

# 基于合作博弈的认知卫星网络信道分配与上行功率控制算法

钟旭东<sup>1,2</sup> 何元智<sup>2</sup> 任保全<sup>2</sup> 董飞鸿<sup>2</sup>

1 陆军工程大学通信工程学院 南京 210007

2 军事科学院 北京 100141

(zxd148367@outlook.com)



**摘要** 随着通信业务需求的不断增长,频谱资源的有限性使得卫星通信网络和地面网络都面临着严重的频谱危机。认知无线电技术的出现,使得卫星网络与地面网络共用频率资源以提升网络效用成为可能。文中对认知接入分配给地面网络作为主用户的同一频谱资源的认知卫星网络的功率控制和信道分配问题进行了研究。根据卫星网络和地面网络的特性构建了合理的系统模型,并利用中断概率门限表征了信道估计误差对系统容量的影响。为了保护主基站的通信性能,在考虑信道估计误差、信道资源约束、认知卫星用户最大发射功率和微波基站干扰约束的条件下,根据议价博弈理论设计了优化函数。其次,根据凸优化理论推导了最优发射功率和信道分配的闭式解,并在此基础上设计了一种对偶迭代算法来求解该优化问题。最后,根据卫星网络的特性设置了合理的网络参数,并根据参数利用 Matlab 仿真平台对提出的算法进行了仿真实验。仿真结果表明:所提方法在不同到达速率的条件下均具备良好的收敛性;信道估计误差会降低网络的总容量;所提方法在波束数多于 15 个时,相比比例公平性算法容量提升超过 50 bps/Hz,相比最大容量法公平性能提升超过一倍,因此,相较于这两种方法,该方法能在系统容量和用户间公平性之间获得较好的折中。

**关键词:** 认知卫星网络;资源分配;功率控制;合作博弈

**中图分类号** TN915.81

## Channel Allocation and Power Control Algorithm for Cognitive Satellite Networks Based on Cooperative Game Theory

ZHONG Xu-dong<sup>1,2</sup>, HE Yuan-zhi<sup>2</sup>, REN Bao-quan<sup>2</sup> and DONG Fei-hong<sup>2</sup>

1 College of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China

2 Academic of Military Sciences, Beijing 100141, China

**Abstract** With continuous increasing of communication service requirements, satellite networks and terrestrial networks are both facing a serious spectrum crisis because of the limitation of spectrum resource. Cognitive radio technology makes it possible to realize the resource sharing for network utility improvement between satellite networks and terrestrial networks. This paper investigated the power control and channel allocation problem for cognitive satellite networks, where satellite users cognitively access the same spectrum resource allocated to terrestrial networks as primary users. A reasonable system model is constructed based on the characteristics of satellite networks and terrestrial networks, and the outage probability threshold is used to represent the effect on system capacity of channel estimation error. To protect the communication performance of primary base station, the optimization function is designed based on bargaining game theory by taking into account with channel estimation errors, constrain of channel resource, maximum transmit power of cognitive satellite users and interference constrains of primary base stations. In this paper, the closed form solutions of optimal transmit power and channel allocation for the problem are derived based on convex optimization theory, and a dual iteration algorithm is designed to find the solutions. Finally, the system parameters are set based on characteristics of satellite networks, and several simulations are obtained for the proposed algorithm with Matlab simulation platform based on the parameters. The simulation results show that the proposed algorithm has a proper convergence performance under different arrival rates. It also shows that the channel estimation error can decrease the capacity performance of the network. Compared with existing methods, the proposed algorithm can improve the capacity performance with more than 50bps/Hz than the proportional fairness method when the number of beams is more than 15, and the fairness performance is more than double of the capacity maximizing method under the same condition. Therefore, the proposed algorithm can find a reasonable

收稿日期:2018-12-18 返修日期:2019-05-08 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61231011,91338021)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61231011,91338021).

通信作者:何元智(yuanzhihe@163.com)

trade-off between system capacity and fairness among users.

**Keywords** Cognitive satellite network, Resource allocation, Power control, Cooperative game

## 1 引言

卫星网络因具有广域覆盖能力和大容量通信能力等特点,被作为地面通信网络的补充和延伸,并被广泛应用于应急通信、海事服务、偏远地区网络服务等场景<sup>[1]</sup>。然而,由于频谱资源有限,现有的频谱固定划分模式已经无法满足不断增长的多媒体业务和网络服务需求<sup>[2]</sup>。认知无线电技术(Cognitive Radio, CR)<sup>[3]</sup>成为解决这一问题的有效手段。

卫星用户通过认知接入方式接入分配给地面网络用户作为主用户使用的频段,可最大限度地利用有限频谱资源来提升系统容量<sup>[3-4]</sup>。CR使能技术包括频谱感知<sup>[4-5]</sup>、协同认知<sup>[6-7]</sup>等技术,使得星地同频共存成为可能。

