

# 星地认知网络中基于图论的动态频谱划分算法

朱圣铭<sup>1</sup>, 杨霄鹏<sup>1</sup>, 肖楠<sup>1</sup>, 刘东健<sup>1</sup>, 徐志平<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 96862 部队, 河南洛阳, 471000)

**摘要** 在星地网络间的多授权用户卫星认知通信场景中,提出了一种基于图论的动态频谱划分过程。首先对图论模型进行介绍,其次分析了多授权用户(地面通信基站)条件下的卫星认知通信场景,根据认知用户(地面卫星用户)的感知范围并利用图论模型确定了其与授权用户间的感知矩阵,然后利用认知用户的吞吐量和授权用户的频谱空闲状态等通信参数,通过迭代的方式得到了最终的频谱接入矩阵,完成了多授权用户条件下的频谱划分。仿真结果表明:该算法可在认知用户的感知能力范围内,将认知用户划分到使其收益最大的授权用户频谱中。

**关键词** 认知卫星通信;图论;频谱感知;频谱接入

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.03.007

**中图分类号** TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)03-0041-06

## A Dynamic Spectrum Division Algorithm Based on Graph Theory in Terrestrial-Satellite Cognitive Network

ZHU Shengming<sup>1</sup>, YANG Xiaopeng<sup>1</sup>, XIAO Nan<sup>1</sup>, LIU Dongjian<sup>1</sup>, XU Zhiping<sup>2</sup>

(1. Information and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;  
2. Unit 96862, Luoyang 471000, Henan, China)

**Abstract** A dynamic spectrum division process based on graph theory is proposed in the scenario of multi-authorized user satellite cognitive communication between satellite and ground networks. First of all, the graph theory model is introduced. Secondly, this paper analyzes the cognitive authorized users under the condition of satellite communication scenarios. According to the cognitive users perceive, the paper makes use of the graph theory model with the authorized users' perception of the matrix, and uses the throughput of the cognitive users and the authorized user of spectrum idle state parameters such as communication by iteration to get the final spectrum access matrix and completed many authorized users under the condition of spectrum. The simulation results show that the algorithm can divide cognitive users into the spectrum of authorized users with the highest revenue within the range of cognitive users' perception ability.

**Key words** cognitive satellite communications; graph theory; spectrum sensing; spectrum access

随着无线通信技术的快速发展和业务传输需求的不断增长,卫星通信与地面移动通信对频谱资源

的竞争日益激烈,频谱资源紧缺导致的频谱拥塞和干扰问题逐渐成为制约卫星通信发展的主要因素之

收稿日期: 2020-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(61871474)

作者简介: 朱圣铭(1997-),男,甘肃兰州人,硕士生,研究方向为空天通信与网络。E-mail:1215907472@qq.com

**引用格式:** 朱圣铭,杨霄鹏,肖楠,等.星地认知网络中基于图论的动态频谱划分算法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2022,23(3):41-46. ZHU Shengming, YANG Xiaopeng, XIAO Nan, et al. A Dynamic Spectrum Division Algorithm Based on Graph Theory in Terrestrial-Satellite Cognitive Network[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(3): 41-46.

—<sup>[1]</sup>。虽然高频段卫星频率资源更加丰富,但有限的频谱资源始终是限制卫星通信发展的重要因素<sup>[2]</sup>。为了提高无线频谱利用率,国内外学者先后提出了多种解决方案,如多载波频率复用、时空编码、多天线传输等,但这类技术采用的仍是静态分配策略,无法从根本上解决频谱资源分配不均衡与频率互干扰问题。认知无线电(cognitive radio, CR)<sup>[3]</sup>是实现频率高效利用的一种先进通信理论与技术。认知无线电在卫星通信中的应用能够提高空间频谱资源管理的灵活性,有效缓解频谱资源紧张和干扰问题,提高频谱资源的利用率。

