

## 基于业务优先级的认知卫星网络频谱分配方法

贾敏<sup>1</sup>, 敬晓晔<sup>1</sup>, 刘晓锋<sup>1</sup>, 刘枫<sup>2</sup>, 郭庆<sup>1</sup>, 顾学迈<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国空间技术研究院通信卫星事业部, 北京 100094)

**摘要:** 将认知无线电中的频谱分配技术应用到星地一体化网络中, 能够实现卫星与地面通信网络的频谱共享, 提高卫星通信系统的频谱利用率。首先, 建立一种星地一体化频谱资源共享模型, 分析认知卫星下行链路使用地面网络空闲频谱的场景。然后, 对干扰模型和信号模型进行推导及分析。最后, 考虑卫星地面终端的不同优先级类型, 提出一种基于优先级的频谱分配方案, 在保证下行卫星通信总吞吐量的同时, 增加高优先级地面终端的吞吐量。

**关键词:** 星地一体化; 频谱分配; 优先级; 认知无线电

**中图分类号:** TN91

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2019080

## Spectrum allocation method for cognitive satellite network based on service priorities

JIA Min<sup>1</sup>, JING Xiaoye<sup>1</sup>, LIU Xiaofeng<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>2</sup>, GUO Qing<sup>1</sup>, GU Xuemai<sup>1</sup>

1. School of Electronics and Information, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

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

**Abstract:** By using spectrum allocation technology of cognitive radio into integrated satellite and terrestrial networks, the satellite communication network can share spectrum with the terrestrial network and improve utilization efficiency of frequency spectrum in the satellite communication system. Firstly, a spectrum resource sharing model in integrated satellite and terrestrial networks was introduced, and the scenery that cognitive satellite downlinks use the vacant spectrum of terrestrial network was analyzed. Then, the interference and signal model was analyzed. Finally, considering different priority types of satellite terrestrial terminals, a spectrum allocation scheme based on priority was proposed, which could ensure the total throughput in satellite downlink communication and increase the throughput of high-priority terrestrial terminals.

**Key words:** integrated satellite and terrestrial networks, spectrum allocation, priority, cognitive radio

### 1 引言

随着通信网络和人们生活方式的变化, 卫星通信正在更广泛地应用于宽带通信中。为了提高频谱效率, 卫星通信由 C/Ku 频段的单波束业务向 Ka 频段的多波束业务转移<sup>[1-4]</sup>。同时, 针对下一代通信网络中频谱资源紧张的问题, 引入认知无线电 (CR, cognitive radio) 技术, 在 2 个卫星网络之间或者卫

星网络和地面网络之间进行相同频谱的共享, 可以有效地提高卫星通信的频谱利用率<sup>[2]</sup>。认知卫星通信网络即采用 CR 技术的卫星通信网络, 在不影响授权用户正常通信的前提下, 允许认知卫星通信网络中的认知卫星使用卫星网络或地面网络的授权频谱进行上下行链路的通信。认知卫星通信网络具有卫星通信的信息交互、多网融合和频谱资源利用率高等特点。因此, 可发展更多认知卫星用户, 进

收稿日期: 2018-09-19; 修回日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61671183, No.61771163)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61671183, No.61771163)

而促进卫星通信事业的发展。丰富这一领域的相关研究工作对改善频谱资源利用率、提高卫星通信服务质量和系统容量、促进卫星通信的发展有着十分重要的推进作用。

文献[5-7]将认知无线电与卫星通信相结合,进行认知卫星通信的研究。其中,文献[6-7]提出了一种在卫星和地面一体化的网络中加入认知无线电技术的系统架构,是认知卫星通信网络较早的研究。在5G通信系统中,用户终端接入数量、通信业务覆盖范围以及带宽需求将大幅度增加,因此,基于认知的卫星与地面频谱共享的研究频段由S频段向更高频段(如Ka频段)转移。在Ka频段内,固定卫星业务(FSS, fixed satellite service)的卫星系统与地面固定业务(FS, fixed service)或广播卫星业务(BSS, broadcast satellite service)的通信系统共享频谱资源。对于认知FSS卫星网络,目前有许多研究<sup>[8-17]</sup>。文献[8-9]研究在毫米波频段(mmwave)中卫星业务和蜂窝网共享频谱的场景。其中,文献[8]针对FSS和5G网络之间的频谱共享进行研究。文献[9]的研究场景是Ka频段的认知宽带卫星系统和蜂窝网的频谱共享。文献[10]分析了在满足干扰约束条件的情况下,地面网络作为次级用户,对FSS卫星网络下行链路进行频谱认知的情况,仿真结果表明,随着卫星QoS(quality of service)要求的提高,地面用户有效容量下降。文献[11]对星地混合网络中的中断概率进行了研究,并给出了一种考虑时延的地面终端选择方法。文献[12]研究了星地混合网络中的误码率。文献[13]提出了联合波束成形(beamforming)和资源分配技术,以提高认知FSS卫星下行链路总吞吐量。文献[14]提出了一种优化频率复用和极化的方法,以最大限度地减少FS地面基站受到的干扰。文献[15]介绍了一种功率分配方法,在地面网络认知卫星网络的场景中,在满足地面链路QoS要求的条件下,对地面网络性能进行优化。在认知场景中,如何消除认知用户和主用户之间的相互干扰是关键问题。波束成形技术通过天线调整相位阵列的参数,在最大化认知用户信干噪比(SINR, signal to interference plus noise ratio)的同时,消除了认知链路对主用户的干扰。目前,已有学者研究通过波束成形技术消除干扰。文献[16]对认知地面网络基站发射端进行波束成形,减少认知地面网络信号对卫星系统的干扰,同时最大化认知链路信干噪比。