目前,针对认知卫星网络的研究主要停留在协同方法<sup>[6-9]</sup>和性能分析<sup>[10-11]</sup>方面。其中, Maleki 等<sup>[6]</sup>根据干扰约束条件推导了认知卫星网络中次级用户需要采用认知接入技术接入主用户频段的地理位置范围。Chae 等<sup>[9]</sup>则进一步研究了具体的 CR 技术在实现星地协同通信中的应用。Lin 等<sup>[7]</sup>研究了波束成型技术在认知卫星网络中的应用,指出波束成型能够有效提高频谱协同共享的效用。Wang 等<sup>[8]</sup>则针对频谱如何实现认知接入的问题提出了一种基于古诺博弈的频谱优化方法。Kolawole 等<sup>[10]</sup>和 An 等<sup>[11]</sup>分别对应用 CR 技术的认知卫星网络的容量性能和中断概率性能进行了分析,指出应用 CR 技术不仅可以在有限的频段资源条件下保证主用户的通信性能,还可以提升卫星网络的整体性能。然而,应用这些使能技术需要网络在通信资源上实现针对性的优化配置,但目前只有少量研究聚焦于认知卫星网络的资源优化问题。文献<sup>[12-14]</sup>研究了认知卫星网络中的功率控制问题。Vassaki 等<sup>[12]</sup>根据认知卫星网络中用户的 QoS 需求,提出了一种保障卫星网络中断概率低于预设门限的功率控制方法,来提升网络整体容量。Gao 等<sup>[13]</sup>根据主用户干扰约束和干扰中断概率约束提出了一种功率控制方法,来保障卫星网络的通信能力,同时避免对主用户造成干扰。Shi 等<sup>[14]</sup>则考虑了针对实时业务用户的认知卫星网络发射功率控制问题。文献<sup>[12-14]</sup>均只考虑了一维资源,即发射功率的优化问题,对频谱资源则假设通过某种算法实现认知接入。实际上,对频谱资源和功率资源进行联合优化,可以进一步提升网络效用,文献<sup>[15-17]</sup>就考虑了二维资源的联合优化问题。Zuo 等<sup>[15]</sup>在考虑主用户干扰约束和卫星用户容量需求约束的条件下,设计了一种功率与时隙联合优化方法,以最大化认知卫星网络的容量。Lagunas 等<sup>[16]</sup>则考虑了认知卫星网络中认知卫星用户的公平性问题,分析了最大最小公平性、比例公平性两种方法的性能。为了简化干扰约束条件, Lagunas 等<sup>[17]</sup>将干扰门限划分为每个卫星用户对主用户的最大干扰值,提出了一种带宽与功率联合优化方法来最大化系统容量。上述文献考虑的卫星信道模型仍然相对简单,且对部分约束条件做出了简化。综上,现阶段对认知卫星网络的资源分配与管理的研究仍然存在很多不足。

本文针对卫星用户作为次级用户与作为主用户的地面网

络共用同一频段的认知卫星网络场景,研究了功率控制与带宽分配的联合优化问题。本文的主要贡献如下:1)根据卫星链路特性和认知接入理论,构建了合理的系统模型;2)根据系统模型,考虑主基站的干扰约束条件、信道估计误差、卫星用户速率需求和发射能力、信道分配约束条件等,引入了纳什议价博弈模型,设计了有效的优化函数,以获取用户间公平性与系统效用的折中;3)根据凸优化理论,推导了本文优化问题的闭合解形式,并设计了一种对偶迭代算法来求解最优功率值和信道分配值;4)通过合理的仿真实验,验证了本文算法的收敛性能,分析了速率需求、波束数和信道估计误差对网络性能的影响。通过与已有相关方法进行性能比较,证明了本文方法能够在用户间公平性和系统容量这两个性能上获得较好的折中。

## 2 系统模型与问题描述

### 2.1 系统模型

考虑一个采用多波束频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)体制的认知卫星网络,其系统模型如图 1 所示。为了减少一跳通信时间,使用星上网络控制中心(Network Control Center, NCC)实现对全网的网络管理。对于上行链路,卫星用户作为次级用户,与作为主用户的地面微波网络共用同一频段。根据 FDMA 接入方案,卫星上行包含  $N$  个波束,每个波束覆盖区域内有 1 个微波基站的上行采用与卫星用户相同的频率,每个波束的上行带宽被划分为  $K$  个子信道,每个波束为  $M$  个卫星用户提供接入服务。波束间的频率复用因子为  $\alpha$ (图 1 示例为 4 色复用,  $\alpha=4$ ),上行总带宽为  $B$ ,则每个波束的带宽为  $B_l = \frac{B}{\alpha}$ 。设  $P_{n,m,k}$  为第  $n$  个波束覆盖区域内的第  $m$  个卫星用户在第  $k$  个信道上的发送功率。令  $\tau_{n,m,k}$  表示带宽资源分配指数,  $\tau_{n,m,k}=1$  表示将第  $n$  个波束的第  $k$  个信道分配给第  $m$  个卫星用户,  $\tau_{n,m,k}=0$  表示不将该信道分配给该用户。

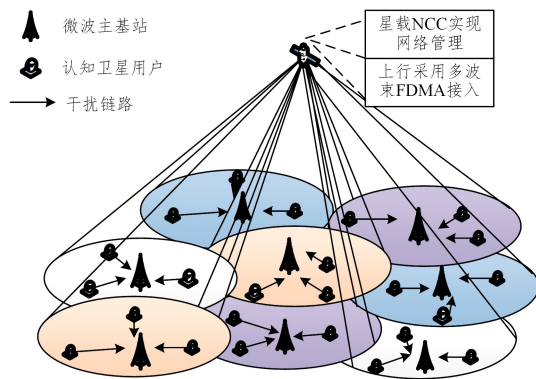


图 1 采用 FDMA 的认知卫星网络模型

Fig. 1 Cognitive satellite network model adopting FDMA

由于使用相同的频段,每个波束中的卫星用户会对该波束下的微波基站产生聚合干扰,其干扰必须低于微波基站的可容纳干扰门限<sup>[12]</sup>  $I_{th,k}^h$ ,即:

$$\sum_{m=1}^M \tau_{n,m,k} P_{n,m,k} g_{n,m,k} \leq I_{n,k}^{\text{th}}, n=1,2,\dots,N, k=1,2,\dots,K \quad (1)$$

