\boldsymbol{\Omega}_k)-\sqrt{2\mu_k}\beta_k-\mu_k\nu_k-c_k\ge0\tag{33}$$

$$\left\|\begin{matrix}\mathrm{vec}(\boldsymbol{\Omega}_k)\\\sqrt{2}\boldsymbol{0}_k\end{matrix}\right\|\le\beta_k\tag{34}$$

$$\nu_k\boldsymbol{I}_k+\boldsymbol{\Omega}_k\succ\boldsymbol{0}\tag{35}$$

其中，$\boldsymbol{\Omega}_k=\sum_{m=1}^{M}\boldsymbol{E}_k^{1/2}\boldsymbol{W}_m\boldsymbol{E}_k^{1/2},\boldsymbol{\omega}_k=\sum_{m=1}^{M}\boldsymbol{E}_k^{1/2}\boldsymbol{W}_m\tilde{\boldsymbol{h}}_k,c_k=\delta_k\sigma_k^2-\sum_{m=1}^{M}\tilde{\boldsymbol{h}}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{W}_m\tilde{\boldsymbol{h}}_k,\mu_k=-\ln(\varepsilon_k)$。

将式(30)—式(35)代入优化问题式(22)中，可以得到

$$\begin{aligned}&\max_{\{\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n},\tau_{m,n}\}}\tau_{m,n}\\&\mathrm{s.t.}\ \tilde{\mathrm{C}}_1:\mathrm{Tr}(\boldsymbol{\Omega}_{m,n})-\sqrt{2\mu_{m,n}}\beta_{m,n}-\mu_{m,n}\nu_{m,n}-c_{m,n}\ge0\\&\quad\tilde{\mathrm{C}}_2:\left\|\begin{matrix}\mathrm{vec}(\boldsymbol{\Omega}_{m,n})\\\sqrt{2}\boldsymbol{\omega}_{m,n}\end{matrix}\right\|\le\beta_{m,n}\\&\quad\tilde{\mathrm{C}}_3:\nu_{m,n}\boldsymbol{I}_{m,n}+\boldsymbol{\Omega}_{m,n}\succ\boldsymbol{0}\\&\quad\tilde{\mathrm{C}}_4:\mathrm{Tr}(\boldsymbol{\Omega}_k)-\sqrt{2\mu_k}\beta_k-\mu_k\nu_k-c_k\ge0\\&\quad\tilde{\mathrm{C}}_5:\left\|\begin{matrix}\mathrm{vec}(\boldsymbol{\Omega}_k)\\\sqrt{2}\boldsymbol{\omega}_k\end{matrix}\right\|\le\beta_k\\&\quad\tilde{\mathrm{C}}_6:\nu_k\boldsymbol{I}_k+\boldsymbol{\Omega}_k\succ\boldsymbol{0}\\&\quad\mathrm{C}_3-\mathrm{C}_6\end{aligned}\tag{36}$$

此时，需要处理非凸的秩一约束$\mathrm{C}_5$以及矩阵$\boldsymbol{W}_m$和功率分配系数$\alpha_{m.n}$相互耦合的约束$\mathrm{C}_6$。

### 3.3 等价凸优化问题转换

对于秩一约束通常采用半正定松弛的方法，消除秩一约束后得到问题式(37)

$$\begin{aligned}&\max_{\{\boldsymbol{W}_m,\alpha_{m,n},\tau_{m,n}\}}\tau_{m,n}\\&\mathrm{s.t.}\tilde{\mathrm{C}}_1-\tilde{\mathrm{C}}_6,\mathrm{C}_3,\mathrm{C}_4,\mathrm{C}_6\end{aligned}\tag{37}$$