由于图论模型在解决无线资源划分问题上方便有效,近些年来在地面通信网络中应用较多<sup>[4-6]</sup>。图论是数学中的一个重要分支,其利用点和边的集合描述研究对象之间的二元关系,由于其恰好与认知用户和授权用户之间频谱接入问题的解决思路相符合,近些年来受到广泛关注。采用图论解决频谱接入问题的思路就是通过对认知用户通信参数(如对授权用户干扰功率或认知用户感知距离等)与设定值的大小,从而确定认知用户是否拥有接入授权频谱的权利。对于每个认知用户都有可供接入的授权用户集,通过对比相应的收益目标函数和多次迭代的方式来确定最佳的频谱接入方案。文献[7]在图论模型的基础上,加入认知用户功率矩阵和干扰阈值矩阵约束,量化了认知用户对授权用户的干扰和认知用户间的干扰,在此前提下,提升了认知系统整体的吞吐量。文献[8]将图论模型应用于多层频谱管理架构中,通过形成认知用户的感知态势图来获取对授权用户干扰及授权频谱可用性变化等信息,使得认知系统中的频谱接入过程更加清晰有效。文献[9]针对多授权用户情况,从可用授权信道数量、认知用户和授权用户部署密度及授权用户可同时接入的最大数量来描述认知用户与授权用户的连通性问题,其提出的模型架构可适用于大多数认知通信场景。而对于星地认知通信网络,其研究成果较少。图论模型具有较为直观的特性,利用其建立卫星认知通信网络拓补图,可使认知用户快速发现能够接入的授权用户频谱资源。

因此,本文将利用图论模型对多授权用户的卫星上行链路认知通信场景下的频谱划分问题开展研究,并将系统吞吐量作为评价认知用户接入授权用户时获得的收益指标,根据认知用户及其范围内的授权用户的通信参数构建能反映认知用户个体收益的目标函数,通过多次迭代确定在各认知用户效用函数达到最大的频谱接入矩阵,从而最大限度地满足用户业务需求。

## 1 系统模型及问题描述

以往许多学者的研究表明,在星地网络间进行卫星认知用户的动态频谱接入是可行的,多个认知用户可对单授权用户进行频谱接入。但在现实情况中,一定区域范围内的认知用户数量和授权用户数量通常为多个,这就大大增加了卫星认知用户进行动态频谱接入<sup>[10]</sup>的复杂程度。为了降低频谱接入的复杂度,需要将多认知用户对多授权用户进行频谱接入的场景划分为若干个多认知用户对单独授权用户进行频谱接入的场景,使问题模型得以简化。

简单的图论模型可表示为:

$$G=(V, E) \quad (1)$$

式中: $(V, E)$ 表示无向图 $G$ 的一个二元组; $V$ 为图 $G$ 的顶点集; $E$ 为图 $G$ 中边的集合。

考虑到在卫星认知通信场景中存在认知用户和授权用户两方,并且需要设计合适的效用函数,以便对认知用户是否可以接入授权频谱的情况做出判断,则式(1)可表示为:

$$G=(V_1, V_2, E, U) \quad (2)$$

式中: $V_1 = \{v_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 和 $V_2 = \{v_j | j = 1, 2, \dots, m\}$ 分别为卫星认知网络中的认知用户和授权用户; $E$ 为认知用户与其感知到的授权用户之间的连接关系; $U$ 表示当认知用户根据集合 $E$ 选择一个授权用户进行接入其获得的收益集合。设 $L = \{l_{ij}\}_{n \times m}$ 为图 $G$ 的邻接矩阵,则:

$$l_{ij} = \begin{cases} 1, & (v_i, v_j) \in E \\ 0, & (v_i, v_j) \notin E \end{cases} \quad (3)$$

设 $U = \{u_{ij}\}_{n \times m}$ 为图 $G$ 中认知用户的收益矩阵,则:

$$u_{ij} = \begin{cases} U_{ij}, & l_{ij} = 1 \\ 0, & l_{ij} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $U_{ij}$ 表示在认知用户 $i$ 可以感知到授权用户 $j$ 的情况下,认知用户 $i$ 对授权用户 $j$ 进行频谱接入时获得的收益。