其中,  $\sum_{m=1}^M \tau_{n,m,k} P_{n,m,k} g_{n,m,k}$  为第  $n$  个波束下的微波基站在第  $k$  信道受到卫星用户的聚合干扰,  $g_{n,m,k}$  为第  $n$  个波束下的第  $m$  个卫星用户到该波束下的微波基站之间的信道增益。由于地面微波网络用户的发射功率有限,因此微波主用户对卫星接收天线的干扰可以忽略。同时,由于卫星认知用户到卫星的链路主要为视距通信,因此视距(Line of Sight, LoS)信号为主要信号源,卫星信道可以建模为带有加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)的莱斯衰落(Rician Fading)信道。用  $h_{n,m,k}$  表示第  $n$  个波束覆盖区域内的第  $m$  个卫星用户在该波束第  $k$  个信道上的信道衰落系数,则  $|h_{n,m,k}|^2$  服从非中心卡方分布<sup>[13]</sup>,其概率密度函数可以表示为:

$$f_{|h_{n,m,k}|^2}(h) = \frac{1}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{s^2+h}{\sigma^2}\right\} I_0\left(2\sqrt{\frac{s^2 h}{\sigma^4}}\right) \quad (2)$$

其中,  $s^2$  为 LoS 信号功率,  $\sigma^2$  为散射信号功率,  $I_0(\cdot)$  为第一类零阶修正的贝塞尔(Bessel)函数<sup>[13]</sup>。因此,上行增益-噪声功率比可以表示为:

$$\gamma_{n,m,k} = \frac{c^2 |h_{n,m,k}|^2}{(4\pi d_{n,m} f)^2 N_0} \quad (3)$$

其中,  $d_{n,m}$  是认知卫星用户到卫星的距离,  $f$  为中心频率,  $c$  为传播速度,  $N_0$  为 AWGN 功率。为了保障认知卫星用户的服务质量(Quality of Service, QoS),设置  $\mathbf{R}^{\min} = \{R_{n,m}^{\min} | n=1, 2, \dots, N, M=1, 2, \dots, M\}$  为认知卫星用户的最低速率需求集合。根据香农容量公式,第  $n$  个波束覆盖区域内的第  $m$  个卫星用户的可达速率可以表示为:

$$R_{n,m} = \sum_{k=1}^K \tau_{n,m,k} \log_2(1 + P_{n,m,k} \gamma_{n,m,k}) \quad (4)$$

卫星天线接收到的信号强度  $P_{n,m,k} \gamma_{n,m,k}$  必须大于卫星接收信噪比门限  $Th_S$ , 否则通信会中断。但信道估计不能保证没有误差,在非完全信道状态信息(Channel State Information, CSI)条件下,实际信道的上行增益-噪声功率比可以表示为  $\gamma_{n,m,k} = \hat{\gamma}_{n,m,k} + \Delta\gamma_{n,m,k}$ , 其中,  $\hat{\gamma}_{n,m,k}$  为上行增益-噪声功率的估计值,  $\Delta\gamma_{n,m,k}$  为估计误差。当  $\hat{\gamma}_{n,m,k} > \gamma_{n,m,k}$  时,若  $P_{n,m,k} \gamma_{n,m,k} < Th_S$ , 则会产生通信中断。因此,用户在各个信道的中断概率可以表示为:

$$P_{n,m,k}^{\text{outage}} = \Pr\{P_{n,m,k} \gamma_{n,m,k} < Th_S | \hat{\gamma}_{n,m,k} > \gamma_{n,m,k}\} \quad (5)$$

## 2.2 问题描述

针对上一节构建的认知卫星网络模型,考虑在保证认知卫星用户的聚合干扰低于微波基站干扰门限的条件下最大化认知卫星用户的效用函数。本文假设干扰门限等认知信息在每个分配周期前通过微波基站与认知卫星用户的交互已经实现共享。只考虑认知卫星用户的资源优化,并假设地面微波网络的资源配置已经通过合理的算法实现。因此,本文研究的带宽分配和功率控制问题可以表示为:

$$\max_{\mathbf{P}, \boldsymbol{\tau}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M U_{n,m} \quad (6)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{m=1}^M \tau_{n,m,k} P_{n,m,k} g_{n,m,k} \leq I_{n,k}^{\text{th}}, \forall n, k \quad (7a)$$

$$0 \leq P_{n,m,k} \leq P_{\max}, \forall n, m, k \quad (7b)$$

$$P_{n,m,k}^{\text{outage}} \leq Th_o, \forall n, m, k \quad (7c)$$

$$\sum_{m=1}^M \tau_{n,m,k} \leq 1, \forall n, k \quad (7d)$$

其中,  $U_{n,m}$  为认知卫星用户的效用函数,该函数将在下一节设计。式(7a)为干扰约束条件,式(7b)表示卫星用户的发射功率应小于其最大发射功率  $P_{\max}$  的正数,式(7c)表示用户的中断概率应低于预设中断概率门限  $Th_o$ ,式(7d)则约束了单个信道只能分配给一个用户。