问题式(37)中对于优化变量耦合约束$\mathrm{C}_6$，采用块坐标下降的方法来进行求解。具体来说，将问题分为两个子问题，当给定功率分配系数$\alpha_{m.n}$时，上述问题就变为了优化检测矩阵$\boldsymbol{W}_m$和$\tau_{m,n}$的子问题，该子问题是一个凸优化问题，从而进一步通过相应的凸优化理论进行求解。同理，将求得的最优值$\boldsymbol{W}_m$和$\tau_{m,n}$带入到原问题中，另一个子问题也是一个凸优化问题。最后，通过利用凸优化工具包对两个子问题进行交替优化即可得到原问题的$\boldsymbol{W}_m^*$和$\alpha_{m,n}^*$。此外，问题(37)的解满足秩一约束，则最优$\boldsymbol{w}_m^*$可以通过特征值分解法获得。否则，利用高斯随机法获得其近似解[21]。本文算法的详细步骤见算法2。

### 3.4 算法复杂度分析

根据文献[22]，经典内点法的计算复杂度为$O\{\sqrt{\vartheta(\varpi)}L\ln(1/\xi)\}$。$\vartheta(\varpi)$表示障碍参数，其具体表达式为：$\vartheta(\varpi)=\sum_{x=1}^{u}a_x+2(d-u)$，其中，$u$表示半正定约束数量，$d-u$表示2阶锥约束的数量，$a_x$表示第$x$个半正定约束的维数。$L$表示每一次迭代的开销，具体表达式为：$L=y\sum_{x=1}^{u}(a_x)^3+y^2\sum_{x=1}^{u}(a_x)^2+y\sum_{x=u+1}^{d}(o_x)^2+y^3$，其中，$o_x$表示第$x$个2阶锥约束的维数，$y$表示优化变量的

**算法 2　基于迭代的混合鲁棒波束成形和功率分配算法**

初始化$K$,$M$, $N$, $\sigma^2_{m,n}$, $P^{cir}_{m,n}$, $R^{\min}_{m,n}$, $R^{\min}_{k}$, $\varepsilon_{m,n}$, $\varepsilon_k$, $\delta_{m,n}$,
$\delta_k$,$\mu_{m,n}$, $\mu_k$；设置误差精度$\chi_2$和迭代次数$t_2$，初始化$t_2=0$；
(1) **repeat**
(2) 设置初始功率分配系数$\alpha^{(t_2)}_{m,n}$；
(3) **if** $\alpha^{(t_2)}_{m,n}-\alpha^{(t_2-1)}_{m,n}\ge\chi_2$ **then**
(4) 更新$t_2=t_2+1$；
(5) 否则求解问题(37)获得最优$\boldsymbol{W}^*_m=\boldsymbol{W}^{(t_2)}_m$；
(6) 再求解最优$\alpha^*_{m,n}$，对$\boldsymbol{W}^*_m$使用特征值分解获得$\boldsymbol{w}^*_m$；
结束；

数量。基于上述定义，定义本文算法的复杂度为$O\{\sqrt{\bar\vartheta(\varpi)}\bar L\ln(1/\bar\xi)\}$。其中，$\bar\vartheta(\varpi)$表示本文算法的障碍参数，$\bar\xi$为本文算法解的精度，$\bar L$表示本文算法每一次迭代的开销。其具体如下

$$\bar\vartheta(\varpi)=NM+(N-n-1)M+N(M-1)+KM+4 \tag{38}$$

$$\bar L=\bar y[(3MN-Mn-M-N)^3+(MK)^3]+(\bar y^2+\bar y)\cdot[(3MN-Mn-M-N)^2+(MK)^2]+\bar y^3 \tag{39}$$

其中，$\bar y=M+MN$表示本文算法优化变量的数量。

## 4　仿真结果与分析

本节通过数值模拟说明了本文鲁棒算法在多波束卫星通信中的性能，适用于一般情况。将每个波束中的用户数设置为$N=3$，地球站的数量设置为$K=2$，精度误差分别设置为$\chi_1=10^{-3}$和$\chi_2=10^{-3}$，功率放大因子设置为$\zeta=2$，CSI随机误差的自相关矩阵设置为$\boldsymbol{E}_{m,n}=\rho_{m,n}\times\boldsymbol{I}_{m,n}$，其中$\rho_{m,n}>0$表示信道误差的方差。基于现有工作与资料[14–16]，本文具体仿真参数如表1所示。此外，还将本文算法与非鲁棒算法[23]、速率最大化算法[14]进行比较。对比非鲁棒算法：在完美CSI条件计算最大能效；对比速率最大化算法：在不完美CSI与和速率最大条件下，计算用户能效。