文献[17]中,FSS卫星网络通过认知FS地面网络的频谱,用于自身的信息传输,在认知卫星下行链路的场景中,通过匈牙利算法对认知卫星地面终端进行频谱分配。但匈牙利算法只能解决平衡矩阵的一对一分配问题,因此,文献[17]设置认知用户数与信道数相同。但在实际场景中,认知用户数与信道数存在动态变化,文献[17]所提方法不具有普遍性。针对这一问题,本文提出一种矩阵转换的方法,能够处理用于匈牙利算法进行频谱分配的矩阵,当认知频谱的可用信道数和认知用户数不相等时,也可以通过匈牙利算法进行频谱分配。此外,文献[17]中提到,当可用信道不足时,采用时分复用方法进行卫星信号传输。此时,会造成部分信号传输时延,影响实时性要求高的用户的性能。针对这一问题,本文根据实时性引入业务优先级这一因素,分析认知卫星地面终端不同的优先级模型,提出一种基于业务优先级的认知卫星下行链路频谱分配方案。

本文的创新点包括以下两点。1) 针对文献[17]中认知用户频谱分配方法只能用于认知用户数和认知频谱的可用信道数相同的场景这一问题,本文提出一种矩阵转换方法,在认知用户和认知频谱动态变化时,仍能进行频谱分配。2) 本文考虑了认知用户不同的业务优先级,提出一种基于优先级的认知用户频谱分配方法,保证高优先级的地面终端分配到频谱的概率远大于低优先级的地面终端,所用频谱质量高于低优先级的地面终端,同时使总吞吐量最大。

## 2 系统模型

本文研究的认知卫星背景是在Ka频段内,FSS的卫星系统与FS的通信系统共享频谱资源的场景。2016年2月,欧洲电信标准化协会(ETSI, European telecommunications standards institute)给出了该场景的相关标准ETSI TR 103 263<sup>[18]</sup>。该标准中指出,该场景中的FSS卫星是提供宽带或多点波束的通信卫星,FSS用户终端类型分为以下2种:1) 安装在居民住所或偏远地区的固定地面终端;2) 安装在移动平台(例如火车和轮船)的移动地面终端。该标准的第7章中指出,在该场景中,通过认知无线电途径,在未对FS系统产生干扰的前提下,FSS系统使用FS系统的频谱资源以提高FSS系统业务的覆盖范围,并提高Ka频段内的频谱利用效

率。在下行链路中，FSS 系统单独使用 19.7~20.2 GHz 的频谱，同时与 FS 系统共享 17.7~19.7 GHz 的频谱；在上行链路中，FSS 单独使用 29.5~30 GHz 的频谱资源，同时与 FS 系统共享 27.5~29.5 GHz 的频谱。FSS 系统与 FS 系统共享频谱资源场景中的认知无线电技术主要包括以下 3 种：频谱认知、频谱开发和干扰消除。其目的分别为：1) 频谱认知的目的是在频谱共享的原则上发现可以用于认知 FSS 地面终端接入的频谱，并且提供干扰水平的相关信息用于确定系统服务质量，使用的主要技术包括数据库和频谱感知；2) 频谱开发的目的是在进行频谱认知后，将 FS 系统中的可用频谱合理分配给认知 FSS 地面终端；3) 干扰消除的目的是通过使用波束成形等技术减少 FS 系统和 FSS 系统之间的链路干扰。

本文研究的资源分配方法属于认知无线电技术中频谱开发的部分，用于分配的频谱是 FSS 系统下行链路和 FS 系统共享的频谱，即 17.7~19.7 GHz 的频谱。研究的具体场景如图 1 所示，主用户网络是地面微波网络，主用户是 FS 基站，FS 链路享有上述频段的使用权。承载 FSS 的卫星通信网络通过认知的方式使用上述频段。

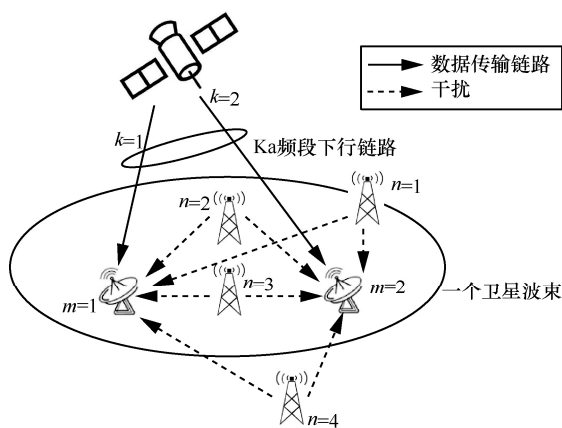


图 1 卫星和地面网络频谱共享模型

在上述场景中，由于 Ka 频段卫星的有效全向辐射功率（EIRP, effective isotropic radiated power）受到限制，认知 FSS 卫星到地面终端的下行链路信号对 FS 地面基站接收端的干扰可以忽略，但需要考虑 FS 基站发射信号对 FSS 地面终端造成的干扰<sup>[19-20]</sup>。