在星地网络间卫星认知通信场景中,多授权用户情况下的认知用户动态频谱接入如图1所示。

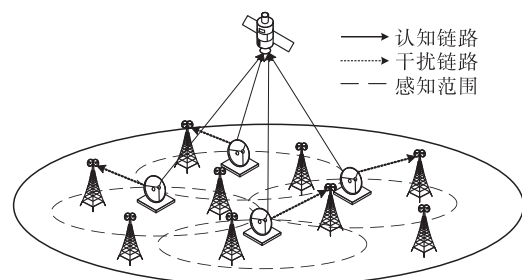


图1 多授权用户情况下的卫星认知通信场景

文献[11]提出的 Generalized-K 信道模型不仅符合卫星链路中信号的传输形式,而且还可以较好地描述地面链路的信号特征。图 1 中,认知用户与授权用户(下文称认知节点和授权节点)共存于同一通信场景。由于地面通信环境多径因素较多,所以其两者间的信道模型可用 Generalized-K 信道模型来表示。

在该模型中,视距分量和多径分量的幅度均服从 Nakagami- $m$  分布,则接收信号功率的概率密度函数为:

$$p(x) = \frac{2b^{\frac{m_A+m_Z}{2}}}{\Gamma(m_A+m_Z)} x^{\frac{m_A+m_Z}{2}} K_{m_A-m_Z}(2b\sqrt{x}) \quad (5)$$

式中: $x>0$ ,  $K_{m_A-m_Z}$  表示第二类修正贝塞尔函数,阶数为  $m_A-m_Z$ ,  $m_Z \geq 0.5$  和  $m_A \geq 0$  分别为多径参数和阴影参数。 $b = \sqrt{m_A m_Z / \Omega_0}$ ,  $\Omega_0$  为认知节点接收端授权信号的平均功率。

在 Underlay 模式<sup>[12]</sup>中,认知用户无需感知授权用户是否占用频谱,允许接入授权用户使用的频段,但是需要预先感知授权用户正常工作所能容忍的最大干扰功率,从而严格控制自身传输功率,使得产生的干扰不超过此阈值,如图 2 所示。本文通过采用数据库技术(database technique)<sup>[13]</sup>建立干扰模型,通过该技术,认知卫星用户可以获得有关各种运行参数的信息,如信道数量、中心频率和该点可用的功率级别等。另一方面,认知用户在 Underlay 模式中也可以动态感知频谱是否被占用,若未被占用,可以加大功率使用频段;若授权用户再次使用,则需要重新调整功率避免超过干扰阈值。因此,在 Underlay 模式中,认知用户可以根据频谱感知状态来动态调整自身功率,使得收益最大化。

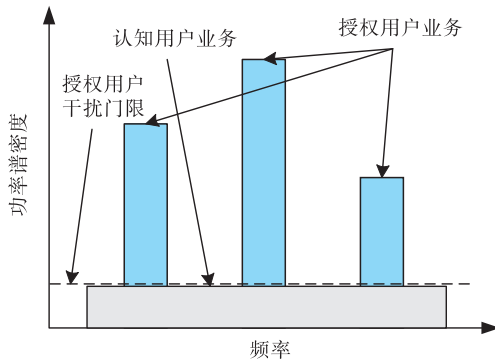


图 2 Underlay 模式下认知用户频谱接入示意图

在本文提出的假设中,对于同一认知用户  $i$ ,可能存在多个授权用户频谱可供接入,此时认知用户  $i$  需要选择使得自身获得收益  $U_{ij}$  最大的授权用户进行频谱接入。而当其他认知用户也选择此授权用户时,会造成所有接入该授权频谱的认知用户获得的收益下降,此时对于认知用户  $i$  可接入的其他

授权用户的频谱收益可能大于之前  $i$  所选择的授权用户频谱收益,认知用户  $i$  需要对其周围的授权用户进行重新选择。当经过多次迭代后,认知用户  $i$  的选择不再变化时,其被划分到收益最大的授权频谱中。

## 2 基于图论的动态频谱划分算法

图 1 所定义的场景中,将星地认知网络覆盖区域定义为  $G$ ,则认知节点  $v_i$  和授权节点  $v_j$  可表示为:

$$v_i = (x_i, y_i) \quad (6)$$

$$v_j = (x_j, y_j) \quad (7)$$

式中: $x_i$  和  $y_i$ ,  $x_j$  和  $y_j$ , 分别为认知节点  $v_i$  和授权节点  $v_j$  在图  $G$  中的横纵坐标,假设认知节点  $v_i$  的感知范围为  $D_i$ ,根据式(6)、(7),则有:

$$l_{ij} = \begin{cases} 1, & |v_i - v_j| \leq D_i \\ 0, & |v_i - v_j| > D_i \end{cases} \quad (8)$$