图2给出了用户能效的迭代收敛图。从图中可看出，本文算法在经过迭代后可以收敛，说明本文算法具有较好的收敛性。且最小速率阈值增加，用户能效随之减小。因为当用户$R^{\min}_{m,n}$增加时，卫星必须增大发射功率以满足约束条件C$_1$，整个系统的功耗会随之增加，用户能效就会降低。

图3给出了用户系统能效与功率分配因子$\alpha_{m.n}$之间的关系。从图中可看出，在经过几次迭代后用户能效与功率分配因子都达到收敛。随着$\alpha_{m.n}$降低，用户能效随之增加。因为波束的功率能直接影响用户的能效，分配给用户的功率越少，说明用户不能消耗大量资源，用户能效就会增大。

图4给出了用户能效与$R^{\min}_{m,n}$在不同算法下的关系。从图中可看出，最小速率阈值增加，不同算法的用户能效随之减小。但本文算法用户能效仍高于其他算法，因为本文是基于最小能效最大化设计的鲁棒算法，相比于非鲁棒与速率最大算法，该算法体现出更好的性能。

图5给出了用户能效与$\rho_{m,n}$在不同算法下的关系。从图中可看出，信道误差方差增加，不同算法的用户能效随之减小。但是本文算法用户能效高于

**表 1　具体仿真参数**

| 参数 | 值 | 参数 | 值 | 参数 | 值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 卫星 | LEO | 加性高斯白噪声方差 | 0.1 | 雨衰方差(dB) | 1.63 |
| 卫星高度(km) | 1000 | 玻尔兹曼常数(J/K) | $1.38\times10^{-23}$ | 带宽(MHz) | 30 |
| 波束数量 | 3 | 最大卫星天线增益(dBi) | 17 | 载波频率(GHz) | 20 |
| 卫星馈电天线数 | 18 | 雨衰均值(dB) | –2.6 | 3 dB角 | 0.4° |

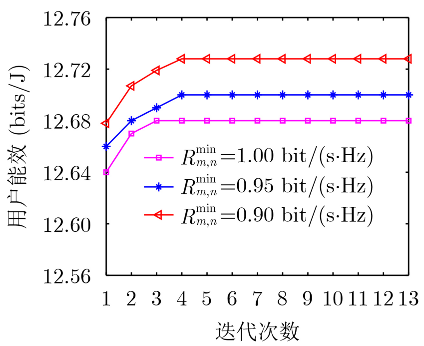


图 2 用户能效收敛图

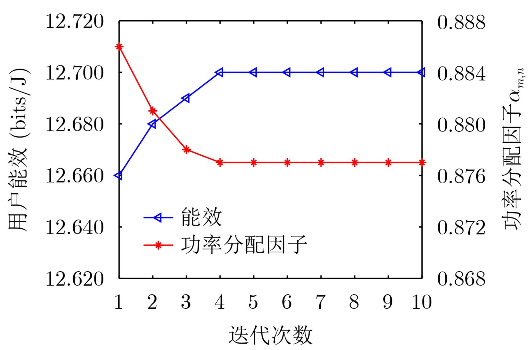


图 3 用户能效与功率分配因子的关系

其他算法，因为增加信道不确定性会导致信号在信道传输中更易受到影响，而本文算法提前考虑了信道不确定性，从而可以相对地减少这些影响。

图6给出了不同算法下中断概率与$\rho_{m,n}$之间的关系。从图中可看出，信道误差的方差增加，不同算法中断概率随之增加，但本文算法中断概率始终低于其他算法。因此，本文算法可以提供更好的鲁棒性，且本文算法与传统算法相比，平均中断概率降低了5.59%。