本文 FSS 下行链路频谱分配与认知无线电相结合的研究内容主要分为频谱认知和频谱开发这 2 个

部分。下面根据标准 ETSI TR 103 263<sup>[18]</sup>进行频谱共享过程的详细说明。

1) 本文通过使用数据库完成认知无线电中频谱认知的过程。建立 FSS 系统的数据库，用来存储各 FSS 地面终端的天线方位角、地理位置以及海拔高度等信息，相关信息可通过传输路径特点和设备模型等方式获得。FS 系统的数据库由各国相关部门管理。使用 FS 数据库可以避免在较大地理范围内使用宽带频谱感知方法时，产生较高复杂度的问题。FS 数据库用来存储 FS 地面系统中各基站的相关参数信息。这些数据用来确定未受到 FS 链路干扰的 FSS 地面终端情况，例如，在某一认知区域内，确定某 FSS 地面终端受到来自 FS 基站的干扰与固定门限值的关系。该部分信息由现有数据库提供。

2) 本文的频谱开发过程主要研究 FSS 下行链路频谱分配的过程。频谱分配过程通过为各 FSS 地面终端分配载波来最大化 FSS 系统总吞吐量。本文的主要研究内容是基于 FSS 地面终端优先级和共享频段内各频谱质量，进行频谱分配以最大化下行链路总吞吐量。

### 2.1 信号和干扰模型

首先考虑认知 GEO 卫星部分的信号模型，设认知卫星的一个波束下，存在  $M$  个 FSS 地面终端和  $N$  个 FS 地面基站，卫星认知频谱共有  $K$  个可用信道。根据文献[13]中的模型，在卫星下行链路中，第  $m$  个 FSS 地面终端的接收信号功率  $P_R(m)$  可以表示为

$$P_R(m) = P_T^{\text{SAT}} G_T^{\text{SAT}}(m) G_R^{\text{FSS}}(0) L_S \quad (1)$$

其中， $P_T^{\text{SAT}}$  为 FSS 卫星端的发射功率； $G_T^{\text{SAT}}(m)$  为卫星到第  $m$  个 FSS 地面终端的发送增益； $G_R^{\text{FSS}}(0)$  为地面终端接收卫星信号的天线增益，即当 FSS 地面终端天线对卫星偏离角为  $0^\circ$  时的接收增益； $L_S$  为自由空间路径损耗， $L_S = (\frac{c}{4\pi df})^2$ ， $c = 3 \times 10^8$  m/s 为信号传播速度， $d = 35786$  km 为卫星和 FSS 地面终端的距离， $f$  为传输频率。

工作在频率  $f_k$  的第  $m$  个 FSS 地面终端受到工作在同一频率  $f_k$  的第  $n$  个 FS 地面基站的干扰  $I_m(n, k)$  可表示为

$$I_m(n, k) = P_T^{\text{FS}}(n) G_T^{\text{FS}}(\theta_{n,m}) G_R^{\text{FSS}}(\theta_{m,n}) L(d, f_k) \quad (2)$$

其中， $P_T^{\text{FS}}(n)$  为第  $n$  个 FS 基站的发射功率； $G_T^{\text{FS}}(\theta_{n,m})$  为当第  $n$  个 FS 基站发射端对第  $m$  个 FSS

地面终端的天线偏斜角为  $\theta_{n,m}$  时, FS 地面基站发射端的天线增益;  $G_R^{\text{FSS}}(\theta_{m,n})$  为当第  $m$  个 FSS 地面终端对第  $n$  个 FS 基站发射端的天线偏斜角为  $\theta_{m,n}$  时, FSS 地面终端的接收天线增益;  $L(d, f_k) = \left(\frac{c}{4\pi d f_k}\right)^2$  为自由空间路径损耗,  $d$  为 FS 基站和 FSS 地面终端的距离。

工作在频率  $f_k$  的第  $m$  个 FSS 地面终端受到整个 FS 地面网络的干扰可以表示为

$$I_m(k) = \sum_{n=1}^N I_m(n, k) \quad (3)$$

根据式(1)和式(3), 得到在认知卫星下行链路中, 工作在第  $k$  个信道的第  $m$  个 FSS 地面终端在接收信号时的信干噪比 (SINR) 为

$$\text{SINR}_{\text{down}}(m, k) = \frac{P_R(m)}{I_m(k) + I_{\text{down}}^{\text{co}} + N_0} \quad (4)$$