$L = \{l_{ij}\}_{n \times m}$  为认知节点  $v_i$  和授权节点  $v_j$  间的频谱感知矩阵。当授权节点  $v_j$  可以被认知节点  $v_i$  检测到时,  $l_{ij} = 1$ ; 当授权节点  $v_j$  未在认知节点  $v_i$  的感知范围内,该部分授权频谱不可被认知节点  $v_i$  利用,所以  $l_{ij} = 0$ 。

假设授权节点之间无频谱重叠情况,认知节点仅对进行接入的授权节点产生干扰。根据式(4),认知节点  $v_i$  对授权节点  $v_j$  进行频谱接入时获得的收益  $u_{ij}$  可表示为:

$$u_{ij} = \begin{cases} P_{H_{0,j}} \bar{B}_j \log\left(1 + \frac{P_i}{K_B T_j B_j}\right), & l_{ij} = 1 \\ 0, & l_{ij} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{H_{0,j}}$  为授权节点  $v_j$  的频谱空闲率;  $\bar{B}_j = B_j/n_j$  表示当带宽为  $B_j$  的授权节点  $v_j$  频谱有  $n_j$  个认知节点进行接入时,各认知节点获得的带宽;  $P_i$  为认知节点  $v_i$  的发射功率;  $K_B$  为玻尔兹曼常数;  $T_j$  为认知节点  $v_i$  工作时的绝对温度,设授权节点  $v_j$  可承受的最大干扰门限为  $P_{j,th}$ ,则有:

$$P_{j,th} \geq \sum_{i=1}^n l_{ij} P_{ij,int} \quad (10)$$

式中: $P_{ij,int}$  为认知节点  $v_i$  对授权节点  $v_j$  的干扰功率大小,考虑到授权节点  $v_j$  频谱划分的公平性,对于各认知节点  $v_i$ ,  $P_{ij,int}$  的最大值可表示为:

$$\max(P_{ij,int}) = \frac{P_{j,th}}{n_j} = K_B \bar{B}_j T_{j,th} \quad (11)$$

式中: $T_{j,th}$  定义为授权节点  $v_j$  的最大干扰温度,根据 Generalized-K 信道模型,在认知节点  $v_i$  接入授权节点  $v_j$  频谱的情况下,当使得  $u_{ij}$  最大时,  $P_i$  可表

示为:

$$P_i = \frac{K_B \bar{B}_j T_{j,\text{th}}}{|h_{ij}|^2} \quad (12)$$

式中:  $h_{ij}$  为认知节点  $v_i$  到授权节点  $v_j$  的信道冲击响应, 令  $g_{ij} = |h_{ij}|^2$ , 根据式(5)、(12),  $P_i$  可表示为:

$$P_i = K_B \bar{B}_j T_{j,\text{th}} \int_0^\infty \frac{2b \frac{m_A + m_Z}{2}}{\Gamma(m_A) \Gamma(m_Z)} g^{\frac{m_A + m_Z}{2}} \cdot K_{m_A - m_Z}(2b\sqrt{g}) dg \quad (13)$$

将式(13)代入式(9)中, 可得:

$$u_{ij} = \begin{cases} P_{H_0,j} \bar{B}_j \log\left(1 + \frac{T_{j,\text{th}}}{T_j g_{ij}}\right), l_{ij} = 1 \\ 0, l_{ij} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: 定义  $\xi_{ij} = T_{j,\text{th}}/T_j$  为认知节点  $v_i$  与授权节点  $v_j$  间的最大干扰温度比值。设授权节点  $v_{j_{\text{imax}}}$  为认

知节点  $v_i$  选择的最佳接入节点, 则授权节点  $v_{j_{\text{imax}}}$  可表示为:

$$v_{j_{\text{imax}}} = \arg \max_{v_i = v, v_j \in P_i} u_{ij} \quad (15)$$

式中:  $P_i$  为认知节点  $v_i$  所能感知到的所有授权节点的集合, 令  $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}_{n \times m}$  为最佳接入矩阵, 则  $\mathbf{A}$  可表示为:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, (v_i, v_j) = (v_i, v_{j_{\text{imax}}}) \\ 0, (v_i, v_j) \neq (v_i, v_{j_{\text{imax}}}) \end{cases} \quad (16)$$