## 5 结束语

本文基于卫星系统波束中每个地面用户的最小能量效率问题展开研究，在满足每个地面用户和地球站的中断概率约束以及波束的功率约束的条件下，对卫星波束成形矢量和功率分配因子进行联合优化，以追求用户最小能效的最大化；针对提出的变量耦合能效优化问题建立用户能效资源分配模型，利用丁克尔巴赫理论、伯恩斯坦不等式以及一系列等量代换将原优化问题转化为非凸的确定性形式；同时采用半正定松弛、交替优化等方法将其转化为凸优化问题，并利用凸优化工具箱进行求解。仿真结果验证了本文算法具有较好的鲁棒性和能效。

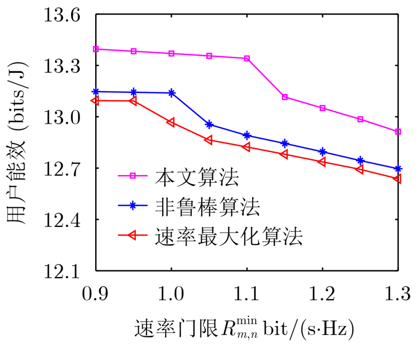


图 4 用户能效与速率门限在不同算法下的关系

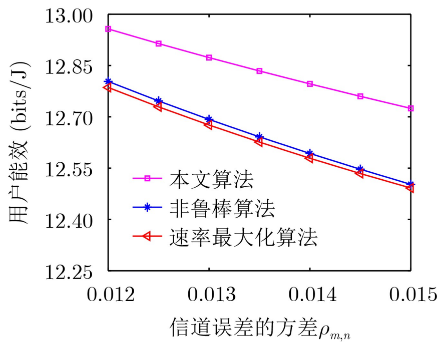


图 5 用户能效与信道误差的方差在不同算法下的关系

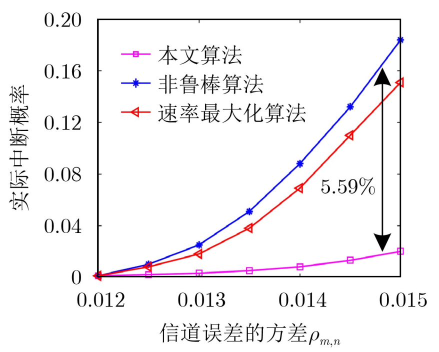


图 6 中断概率与信道误差的方差在不同算法下的关系

## 参 考 文 献

[1] 王宁远, 陈东, 刘亮, 等. 未来低轨信息网络发展与架构展望[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 396–406. doi: 10.11999/JEIT211400.
WANG Ningyuan, CHEN Dong, LIU Liang, *et al*. Development trend and architecture prospect of future low-earth-orbit information networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(2): 396–406. doi: 10.11999/JEIT211400.

[2] XU Yongjun, GUI Guan, GACANIN H, *et al*. A survey on resource allocation for 5G heterogeneous networks: Current research, future trends, and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 668–695. doi: 10.1109/COMST.2021.3059896.

[3] XU Yongjun, XIE Hao, WU Qingqing, *et al*. Robust max-min energy efficiency for RIS-aided HetNets with distortion noises[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(2): 1457–1471. doi: 10.1109/TCOMM.2022.3141798.

[4] 孙士勇, 王薇, 顾晨伟, 等. 基于公平效用函数的多波束卫星通信下行链路波束成形算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(9): 3024–3032. doi: 10.11999/JEIT220409.
SUN Shiyong, WANG Wei, GU Chenwei, *et al*. Beamforming algorithm based on fair utility function for multibeam satellite communication downlink transmission[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(9): 3024–3032. doi: 10.11999/JEIT220409.

[5] LI Bin, FEI Zesong, CHU Zheng, *et al*. Robust chance-constrained secure transmission for cognitive satellite–terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(5): 4208–4219. doi: 10.1109/TVT.2018.2791859.

[6] JOUDEH H and CLERCKX B. Rate-splitting for max-min fair multigroup multicast beamforming in overloaded systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(11): 7276–7289. doi: 10.1109/TWC.2017.2744629.

[7] ZHU Xiangming, JIANG Chunxiao, YIN Liguo, *et al*. Cooperative multigroup multicast transmission in integrated terrestrial-satellite networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(5): 981–992. doi: 10.

1109/JSAC.2018.2832780.