其中,  $I_{\text{down}}^{\text{co}}$  为在卫星多波束复用的场景中信道之间的干扰;  $N_0$  为环境热噪声。

为方便计算, 将每个 FSS 地面终端接收到卫星信号的 SINR 值整合到一个矩阵  $\text{SINR}_{\text{down}} \in \mathbf{R}^{M \times K}$  中, 如式(5)所示。

$$\text{SINR}_{\text{down}} = \begin{pmatrix} \text{SINR}(1,1) & \cdots & \text{SINR}(1,K) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{SINR}(M,1) & \cdots & \text{SINR}(M,K) \end{pmatrix}_{\text{down}} \quad (5)$$

其中, 每一行代表一个 FSS 地面终端, 每一列代表一个信道。

FSS 地面终端和 FS 基站都装置了发射天线和接收天线, 天线角度不同会导致发送增益和接收增益不同。

根据国际电信联盟的标准 ITU-R S.465, 得到 FSS 地面终端的接收增益为

$$G = \begin{cases} 32 - 25 \lg \varphi & , \varphi_{\min} \leq \varphi < 48^\circ \\ -10 & , 48^\circ \leq \varphi < 180^\circ \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\lambda$  为工作波长,  $D$  为传输距离,  $G$  单位为 dBi。当  $\frac{\lambda}{D} \geq 50$  时,  $\varphi_{\min} = 1^\circ$  或  $\frac{100\lambda}{D}$ ; 当  $\frac{\lambda}{D} < 50$  时,

$$\varphi_{\min} = 2^\circ \text{ 或 } \frac{144\lambda}{D^{-1.09}}.$$

根据国际电信联盟的标准 ITU-R F.1245-2, 得到 FS 地面基站的发送增益为

$$10 \lg \frac{2L}{\lambda_0} \quad (7)$$

其中,  $L$  为天线长度,  $\lambda_0$  为中心工作波长。

## 2.2 优先级模型

在引言中提到, 当认知频谱可用信道数少于认知用户数时, 某一时刻不能使每个用户都分配到信道, 文献[17]指出可使用时分复用解决这一问题。由于优先分配到信号的认知用户具有随机性, 未分配到信道的用户传输信号会产生时延, 产生时延的用户具有随机性, 因此这种分配方法不利于实时性要求高的用户的信号传输。

本文通过建立用户业务优先级模型, 根据实时性要求对用户进行优先级划分, 并提出一种基于优先级的频谱分配方法, 保证优先级高的用户能够优先分配到频谱, 并且其频谱质量优于其他用户频谱。

在本文的模型中, 进行频谱分配的控制中心位于地面, 各用户在进行信号发送的同时, 发送含有优先级等级的信号, 控制中心通过接收这些信号确定下行链路各用户的优先级。

本文参考部分地面网络中的业务优先级分类, 建立业务优先级模型。文献[21]根据车联网所要实现的功能, 将信息指令按照误码率和时延要求不同, 分为 3 种业务优先级。文献[22]根据假设多终端不同的实时性和误码率要求, 将终端优先级分为 3 类, 通过比例设置在算法中进行区别。文献[23]将地面手机业务分为 4 类, 各业务所要求的时延、吞吐量和误码率不同。根据上述关于业务优先级模型分类, 建立本文研究系统中的业务模型。承载军事卫星通信业务的地面终端需要最好的通信质量<sup>[24]</sup>, 其优先级设为最高, 称为优先级 1, 用  $P_1$  表示。根据文献[25-26], 可以将民用 FSS 地面终端分为以下 2 类: 1) 承载传输指令和控制信息的业务, 这类业务对实时性和误码率要求较高; 2) 其他业务, 这类业务对实时性和误码率要求较低。将承载这 2 类业务的地面终端优先级分别设置为次高优先级和最低优先级, 称为优先级 2 和优先级 3, 分别用  $P_2$  和  $P_3$  表示。

上述 3 种优先级业务的集合为  $P = \{P_1, P_2, P_3\}$ ,  $Q(m)$  表示第  $m$  个 FSS 地面终端的优先级, 如式(8)所示。

$$Q(m) = P_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

通过设置不同的  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  的权重, 可约束不同优先级的 FSS 地面终端分配频谱的先后顺序。对

于不同的 FSS 地面终端, 优先级所占权重越大, 其分配到最优信道资源的概率也就越大。

### 3 联合用户优先级的频谱分配方案

#### 3.1 结合优先级的频谱分配方案

根据在数据库中获得的 FS 地面网络的相关参数, 计算  $\text{SINR}_{\text{down}}$  矩阵, 联合优先级矩阵进行频谱分配, 使认知卫星下行链路的总吞吐量最大。

设定矩阵  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1 \cdots \mathbf{a}_k \cdots \mathbf{a}_K]$  为频谱分配矩阵, 其中, 元素  $\mathbf{a}_k \in P^{M \times 1}$  是含有  $M$  个元素的列向量, 当  $\mathbf{a}_k$  中第  $m$  行元素为 1 时, 表示第  $k$  列代表的第  $k$  个频谱分配给第  $m$  行代表的第  $m$  个 FSS 地面终端, 此时, 该列其他元素为 0。因此, 对于每个信道  $k$ , 有  $\sum_{m=1}^M a_k(m) = 1$ , 其中  $a_k(m)$  代表列向量  $\mathbf{a}_k$  中的第  $m$  个元素。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_1(1) & \cdots & a_1(K) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_M(1) & \cdots & a_M(K) \end{pmatrix} \quad (9)$$