设迭代次数为  $c$  时的收益矩阵为  $\mathbf{U}^{(c)}$ ,  $\mathbf{A}^{(c)}$  根据  $\mathbf{U}^{(c)}$  更新自身的元素值  $a_{ij}$ 。当对于接入矩阵  $\mathbf{A}$  经过  $c_0$  次迭代仍不改变, 即  $\mathbf{A}^{(c-c_0)} = \mathbf{A}^{(c-c_0+1)} = \dots = \mathbf{A}^{(c)}$ , 则  $\mathbf{A}^{(c)}$  为最终的最佳接入矩阵。

根据上述内容, 基于图论模型的频谱划分算法流程如图3所示。

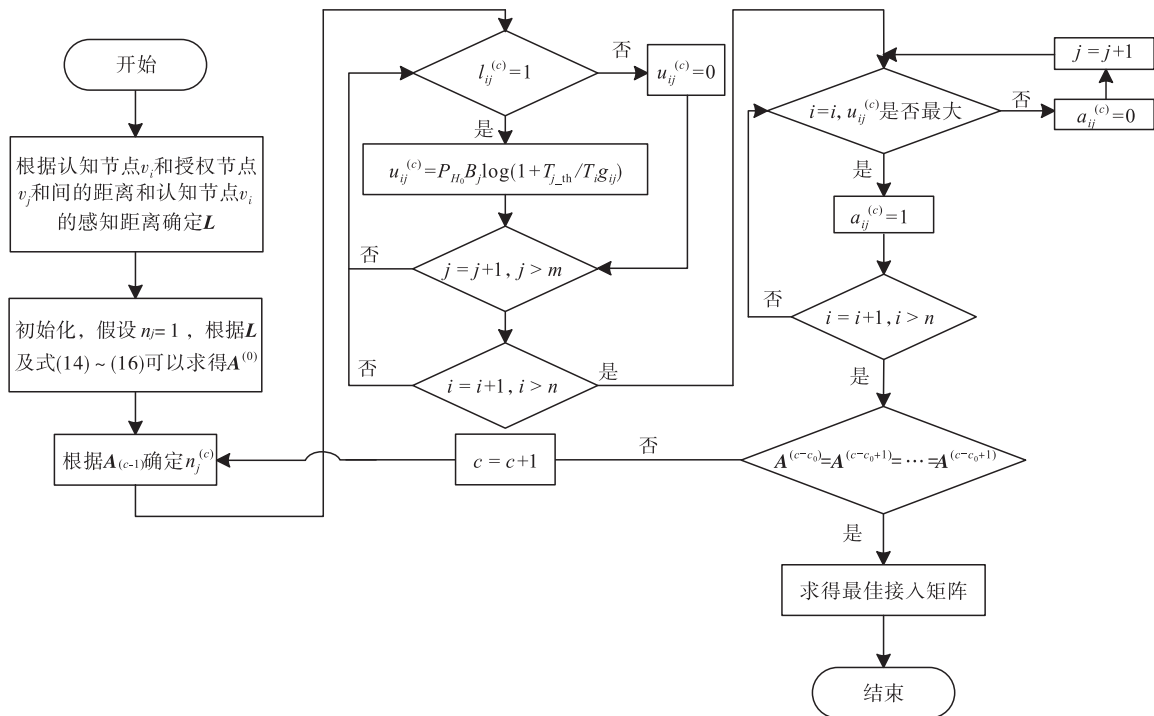


图3 基于图论模型的频谱划分算法流程

由上图可知, 对于图  $G$ , 首先要计算认知节点和授权节点间的感知矩阵  $L$ , 其次进行参数的初始化, 在不考虑接入授权节点  $v_j$  认知节点数量的情况下, 即  $n_j=1$ , 直接根据频谱收益大小来确定授权节点  $v_{j_{\text{imax}}}^{(0)}$ , 其目的是得到最佳接入矩阵的初始值  $\mathbf{A}^{(0)}$ 。然后进行授权节点  $v_j$  的频谱划分, 通过式(14)~(16)确定最佳接入矩阵, 当迭代次数  $c$  达到条件时, 停止迭代, 求得最终的最佳接入矩阵  $\mathbf{A}^{(c)}$ 。