## 3 目标函数的设计

### 3.1 纳什议价博弈模型

纳什议价博弈是一种合作博弈模型,在非合作博弈模型中,参与者因无法共享信息进行协同而只关心自己的收益,因此,非合作博弈的结果对系统整体来说不一定是最优的<sup>[18]</sup>。本文为了均衡系统效用与用户效用,在认知卫星用户共享信息、协同工作的假设下,采用基于合作的纳什议价博弈模型来构建优化问题。

假设有  $L$  个参与者参与一个纳什议价博弈,用  $U_l \in \mathbf{U}$  来表示第  $l$  个参与者的效用,其中,  $\mathbf{U}$  为有界、非空、凸的闭空间,表示可行效用空间。参与者通过采取不同的策略,能获得不同的效用。这些策略被看作各个用户的出价。令  $\mathbf{U}^{\min} = (U_1^{\min}, \dots, U_l^{\min}, \dots, U_L^{\min})$  表示参与者最低效用集合,低于最低效用的出价将不被参与者接受,直到每个参与者的出价都被其他参与者接受时博弈结束,达到合作博弈均衡。根据议价博弈理论,存在一个唯一的合作博弈均衡,称为纳什议价博弈解(Nash Bargaining Solution, NBS)<sup>[16]</sup>,可以表示为:

$$\mathbf{U}^{\text{opt}} = \arg \max_{U \in \mathbf{U}, U \geq \mathbf{U}^{\min}} \prod_{l=1}^L (U_l - U_l^{\min}) \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{U}^{\text{opt}} = [U_1^{\text{opt}}, U_2^{\text{opt}}, \dots, U_L^{\text{opt}}]$  为 NBS。NBS 实际上是一种公平策略<sup>[16]</sup>,在满足参与者最低效用需求的条件下,使得参与者获得尽可能公平的效用。当  $U_l^{\min} = 0, \forall l$  时,式(8)的策略等效于比例公平性(Proportion Fairness, PF)策略,但不同于 PF 策略, NBS 通过允许具备不同最低效用需求的参与者获取不同的效用,从而提升系统总效用,能较好地平衡公平性与系统整体性能间的关系。

### 3.2 基于议价博弈的资源优化目标函数

在本文研究的认知卫星网络中,微波基站的干扰约束、带宽资源的有限性,导致同一波束下的认知卫星用户在上行带宽和发射功率资源方面存在竞争关系。同时,由于认知卫星用户间和认知卫星用户与微波基站间存在信息共享与交互假设,基于参与者协同合作的纳什议价博弈模型可以应用到本文场景中,从而在满足约束条件的同时,获得网络整体性能与认知用户间公平性的有效折中。

由于多波束和频率复用技术的引入,在不考虑波束重叠覆盖的情况下,各个波束的带宽资源分配和功率控制问题可以独立进行优化。因此,我们将各个波束的资源分配问题考虑为  $N$  个独立的博弈过程,每个博弈过程中,  $M$  个认知卫星用户作为参与者对带宽资源和功率资源进行出价。式(7a)一式(7d)表示的约束条件则构成了有效效用空间。考虑将系统容量作为优化目标,每个认知用户的效用函数可以表示为式(4)中的可达速率。对式(8)取对数,则式(8)等效于<sup>[19]</sup>:

$$\mathbf{U}^{\text{opt}} = \arg \max_{U \in \mathbf{U}, U \geq \mathbf{U}^{\min}} \sum_{l=1}^L \ln(U_l - U_l^{\min}) \quad (9)$$

考虑将  $\mathbf{R}^{\min}$  作为认知卫星用户的最低效用需求集合,则式(6)中的目标函数可以表示为:

$$\max_{\mathbf{P}, \boldsymbol{\tau}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (\ln(R_{n,m} - R_{n,m}^{\min})) \quad (10)$$

易证明,上述目标函数是一个凹函数,且约束空间为凸空间。因此,根据凸优化理论,可以通过对偶迭代方式求解该问题。

## 4 基于纳什议价博弈的信道与功率联合优化

### 4.1 对偶问题与闭式解

对于凸优化问题,原问题与对偶问题之间的距离可以忽略,因此可将原问题转化为对偶问题求解。根据条件概率公式,约束条件式(7b)中的中断概率  $P_{n,m,k}^{\text{outage}}$  可以重写为:

$$P_{n,m,k}^{\text{outage}} = \frac{\Pr\{\gamma_{n,m,k} < \frac{Th_S}{P_{n,m,k}}, \gamma_{n,m} < \hat{\gamma}_{n,m}\}}{\Pr\{\gamma_{n,m} < \hat{\gamma}_{n,m}\}} = \frac{\Pr\left\{\gamma_{n,m,k} < \frac{Th_S}{P_{n,m,k}}\right\}}{\Pr\{\gamma_{n,m} < \hat{\gamma}_{n,m}\}} \quad (11)$$