设矩阵  $\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_1 \cdots \mathbf{Q}_M]^T$  为 FSS 地面终端优先级矩阵, 其中,  $\mathbf{Q}_m \in R^{1 \times K}$  是含有  $K$  个元素的行向量, 并且  $Q_m(1) = Q_m(2) = \cdots = Q_m(K) = P_i (i=1,2,3)$  为第  $m$  个 FSS 地面终端的优先级。第 2 节中提到, 本文模型中共有 3 个优先级, 本文设定  $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ ,  $P_i$  值越大, 代表该优先级的 FSS 地面终端优先分配信道的权利越大。优先级矩阵表示为

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_1(1) & \cdots & Q_1(K) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_M(1) & \cdots & Q_M(K) \end{pmatrix} \quad (10)$$

衡量系统性能的一个重要指标是系统吞吐量。其中, 第  $k$  个信道工作的第  $m$  个 FSS 地面终端的下行链路吞吐量可以表示为

$$\text{Th}(m, k) = B_{\text{FSS}}(1 + \text{SINR}_{\text{down}}(m, k)) \quad (11)$$

利用式(11), 求得吞吐量矩阵为

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_1(1) & \cdots & Q_1(K) & Q_1(K+1) = Q_1(K) & \cdots & Q_1(M) = Q_1(K) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_M(1) & \cdots & Q_M(K) & Q_M(K+1) = Q_1(K) & \cdots & Q_M(M) = Q_M(K) \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{Th} = \begin{pmatrix} \text{Th}(1,1) & \cdots & \text{Th}(1,K) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Th}(M,1) & \cdots & \text{Th}(M,K) \end{pmatrix} \quad (12)$$

因此, 本文提出的优化目标如式(13)所示。

$$\max_{\mathbf{A}} (\|\mathbf{A} \odot \mathbf{Th} \odot \mathbf{Q}\|) \quad (13)$$

其中,  $\sum_{m=1}^M a_k(m) = 1$ ,  $\odot$  表示矩阵点乘。

解决式(13)所示的优化问题可以采用匈牙利算法, 该算法能够解决一对一的分配问题。然而, 在引言中已经提到, 使用匈牙利算法时, 需要分配矩阵是平衡矩阵, 即要求满足  $M = K$ 。而在实际场景中,  $M$  与  $K$  会动态变化, 因此, 应先将  $\mathbf{Th}$  转化为平衡矩阵, 再采用匈牙利算法进行处理。

#### 3.2 非平衡矩阵转化

本文采用加边补值法, 将非平衡矩阵转化为平衡矩阵, 转化操作不影响计算结果。非平衡有以下 2 种情况: 1) FSS 地面终端数大于认知频谱的可用信道数, 2) FSS 地面终端数小于认知频谱的可用信道数。下面根据这 2 种情况分别进行非平衡矩阵转化。

**情况 1** FSS 地面终端数大于认知频谱的可用信道数

FSS 地面终端共  $M$  个, 信道数为  $K$  个,  $M > K$ , 得到  $\mathbf{Th}$  为  $M \times K$  矩阵。采用加边补值法, 在  $\mathbf{Th}$  的最右边虚拟  $M - K$  列, 构成  $M \times M$  的矩阵。由于匈牙利算法通过迭代找到每行和每列相对较大的数值, 并认为该数值所在的行和列符合分配要求。在本文的分配场景中, 用于分配的矩阵中的元素值均远大于 0。因此, 当某一元素较小时, 不会影响分配结果。本文将新加入的元素置 0, 修改后的矩阵为

$$\mathbf{Th} = \begin{pmatrix} \text{Th}(1,1) & \cdots & \text{Th}(1,K) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Th}(M,1) & \cdots & \text{Th}(M,K) & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

然后, 修改优先级矩阵  $\mathbf{Q}$  为  $M \times M$  的矩阵。增加列中的元素优先级权重与所在行其他权重值相同, 如式(15)所示。

**情况 2** FSS 地面终端数小于认知频谱的可用信道数

FSS 地面终端共  $M$  个，信道数为  $K$  个， $M < K$ 。此时，FSS 地面终端不需要使用所有频谱，而是选择性地使用  $M$  个信道，矩阵为  $M \times K$  矩阵。采用加边补值法，此时，在吞吐量矩阵  $\mathbf{Th}$  的最下边虚拟  $K - M$  行，构成一个  $K \times K$  的矩阵，修改后的矩阵为

$$\mathbf{Th} = \begin{pmatrix} \text{Th}(1,1) & \dots & \text{Th}(1,K) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Th}(M,1) & \dots & \text{Th}(M,K) \\ 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}_{K \times K} \quad (16)$$

同理，新构造的矩阵不会对分配结果产生影响。

然后，修改优先级矩阵  $\mathbf{Q}$  为  $K \times K$  的矩阵，增加行中元素的优先级权重为最低优先级的权重，如式(17)所示。

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_1(1) & \dots & Q_1(K) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_M(1) & \dots & Q_M(K) \\ P_3 & \dots & P_3 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_3 & \dots & P_3 \end{pmatrix}_{K \times K} \quad (17)$$