### 3 仿真结果与分析

在本文研究的多授权节点卫星认知通信场景

中, 所有认知节点类型相同, 所有授权节点也为同一类型。部分参数如表1所示。

表1 部分参数

参数	符号	数值
认知节点数	$n$	20
授权节点数	$m$	30
认知节点感知半径/km	$D_i$	5
授权节点空闲概率	$P_{H_0,j}$	(0,1)
最大干扰温度比	$\xi_{ij}$	0.3
授权节点频谱带宽/MHz	$B$	10

其中, 认知节点与授权节点在  $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$  的区域内均匀分布。根据文献[14], 本文采用的 Generalized-K 信道模型有 3 种不同衰落程度的参



数组合: ①在轻度衰落模式中,  $m_A = 38.08, m_Z = 3$ ; ②在中度衰落模式中,  $m_A = 7.91, m_Z = 2.5$ ; ③在重度衰落模式中,  $m_A = 1.09, m_Z = 1.5$ 。在本文仿真实验中, 选取衰落模式为中度的 Generalized-K 信道模型, 即  $m_A$  与  $m_Z$  分别为 7.91 和 2.5。认知节点  $v_i$  与授权节点  $v_j$  的具体参数见表 2 和表 3。

表 2 认知节点的坐标参数

序号	$x_i/\text{km}$	$y_i/\text{km}$	序号	$x_i/\text{km}$	$y_i/\text{km}$
1	6.32	9.79	11	10.27	13.28
2	13.70	13.98	12	13.94	10.07
3	11.03	14.34	13	12.78	8.66
4	7.65	13.17	14	5.69	7.26
5	13.64	12.08	15	7.78	10.34
6	5.58	12.43	16	8.79	7.89
7	9.57	13.99	17	13.64	5.68
8	12.22	5.65	18	9.19	5.84
9	8.39	8.35	19	7.39	5.68
10	9.01	5.04	20	10.97	9.09

表 3 授权节点的坐标参数及频谱空闲率

序号	$x_j/\text{km}$	$y_j/\text{km}$	$v_j$ 空闲概率 $P_{H0j}$
1	9.43	5.07	0.856
2	10.86	2.65	0.899
3	1.19	10.90	0.217
4	13.16	16.55	0.076
5	17.79	16.74	0.474
6	2.19	16.66	0.835
7	8.75	4.07	0.469
8	5.60	10.88	0.413
9	19.70	17.49	0.502
10	12.17	2.42	0.125

将认知节点  $v_i$  表示为  $SU_i$ , 授权节点  $v_j$  表示为  $PU_j$ , 根据以上参数, 认知节点与授权节点的平面分布图如图 3 所示。

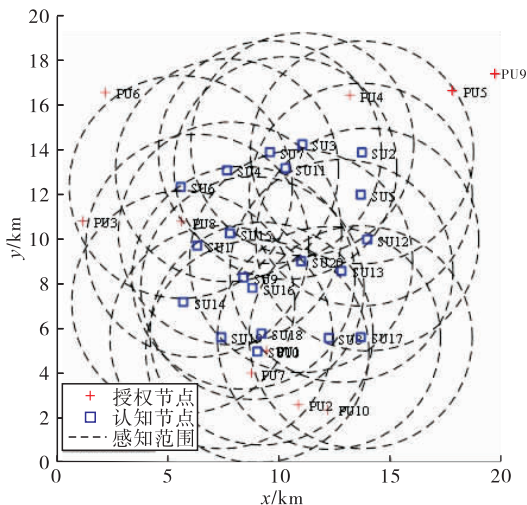


图 3 认知节点与授权节点的平面分布图

上图中红色十字代表授权节点, 蓝色方块代表认知节点, 黑色虚线代表认知节点的感知范围。首先通过式(7)确定频谱感知矩阵, 找到认知节点  $v_i$  的可用接入链路, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 认知节点  $SU_{12}$  的感知范围内没有授权节点, 所以其不能进行频谱接入。而对于授权节点  $PU_6$  和  $PU_9$ , 由于其不在任何一个认知节点的感知范围内, 所以它们的频谱资源不能被利用。根据图 4, 需要确定初始的接入矩阵  $\mathbf{A}^{(0)}$ , 通过计算, 初始的认知节点接入链路可以在图 4 的基础上表现为图 5。