为了简化优化问题,将式(7c)中的边界条件作为非完全信道状态信息对网络性能的影响,即:

$$F(\gamma_{n,m,k}) = \frac{F_{|h_{n,m,k}|^2} \left( \frac{Th_S (4\pi d_{n,m,f})^2 N_0}{P_{n,m,k} C^2} \right)}{F_{|h_{n,m,k}|^2} \left( \frac{\hat{\gamma}_{n,m} (4\pi d_{n,m,f})^2 N_0}{C^2} \right)} = Th_o \quad (12)$$

其中,  $F(\gamma_{n,m,k})$  为  $\gamma_{n,m,k}$  的累积概率密度函数;  $F_{|h_{n,m,k}|^2}(\cdot)$  为  $|h_{n,m,k}|^2$  的累积概率密度函数,它可以根据式(2)中的概率密度函数获得。根据凸优化理论,引入拉格朗日乘因子  $\{\lambda_{n,k}\}$  和  $\{\alpha_{n,m,k}\}$ , 则原问题的拉格朗日方程可以表示为<sup>[16]</sup>:

$$L(\mathbf{P}, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}) = L^*(\mathbf{P}, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}) + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \lambda_{n,k} I_{n,k}^{\text{th}} + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \alpha_{n,m,k} P_{\max} \quad (13)$$

其中,  $L^*(\mathbf{P}, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha})$  为包含  $\mathbf{P}$  和  $\boldsymbol{\tau}$  的拉格朗日方程分量:

$$L^*(\mathbf{P}, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (\ln(\sum_{k=1}^K \tau_{n,m,k} \log_2(1 + P_{n,m,k} F^{-1}(Th_o)) - R_{n,m}^{\min})) - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \lambda_{n,k} \tau_{n,m,k} P_{n,m,k} g_{n,m,k} - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \alpha_{n,m,k} P_{n,m,k} \quad (14)$$

因此,根据凸优化理论,对偶方程可以表示为:

$$D(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}) = \begin{cases} \max L(\mathbf{P}, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}) \cong \max L^*(\mathbf{P}, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}) \\ \text{s. t. } \sum_{m=1}^M \tau_{n,m,k} \leq 1, \forall n, k \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $\cong$  表示等效。

通过上述对偶方程,原问题的求解过程可以转化为对偶问题  $\min_{\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}} D(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha})$  的求解过程。对于给定的  $n, m$  和  $\tau_{n,m,k}$ , 根据凸优化理论中的 Karush-Kuhn-Trucker 条件<sup>[18]</sup>, 令

$$\frac{\partial L^*(\mathbf{P}, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha})}{\partial P_{n,m,k}} = 0, \text{ 可得:}$$

$$\frac{\tau_{n,m,k} F^{-1}(Th_o)}{(1 + P_{n,m,k} F^{-1}(Th_o)) \ln 2} = \frac{\tau_{n,m,k} \log_2(1 + P_{n,m,k} F^{-1}(Th_o)) - R_{n,m}^{\min}}{\tau_{n,m,k} P_{n,m,k} g_{n,m,k} + \alpha_{n,m,k}} \quad (16)$$

令  $\Gamma(P_{n,m,k}) = 1 + P_{n,m,k} F^{-1}(Th_o)$ ,  $\varphi = \lambda_{n,k} \tau_{n,m,k} g_{n,m,k} + \alpha_{n,m,k}$ , 将其代入式(16)并整理后可得:

$$\frac{\Gamma(P_{n,m,k})}{2^{\tau_{n,m,k} \frac{R_{n,m}^{\min}}{P_{n,m,k}}}} \log_2 \left( \frac{\Gamma(P_{n,m,k})}{2^{\tau_{n,m,k} \frac{R_{n,m}^{\min}}{P_{n,m,k}}}} \right) = \frac{F^{-1}(Th_o)}{2^{\tau_{n,m,k} \varphi \ln 2}} \quad (17)$$

应用 Lambert-W 函数<sup>[16]</sup> 特性,可得:

$$\frac{\Gamma(P_{n,m,k})}{2^{\tau_{n,m,k} \frac{R_{n,m}^{\min}}{P_{n,m,k}}}} = \exp \left( W \left( \ln \left( 2^{2^{\tau_{n,m,k} \varphi \ln 2} \frac{F^{-1}(Th_o)}{R_{n,m}^{\min}}} \right) \right) \right) \quad (18)$$

其中,  $W(\cdot) = \sum_{i=1}^{+\infty} ((-i)^{i-1} / i!) (\cdot)^i$  为 Lambert-W 函数, 将  $\Gamma(P_{n,m,k}) = 1 + P_{n,m,k} F^{-1}(Th_o)$  和  $\varphi = \lambda_{n,k} \tau_{n,m,k} g_{n,m,k} + \alpha_{n,m,k}$  代入式(18), 整理后可得在已知  $\tau_{n,m,k}$  的条件下, 最佳发射功率的闭式解为:

$$P_{n,m,k}^* = \frac{1}{F^{-1}(Th_o)} \left( 2^{\frac{R_{n,m}^{\min}}{P_{n,m,k}^*}} \exp \left( W \left( \ln \left( 2^{2^{\tau_{n,m,k} \varphi \ln 2} \frac{F^{-1}(Th_o)}{R_{n,m}^{\min}}} \right) \right) \right) - 1 \right)^+ \quad (19)$$