## 4 仿真结果

为方便仿真又不失合理性，本文选择单个认知 GEO 卫星的一个波束覆盖范围进行仿真。关于仿真中数据的选择，本文采用国际电信联盟中给出的相关标准<sup>[26]</sup>，采用位于欧洲的某一实际卫星系统的相关数据进行仿真，具体的卫星 FSS 网络下行链路相关参数如表 1 所示。由 BR IFIC 数据库<sup>[24]</sup>获得 FS 地面系统链路的相关数据，具体参数如表 2 所示。

### 4.1 优先级权重的确定

在第 2.2 节中提到，由于 3 种优先级的 FSS 地面终端的权重不同，导致认知频谱的可用信道不足时，不同优先级的 FSS 地面终端能够分配到信道的概率不同，所分配信道的质量也不同。设置 3 组不同数值的优先级权重组合，获得各优先级的 FSS 地面终端分配到信道的概率，从而选择合适的权重组合进行仿真分析。

**表 1** 卫星网络相关参数

卫星网络参数	数值
下行链路信道带宽 / MHz	66
认知频带 / GHz	17.7~19.7 (共 30 信道)
GEO 卫星位置	13°E
全向辐射功率 (EIRP) / dBW	65
$G_r^{\text{SAT}}(m)$ / dBi	49.60~54.63
$I_{\text{down}}^{\text{co}}$ / dB	-7.37~-14.16
小区复用方式	4 色复用
$G_r^{\text{FSS}}(0)$ / dBi	42.1
卫星高度 / km	35 786
$N_0$ / dBW	-126.46
地面终端高度 / m	15

**表 2** FS 地面系统相关参数

FS 地面系统参数	数值
天线类型	ITU-F F.1245-2
天线增益 / dBi	5.3~41
全向辐射功率 (EIRP) / dBW	32.9~54.3
天线高度 / m	0~187
带宽 / MHz	13.7~55

设置认知频谱的信道总数为 30，可用信道数量  $K=20$ ，3 种优先级的 FSS 地面终端数量都为 10。由于一个信道在同一波束中只分配给一个用户，此时，可用信道数少于 FSS 地面终端数，只有部分 FSS 地面终端能够分配到信道。按照高优先级的用户优先分配信道的原则，理想实验结果应为：优先级为  $P_1$ 、 $P_2$  的 FSS 地面终端全部分配到信道的概率为 1，而优先级为  $P_3$  的 FSS 地面终端分配到信道的概率为 0。在仿真中，进行 100 次实验，统计以下 3 组数据： $P_1$  优先级的 FSS 地面终端全部分配到信道的次数、 $P_2$  优先级的 FSS 地面终端全部分配到信道的次数、 $P_3$  优先级的 FSS 地面终端分配到信道的次数。观察 3 组仿真结果，选出合理的权重数值设置组合。具体实验结果如表 3 所示。

由表 3 结果可以看出，当优先级权重参数为  $P_1=0.6$ 、 $P_2=0.3$  和  $P_3=0.1$  时，能够保证高优先级的用户优先分配到信道，分配结果符合本文要求。因此，采用此权重组合形式。

### 4.2 性能分析

当频谱资源不足时，本文所提出的频谱分配方法旨在基于用户优先级的前提下，提高更高优先级用户分配到频谱的概率，同时保证系统的总吞吐量。

表 3 权重数值组合与频谱分配实验结果

权重数值	$P_1$ 优先级的地面终端全部分配到信道/次	$P_2$ 优先级的地面终端全部分配到信道/次	$P_3$ 优先级的地面终端分配到信道/次
$P_1 = 0.45, P_2 = 0.3, P_3 = 0.25$	91	87	15
$P_1 = 0.5, P_2 = 0.3, P_3 = 0.2$	95	91	11
$P_1 = 0.6, P_2 = 0.3, P_3 = 0.1$	99	98	2

文献[17]通过匈牙利算法进行频谱分配来最大化系统总吞吐量，当认知频谱的可用信道不足时，采用时分复用进行信号传输。与文献[17]不同，当认知频谱的可用信道不足时，本文考虑业务优先级的因素，对不同优先级用户同时进行频谱分配，使对实时性要求高的用户优先分配到信道，并针对平衡矩阵问题，进行匈牙利算法的改进。具体仿真结果如图 2 和图 3 所示。