根据迭代次数条件, 设  $c_0 = 2$ , 经过实验仿真, 测得  $c = 11$  时, 频谱划分达到最优, 即  $\mathbf{A}^{(9)} = \mathbf{A}^{(10)} = \mathbf{A}^{(11)}$ 。图 5 为不同迭代次数情况下的授权频谱划分平面图。

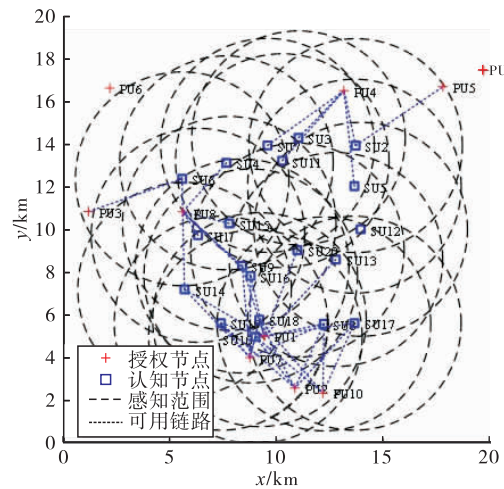


图 4 认知节点的可用接入链路

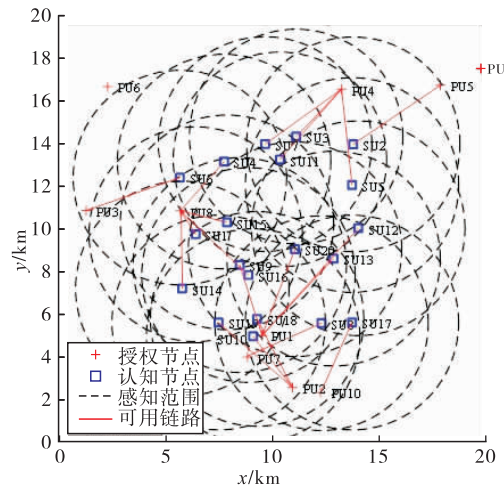


图 5 初始时认知节点接入链路

图 6(a)、(b) 分别为迭代次数为 8 和 9 时的授权频谱划分平面图, 每条接入链路上显示了认知节点频谱收益  $u_{ij}$  的大小。在图 6(b) 中, 认知节点  $SU_{18}$  不接入与其距离较近的授权节点  $PU_1$  和  $PU_7$ , 而是选择接入与其距离较远的  $PU_2$ , 这是因

为当距离较近时,由于授权节点的干扰条件限制,认知节点要降低自身功率以避免对授权节点产生干扰,所以对于认知节点,会选择在自身感知范围内距离较远的授权节点进行接入,以提升自身的频谱收益。由图 6(a)和图 6(b)的对比可以看出,当迭代次数为 8 时,接入策略未达到最佳,认知节点 SU14 和 SU16 的频谱收益分别为 1.182 5 和 0.524 72,当迭代次数达到 9 时,SU14 和 SU16 的频谱收益提升为 1.581 1 和 1.353 6,证明了该算法可以在提升认知节点频谱收益的同时,完成授权频谱的动态划分。