其中,  $(x)^+ = \max(0, x)$ 。

由于优化目标函数是为了最大化容量与需求的差的累积, 因此, 信道一定是分配给占用信道资源后收益最大的用户, 若将  $\tau_{n,m,k}$  松弛为 0 到 1 之间的连续变量, 则信道分配给  $L^*(\mathbf{P}, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha})$  随  $\tau_{n,m,k}$  变化最快的变量。由此, 在给定最佳功率分配的条件下可以获得最佳信道分配的闭式解:

$$\tau_{n,m,k}^* = \begin{cases} 1, & (n, m) = \arg \max \left( \frac{\partial L^*(\mathbf{P}^*, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha})}{\partial \tau_{n,m,k}} \right), \forall k \\ 0, & (n, m) \neq \arg \max \left( \frac{\partial L^*(\mathbf{P}^*, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha})}{\partial \tau_{n,m,k}} \right), \forall k \end{cases} \quad (20)$$

其中:

$$\frac{\partial L^*(\mathbf{P}^*, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha})}{\partial \tau_{n,m,k}} = \frac{\log_2(1 + P_{n,m,k}^* F^{-1}(Th_o))}{\log_2(1 + P_{n,m,k}^* F^{-1}(Th_o)) - R_{n,m}^{\min}} - \lambda_{n,k} P_{n,m,k}^* g_{n,m,k} \quad (21)$$

### 4.2 对偶参量更新与算法设计

在获取了原问题在对偶域的最优闭合解后, 还要求解其对偶问题以获得最佳的对偶参数(拉格朗日乘因子)。上述对偶问题可以利用子梯度法<sup>[18]</sup> 设计迭代算法来求解最佳的对偶参数, 从而获得最佳发射功率值和最佳信道分配值。根据凸优化理论, 对偶参数  $\{\lambda_{n,k}\}$  和  $\{\alpha_{n,m,k}\}$  的子梯度可以分别表示为:

$$\Delta \lambda_{n,k} = I_{n,k}^{\text{th}} - \sum_{m=1}^M \tau_{n,m,k} P_{n,m,k} g_{n,m,k} \quad (22)$$

$$\Delta \alpha_{n,m,k} = P_{\max} - P_{n,m,k} \quad (23)$$

结合子梯度, 对偶参数可以根据下式进行更新:

$$\lambda_{n,k}^{i+1} = \lambda_{n,k}^i - \theta_1^i \Delta \lambda_{n,k} \quad (24)$$

$$\alpha_{n,m,k}^{i+1} = \alpha_{n,m,k}^i - \theta_2^i \Delta \alpha_{n,m,k} \quad (25)$$

其中,  $\lambda_{n,k}^i$  和  $\alpha_{n,m,k}^i$  分别为第  $i$  次迭代后的对偶参量值,  $\theta_1^i$  和  $\theta_2^i$  分别为对偶参数  $\{\lambda_{n,k}\}$  和  $\{\alpha_{n,m,k}\}$  在第  $i$  次迭代时的迭代步长。为了保证收敛, 迭代步长不仅要大于 0, 而且应随着迭代次数的增加而递减, 以保证算法的精度。因此, 迭代步长满足如下条件:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \theta_j^i = \infty, \lim_{i \rightarrow \infty} \theta_j^i = 0, j = 1, 2 \quad (26)$$

结合上述对偶参数更新方法和上一节推导的最佳资源分配的闭式解, 可以设计一种迭代算法来求解本文问题, 如算法 1 所示。所有资源的计算过程均由星上 NCC 完成, 节约了一

跳通信时间,缩短了系统时延。 $\{P_{n,m,k}\}$ 的初始化方式为各认知用户在各信道的初始功率,服从均匀分布; $\{\tau_{n,m,k}\}$ 的初始化则结合初始功率,根据式(20)完成。同时,为了保证迭代效率,提高算法收敛速度,设置最大迭代次数  $I_{\max}$  和终止门限  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$ ,当对偶参数更新达到终止门限或迭代次数达到最大时,算法终止,由星上 NCC 通过信令信道将结果广播给认知卫星用户,完成入网控制。

#### 算法 1 信道分配与功率控制算法

输入:最大迭代次数  $I_{\max}$ ,终止门限  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$

输出: $\{P_{n,m,k}^*\}$ 和 $\{\tau_{n,m,k}^*\}$

步骤 1 星上 NCC 初始化 $\{P_{n,m,k}\},\{\tau_{n,m,k}\},\{\lambda_{n,k}\}$ 和 $\{\alpha_{n,m,k}\},i=0$ 。

步骤 2 星上 NCC 根据式(19)计算最佳发射功率 $\{P_{n,m,k}^*\}$ 。

步骤 3 星上 NCC 根据 $\{P_{n,m,k}^*\}$ 和式(20)计算最佳信道分配值 $\{\tau_{n,m,k}^*\}$ 。

步骤 4 星上 NCC 根据式(24)和式(25)更新对偶参数 $\{\lambda_{n,k}\}$ 和 $\{\alpha_{n,m,k}\}$ 。

步骤 4  $i=i+1$ ,若  $i=I_{\max}$  或  $\lambda_{n,k}^i \Delta \lambda_{n,k} \leq \epsilon_1$  且  $\alpha_{n,m,k}^i \Delta \alpha_{n,m,k} \leq \epsilon_2$ ,进入步骤 5;否则,跳转回步骤 2 继续进行迭代。