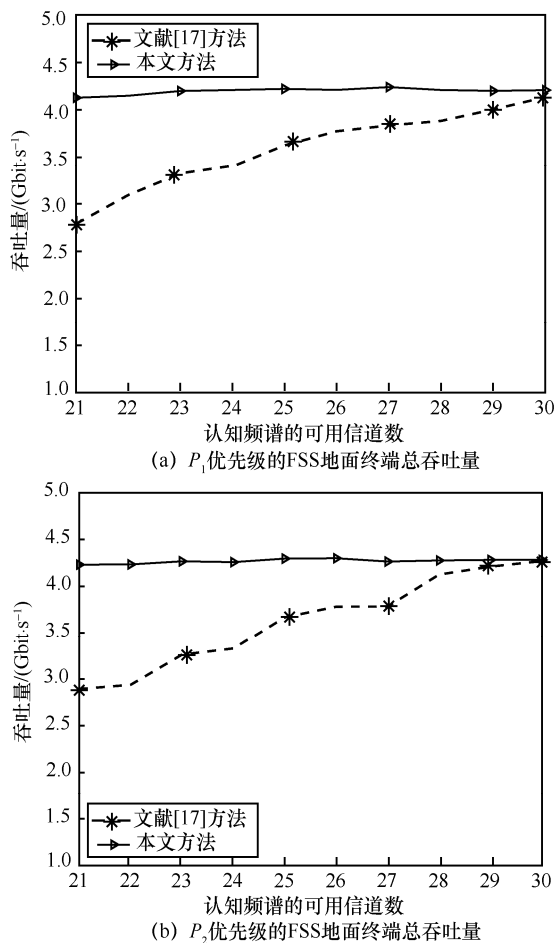


图 2  $P_1$ 、 $P_2$  优先级的 FSS 地面终端总吞吐量

由图 2 可以看出，当信道不足时，只考虑系统总吞吐量的算法<sup>[17]</sup>不能保证  $P_1$ 、 $P_2$  优先级的 FSS

地面终端优先分配到信道， $P_1$ 、 $P_2$  优先级的 FSS 地面终端总吞吐量较低。例如，当可用信道数为 21 时， $P_1$  优先级总吞吐量约为可用信道数为 30 时的  $\frac{2}{3}$ ， $P_2$  优先级总吞吐量比可用信道数为 30 时约少 1 Gbit/s，严重影响高优先级的 FSS 地面终端的性能。采用本文方法时， $P_1$ 、 $P_2$  优先级的 FSS 地面终端的总吞吐量保持在 4 Gbit/s 以上，未受频谱不足的影响。

由图 3 可以看出，与传统的未考虑吞吐量的随机方法相比，文献[17]方法和本文方法的系统吞吐量显著提高。采用本文方法时的系统总吞吐量和只考虑吞吐量的文献[17]算法差别不大，说明使用本文方法在未降低系统总吞吐量的前提下，解决了平衡矩阵分配问题，并提升了高优先级的 FSS 地面终端的总吞吐量，从而保证高优先级 FSS 地面终端的性能。

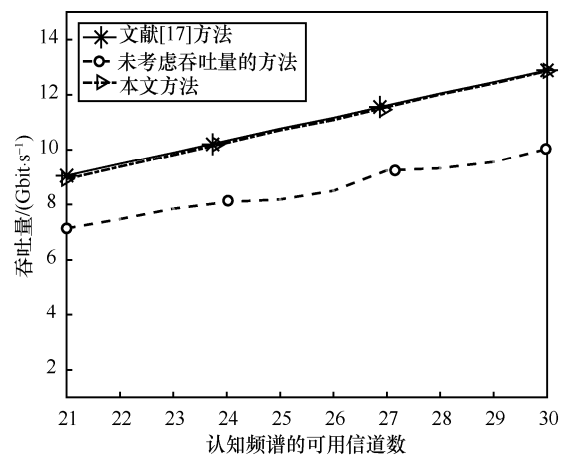


图 3 FSS 地面终端总吞吐量

本文所提改进方法可以根据实际应用场景中的不同优先级业务特点，合理设置优先级权重，在为认知卫星系统分配信道的同时，满足不同场景对于不同优先级用户的不同分配要求，该方法具有一定的灵活性和广泛适用性。

## 5 结束语

本文针对星地一体化网络中的频谱共享问题,分析了卫星 FSS 网络下行链路认知和使用 FS 地面网络频谱的场景,推导了认知卫星下行链路在数据传输时的信号和干扰模型。然后,针对传统匈牙利算法解决分配问题的不足,提出了非平衡矩阵转化方法。最后,在认知频谱资源不足时,通过考虑 FSS 卫星地面终端的优先级类型,建立了优先级模型,提出了一种基于优先级的认知卫星下行链路频谱分配方案,为不同优先级的地面终端分配频谱。仿真结果表明,本文所提改进方法,能够使用匈牙利算法解决认知频谱数与认知用户数不同时的分配问题,保证高优先级的 FSS 地面终端优先分配信道,提高优先级相对较高的 FSS 地面终端的总吞吐量。