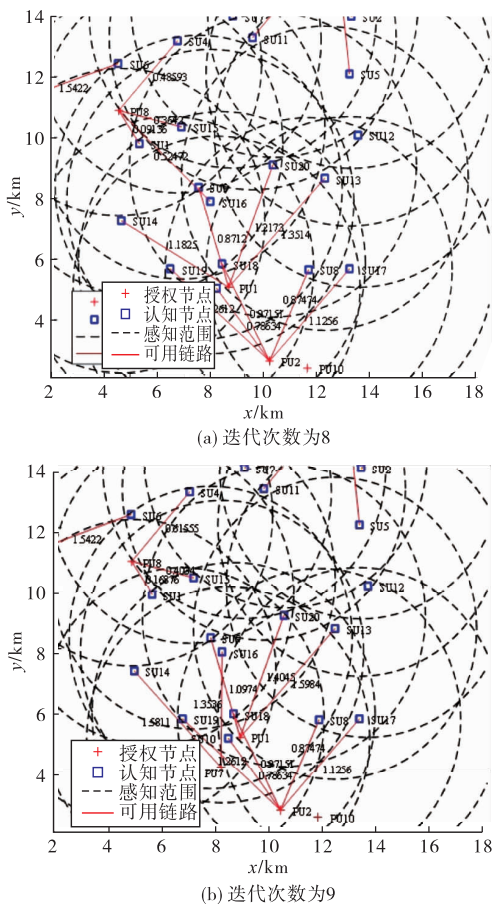


图 6 不同迭代次数的授权频谱划分平面图

## 4 结语

本文针对星地网络间多授权用户的卫星认知通信场景展开研究,对于该场景中多授权用户频谱接入问题提出了基于图论模型的授权频谱划分方法。首先介绍了多授权用户情况下的卫星认知通信场景,其次利用图论对该场景下的授权频谱划分问题进行建模分析,将其划分为多个认知用户与单个授权用户进行频谱接入的场景,设计了授权频谱划分流程,实验结果表明,文中算法可在考虑授权用户干扰条件的情况下,兼顾认知用户频谱收益,完成网络中授权频谱的划分。

## 参考文献

- [1] 郝才勇,骆超,刘恒. 卫星通信近期发展综述[J]. 电子技术应用,2016,42(8),11-15.
- [2] 易克初,李怡,孙晨华,等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报,2015,36(6):1-16.
- [3] WYGLINSKI A, NEKOVEE M, HOU Y T. Cognitive Radio Communications and Networks: Principles and Practice[M]. [S. l.]: Elsevier/Academic Press, 2008.
- [4] CHAI R, LI Y P, CHEN Q B. Joint Pricing and Spectrum Allocation for Cognitive Radio Network [C]//2013 8th International Conference on Communications and Networking. Guilin: IEEE, 2013: 633-637.
- [5] LIU Y, XU G, TAN X. A Novel Spectrum Allocation Mechanism Based on Graph Coloring and Bidding Theory [C]//2009 International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing. Wuhan:[s. n.] 2009: 155-158.
- [6] SWAMI S, GHOSH C, DHEKNE R P, et al. Graph Theoretic Approach to QoS-Guaranteed Spectrum Allocation in Cognitive Radio Networks [C]// 2008 IEEE International Performance, Computing and Communications Conference. Austin, Texas: IEEE, 2008: 354-359.
- [7] LIU F, MA J, DU R, et al. ICSGC-Based Dynamic Spectrum Access Algorithm for Cognitive Radio [C]// 2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Chongqing:[s. n.], 2017: 5692-5697.
- [8] YING X, BUDDHIKOT M M, ROY S. Coexistence-Aware Dynamic Channel Allocation for 3.5 GHz Shared Spectrum Systems [C]//2017 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks. Piscataway, NJ:[s. n.], 2017: 1-2.
- [9] OSAMA, ABBAS, HOSSEIN, et al. Multi-Channel Distributed DSA Networks: Connectivity and Rendezvous Tradeoffs [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2017, 3(1): 67-81.
- [10] AUK A, GA B, ZHA C, et al. Spectrum Efficiency in CRNs Using Hybrid Dynamic Channel Reservation and Enhanced Dynamic Spectrum Access[J]. Ad Hoc Networks, 2020, 107(1):102246.
- [11] BITHAS P S, SAGIAS N C, MATHIOPOULOS P T, et al. On the Performance Analysis of Digital Communications over Generalized-K Fading Channels [J]//IEEE Communications Letters, 2006,10(5): 353-355.
- [12] LI Y, BADUGE G. Underlay Spectrum-Sharing Massive MIMO NOMA [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(1):116-119.
- [13] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Cognitive Radio Techniques for Satellite Communication Systems [C]//2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2013.
- [14] 阮玉晗. 面向新型混合星地网络的资源分配与性能分析[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018.

(编辑:徐楠楠)