步骤 5 星上 NCC 将资源计算结果 $\{P_{n,m,k}^*\}$ 和 $\{\tau_{n,m,k}^*\}$ 广播给认知卫星用户。

## 5 仿真分析

本文仿真参数如表 1 所列。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

名称	符号	数值
波束数	$N$	15~40
每个波束用户数	$M$	50
信道数	$K$	50
中心频率/GHz	$f$	30
用-基信道增益/dB	$g_{n,m,k}$	(-20,-40)
干扰门限/dBm	$I_{n,k}^{th}$	-90
星地距离/km	$d_{n,m}$	36000
视距-散射信号比/dB	$s^2/\sigma^2$	7
视距-散射信号和/dB	$s^2+\sigma^2$	8
噪声功率/dB	$N_0$	-150
最大发射功率/dBm	$P_{\max}$	50
最低速率需求/(bps/Hz)	$R_{\min}$	0.01~0.1
最大迭代次数	$I_{\max}$	80
终止门限	$\epsilon_j$	0.001

首先,在不同最低速率需求的条件下对本文所提算法的收敛性进行仿真。采用 3 种不同的最低用户需求,分别为 0.01 bps/Hz,0.05 bps/Hz,0.1 bps/Hz,卫星波束数固定为 20 个。在完全 CSI 的情况下,即不存在估计误差,仿真结果如图 2 所示。

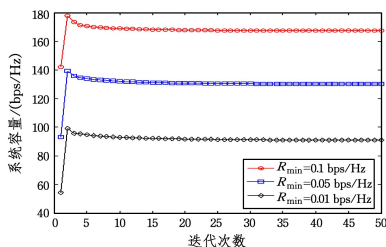


图 2 不同最低速率需求条件下的收敛性

Fig. 2 Convergence under different minimum rate requirements

从图中可以看出,针对不同的最低速率需求,本文算法均可在 50 次迭代之前收敛,证明了本文算法具备合理的收敛速

度。同时,随着最低速率需求的增加,系统总容量也增加,这是因为所有认知用户的可达速率下界值都随着最低速率的上升而增加。

其次,对不同最低速率条件下的系统容量进行仿真,卫星波束数固定为 20 个,同时考虑了完全 CSI 和非完全 CSI 情况。在非完全 CSI 情况下,中断概率门限  $Th_o$  分为 0.01,0.05,0.1,0.2,仿真结果如图 3 所示。与图 2 类似,系统容量随着最低速率需求的增加而增加,且增加速度越来越慢,这是因为发射功率受到干扰门限的约束。同时,信道估计误差的存在,导致资源无法达到最优配置,非完全 CSI 条件下的系统容量会有所降低;并且系统容量与中断概率门限有关,门限越低,系统容量越小,这是因为为了达到较小的中断概率门限,需要提高更多信道估计值比实际信道好的用户的发射功率,从而使得系统无法达到最优状态。

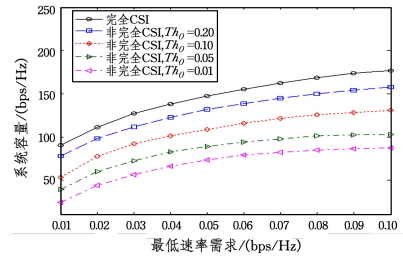


图 3 不同最低速率需求条件下的系统容量

Fig. 3 System capacity under different minimum rate requirements

为了研究本文方法与其他方法之间的差异,在不同波束数、非完全 CSI 和完全 CSI 条件下将其与文献[15]中的最大容量系统法和文献[16]中的比例公平性方法进行比较。考虑认知卫星用户的最小速率需求服从(0.05,0.1) bps/Hz 之间的均匀分布,对于非完全 CSI 情况,设定中断概率门限  $Th_o$  为 0.1,采用蒙特卡洛仿真方式,并对 1000 次结果取平均,结果如图 4 所示。

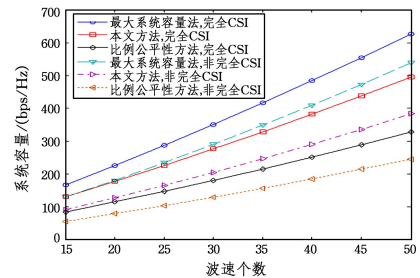


图 4 不同方法的系统容量

Fig. 4 System capacity of different methods

与图 3 类似,信道估计误差导致系统性能降低。波束分集带来的带宽复用,使得系统性能随着波束数的增加而提升。本文方法在容量性能上低于最大系统容量法,但由于允许具有不同最低速率需求的用户之间的资源占用存在差异,其容量性能在波束数多于 15 个时相比比例公平性方法提升了 50 bps/Hz 以上。

正如前文所说,议价博弈方法也是一种公平性算法,图 5 给出了与图 4 相同的仿真条件下的公平性指标性能。公平性指标采用文献[18]给出的计算方法。可以看出,本文算法由于引入了最低速率需求,因此公平性能低于比例公平性算法,但由于比例公平性方法不考虑最低速率需求,在实际工程实

践中可能会导致部分用户低于通信需要的阈值。同时,在波束数多于 15 个时,本文算法的公平性性能是最大系统容量法的两倍多。结合图 4 来分析,本文方法可以在系统容量和用户间公平性之间获得较好的折中。