[8] ZHANG Yuandong, YIN Liuguo, JIANG Chunxiao, *et al*. Joint beamforming design and resource allocation for terrestrial-satellite cooperation system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(2): 778–791. doi: 10.1109/TCOMM.2019.2950022.

[9] CHU Jianhang, CHEN Xiaoming, ZHONG Caijun, *et al*. Robust design for NOMA-based multibeam LEO satellite internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(3): 1959–1970. doi: 10.1109/JIOT.2020.3015995.

[10] ZHU Yazhou, DELAMOTTE T, and KNOPP A. Geographical NOMA-beamforming in multi-beam satellite-based internet of things[C]. 2019 IEEE Global Communications Conference, Waikoloa, USA, 2019: 1–6. doi: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013777.

[11] LIN Zhi, LIN Min, WANG Junbo, *et al*. Joint beamforming and power allocation for satellite-terrestrial integrated networks with nonorthogonal multiple access[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, 13(3): 657–670. doi: 10.1109/JSTSP.2019.2899731.

[12] YOU Li, LIU Ao, WANG Wenjin, *et al*. Outage constrained robust multigroup multicast beamforming for multi-beam satellite communication systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(2): 352–355. doi: 10.1109/LWC.2018.2872710.

[13] XIAO Yi, MISHRA D, YUAN Jinhong, *et al*. Proportionally fair robust beamforming for multicast multibeam satellite systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(1): 128–132. doi: 10.1109/LCOMM.2021.3118567.

[14] YAN Yan, AN Kang, ZHANG Bangning, *et al*. Outage-constrained robust multigroup multicast beamforming for satellite-based internet of things coexisting with terrestrial networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(10): 8159–8172. doi: 10.1109/JIOT.2020.3042831.

[15] WANG Wenjin, GAO Linna, DING Rui, *et al*. Resource efficiency optimization for robust beamforming in multi-beam satellite communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(7): 6958–6968. doi: 10.1109/TVT.2021.3087744.

[16] WANG Zining, LIN Min, SUN Shiyong, *et al*. Robust beamforming for enhancing user fairness in multibeam satellite systems with NOMA[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(1): 1010–1014. doi: 10.1109/TVT.2021.3124928.

[17] VÁZQUEZ M Á, PÉREZ-NEIRA A, CHRISTOPOULOS D, *et al*. Precoding in multibeam satellite communications: Present and future challenges[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(6): 88–95. doi: 10.1109/MWC.2016.1500047WC.

[18] XU Yongjun, ZHAO Xiaohui, and LIANG Yingchang. Robust power control and beamforming in cognitive radio networks: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 1834–1857. doi: 10.1109/COMST.2015.2425040.

[19] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming[J]. *Management Science*, 1967, 13(7): 492–498. doi: 10.1287/MNSC.13.7.492.

[20] BECHAR I. A Bernstein-type inequality for stochastic processes of quadratic forms of Gaussian variables[J]. arXiv: 0909.3595, 2009.

[21] LUO Zhiquan, MA W K, SO A M C, *et al*. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(3): 20–34. doi: 10.1109/MSP.2010.936019.

[22] WANG Kunyu, SO A M C, CHANG T H, *et al*. Outage constrained robust transmit optimization for multiuser MISO downlinks: Tractable approximations by conic optimization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(21): 5690–5705. doi: 10.1109/TSP.2014.2354312.

[23] LU Weixin, AN Kang, and LIANG Tao. Robust beamforming design for sum secrecy rate maximization in multibeam satellite systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(3): 1568–1572. doi: 10.1109/TAES.2019.2905306.

吴翠先：女，正高级工程师，硕士生导师，研究方向为卫星通信、鲁棒资源分配.

董燚恒：男，硕士生，研究方向为卫星通信、鲁棒资源分配.

徐勇军：男，副教授，博士生导师，研究方向为卫星通信、鲁棒资源分配等.

张海波：男，副教授，硕士生导师，研究方向为卫星通信、无线网络资源分配、车联网等.

薛　青：女，讲师，硕士生导师，研究方向为卫星通信、无线网络资源分配、毫米波无线通信等.

责任编辑：马秀强