### 参考文献:

- [1] VIDAL O, LACAN J, ALBERTY E, et al. Next generation high throughput satellite system[C]//IEEE First AESS European Conference. 2017: 1-7.
- [2] DARCY L B, WILLIAM A W, AARON W. NASA's advanced tracking and data relay satellite system for the years 2000 and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(7): 1141-1151.
- [3] MARKO H, JUKKA K, ARI H, et al. Application of cognitive radio techniques to satellite communication[C]//IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks. 2012: 540-551.
- [4] SINA M, SYMEON C, BARRY E, et al. Cognitive spectrum utilization in Ka band multibeam satellite communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 24-29.
- [5] SITHAMPARANATHAN K, LUCA D N, MARIA G D B, et al. Cognitive satellite terrestrial radios[C]//IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM. 2010: 1-6.
- [6] SHREE K S, SYMEON C, BJORN O. Satellite Cognitive Communications: Interference Modeling and Techniques Selection[C]//6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop. 2012: 111-118.
- [7] SHREE K S, SYMEON C, BJORN O. Cognitive radio techniques for satellite communication systems[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. 2013: 1-5.
- [8] FRANCESCO G, MAZIAR N, LEONARDO B, et al. A cooperative scheduling algorithm for the coexistence of fixed satellite services and 5G cellular network[C]//IEEE International Conference on Communications. 2015: 1322-1327.
- [9] AN K, LIN M, JIAN G Y, et al. Outage performance for the cognitive broadband satellite system and terrestrial cellular network in millimeter wave scenario[C]//IEEE International Conference on Communications. 2017: 1-6.
- [10] AN K, LIN M, ZHU W P, et al. Outage Performance of Cognitive Hybrid Satellite-Terrestrial Networks With Interference Constraint[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 65(11): 9397-9404.
- [11] SOKCHENDA S, BENOIT E, MARIE L B. Exact outage probability of a hybrid satellite terrestrial cooperative system with best relay selection[C]//IEEE International Conference on Communications. 2013: 4520-4524.
- [12] MANAY R B, ARTI M K. Performance analysis of af based hybrid satellite-terrestrial cooperative network over generalized fading channels[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(10): 1912-1915.
- [13] SHREE K S, EVA L, SINA M, et al. Resource allocation for cognitive satellite communications in Ka-band (17.7-19.7 GHz)[C]//IEEE International Conference on Communication Workshop. 2015: 1646-1651.
- [14] EVA L, SINA M, LIE L, et al. Carrier allocation for hybrid satel-lite-terrestrial backhaul networks[C]//International Workshop on Satellite Communications. 2017: 718-723.
- [15] STAVROULA V, MARIOUS I P, ATHANASIOS D P, et al. Power allocation in cognitive satellite terrestrial networks with QoS constraints[C]//IEEE Communications Letters. 2013: 1344-1347.
- [16] SHREE K S, SYMEON C, BJORN O. Transmit beamforming for spectral coexistence of satellite and terrestrial networks[C]//8th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks. 2013: 275-281.
- [17] EVA L, SHREE K S, SINA M, et al. Resource allocation for cognitive satellite communications with incumbent terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2015, 1(3): 305-317.
- [18] ETSI TR 103 263. Cognitive radio techniques for satellite communications operating in Ka band [S]. 2016.
- [19] SHREE K S, SINA M, SYMEON C, et al. Implementation issues of cognitive radio techniques for Ka-band(17.7-19.7 GHz) Sat-Coms[C]//7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop. 2014: 241-248.
- [20] ITU-R S.465-6. Reference radiation pattern for earth station antennas in the fixed-satellite service for use in coordination and interference assessment in the frequency range from 2 to 31 GHz[S]. Series of ITU-Recommendations, 2010.
- [21] PAPANIMITRATOS P, ARNAUD D L F, EVENSSEN K, et al. Vehicular communication systems: enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 47(11): 84-95.
- [22] 朱健, 刘春玲, 卜瑞杰. 面向多终端多业务优先级模型的队列管理

算法[C]//第四届中国指挥控制大会. 2016: 430-434.

ZHU J, LIU C L, BU R J. Queue management algorithm for multi-terminal and multi-service models of priority[C]//The 4th China Conference on Command and Control. 2016: 430-434.

[23] VASER P F, PANOS N, RAJA S. Fair scheduling for real-time multimedia support in IEEE 802.16 wireless access networks[C]//IEEE International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Mul-timedia Networks". 2010: 1-9.

[24] 朱贵伟. Ka 频段军事卫星通信应用[J]. 卫星应用, 2015, 1(7): 10-14.  
ZHU G W. Military satellite communication application in Ka band[J]. Satellite Application, 2015, 1(7): 10-14.

[25] 张振浩, 梁俊, 肖楠, 等. 一种支持业务优先级的卫星网络信道动态接入策略[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(1): 36-42.

ZHANG Z H, LIANG J, XIAO N, et al. Dynamic channel access strategy supporting service with priority for satellite communication network[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(1): 36-42.

[26] ZHONG X D, HE Y Z, YIN H, et al. Joint power and timeslot allocation based on delay priority for multi-beam satellite down-links[C]// International Conference on Progress in Informatics and Computing. 2017: 389-393.

#### [作者简介]



贾敏(1982-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星和无线通信、天地一体化。



敬晓晔(1995-), 女, 山东德州人, 哈尔滨工业大学硕士生, 主要研究方向为卫星和无线通信、天地一体化。



刘晓锋(1961-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为卫星无线通信、天地一体化。



刘枫(1979-), 男, 河北石家庄人, 中国空间技术研究院通信卫星事业部副主任, 主要研究方向为通信卫星体制及系统框架。

郭庆(1964-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星和无线通信、天地一体化。

顾学迈(1957-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星和无线通信、天地一体化。