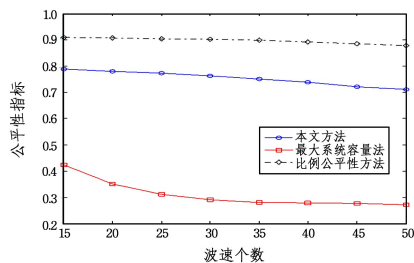


图 5 不同方法的公平性指标

Fig. 5 Fairness index of different methods

**结束语** 本文针对采用多波束 FMDA 体制的认知卫星网络上行功率控制与信道分配问题提出了一种基于合作博弈理论的联合优化方法。该方法利用中断概率门限表征信道估计误差对系统的影响,利用议价博弈模型设计了合理的优化函数,根据凸优化理论推导了功率和信道分配的闭式解,并设计了一种基于对偶迭代的联合优化算法来求得最优解。

通过仿真分析可以发现,本文提出的方法在不同条件下均能较快收敛。同时,本文分析了信道估计误差对系统性能的影响,通过与已有算法的比较可以看出,本文方法能在系统容量和用户间公平性之间获得较好的折中,通过牺牲一定的系统容量性能获取较好的用户间公平性,从而能更好地应用于面向用户的星地同频认知网络的资源管理和优化配置。

## 参 考 文 献

- [1] WU W W. Satellite Communications [J]. Proceeding of IEEE, 1997, 85(6): 998-1010.
- [2] BEM J D, WIECKOWSKI T, ZIELINSKI R J. Broadband Satellite Systems [J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2000, 3(1): 2-15.
- [3] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [4] JIA M, GU X, GUO Q, et al. Broadband Hybrid Satellite-Terrestrial Communication Systems Based on Cognitive Radio toward 5G [J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(6): 96-106.
- [5] ABIDEL-RAHMAN M J, KRUNZ M, ERWIN R. Exploiting Cognitive Radios for Reliable Satellite Communications [J]. International Journal of Satellite Communication Networks, 2015, 33(3): 197-216.
- [6] MALEKI S, CHATZINOTAS S, KRAUSE J, et al. Cognitive Zone for Broadband Satellite Communication in 17.3-17.7GHz [J]. IEEE Wireless Communication Letter, 2015, 4(3): 305-308.
- [7] LIN Z, LIN M, OUYANG J, et al. Beamforming for Secure Wireless Information and Power Transfer in Terrestrial Networks Coexisting with Satellite Networks [J]. IEEE Signal Process Letters, 2018, 25(8): 1166-1170.
- [8] WANG L, LI F, LIU X, et al. Spectrum Optimization for Cognitive Satellite Communications with Cournot Game Model [J]. IEEE Access, 2018, 6: 1624-1634.
- [9] CHAE S H, JEONG C, LEE K. Cooperative Communication for Cognitive Satellite Networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(11): 5140-5154.
- [10] KOLAWOLE O Y, VOPPALA S, SELLATHURAI M, et al. On the Performance of Cognitive Satellite-Terrestrial Networks [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communication Networks, 2017, 3(4): 668-683.
- [11] AN K, LIN M, ZHU W, et al. Outage Performance of cognitive hybrid satellite-terrestrial networks with interference constraint [J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2016, 65(11): 9397-9404.
- [12] VASSAKI S, POULAKIS M I, PANAGOPOULOS A D, et al. Power Allocation in Cognitive Satellite Terrestrial Networks with QoS Constrains [J]. IEEE Communication Letter, 2013, 17(7): 1344-1347.
- [13] GAO B, LIN M, AN K, et al. ADMM-Based Optimal Power Control for Cognitive Satellite Terrestrial Uplink Networks, [J]. IEEE Access, 2018, PP(99): 1-1.
- [14] SHI S, AN K, LI G, et al. Optimal Power Control in Cognitive Satellite Terrestrial Networks with Imperfect Channel State Information [J]. IEEE Wireless Communication Letter, 2018, 7(1): 34-37.
- [15] ZUO P, PENG T, LINGHU W, et al. Optimal Resource Allocation for Hybrid Interwave-Underlay Cognitive SatCom Uplink [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communication Networks Conference (WCNC). Barcelona: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [16] LAGUNAS E, MALEKI S, CHATZINOTAS S, et al. Power and Rate Allocation in Cognitive Satellite Uplink Networks [C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [17] LAGUNAS E, SHARMA S, MALEKI S, et al. Resource Allocation for Cognitive Satellite Communications with Incumbent Terrestrial Networks [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communication Networks, 2015, 1(3): 305-317.
- [18] ZHANG H, JIANG C, BEAULIEU N C, et al. Resource Allocation for Cognitive Small Cell Networks: A Cooperative Bargaining Approach [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6): 3481-3493.
- [19] HEW S, WHITE L B. Cooperative Resource Allocation Games in Shared Networks: Symmetric and Asymmetric Fair Bargaining Models [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11): 4166-4175.



**ZHONG Xu-dong**, born in 1991. He is now a doctoral candidate and an engineer. His research concerns resource management for satellite networks.



**HE Yuan-zhi**, born in 1974. She is now a Research Fellow with Ph.D. degree. Her research concerns satellite communications and cognitive satellite networks.