

# 基于认知无线电技术的动态频谱分配方案研究

葛雨明<sup>1,2)</sup> 孙毅<sup>1)</sup> 蒋海<sup>1)</sup> 李军<sup>1)</sup> 李忠诚<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

<sup>2)</sup>(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘 要** 随着物联网的发展,人们能够更加方便快捷地利用智能终端,随时随地接入到无线网络中进行业务数据传输.然而,激增的移动用户数量和业务的带宽需求,使得无线频谱资源日益稀缺,现有固定式频谱分配方案面临巨大挑战.面向物联网发展,如何满足用户的高移动性和呈爆炸式增长的业务传输需求成为物联网研究的重点.认知无线电技术,一方面允许用户终端自适应感知所处环境的频谱资源空闲信息,为用户营造一个无缝的接入环境,保证用户的高移动性;另一方面通过动态频谱分配有效地解决了频谱资源稀缺和现有授权频谱资源利用率低的问题,为用户的海量数据传输提供保证.作者基于认知无线电技术,提出了一个用户终端和网络端共同参与决策的两级动态频谱分配框架结构,并提出了两级动态频谱分配方案.该方案设计包含:空闲频谱资源排序选择算法和集中式的联合优化匹配算法.通过用户终端和网络端的协同工作,文中所提出的两级动态频谱分配方案能够有效满足用户的高移动性和业务传输服务质量需求,实现空闲频谱资源利用率和频谱间切换概率的联合优化,为移动用户的海量数据传输提供保证.仿真实验结果表明,与传统图匹配方法相比较,该方案能够平均提高全网服务质量有效吞吐量70%,平均降低频谱间切换概率56%.

**关键词** 物联网;认知无线电;动态频谱分配;服务质量

中图法分类号 TP393 DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2012.00446

## Research on Dynamic Spectrum Allocation Using Cognitive Radio Technologies

GE Yu-Ming<sup>1,2)</sup> SUN Yi<sup>1)</sup> JIANG Hai<sup>1)</sup> LI Jun<sup>1)</sup> LI Zhong-Cheng<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

<sup>2)</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** With the fast development of wireless communication technologies and the amazing increasing of user numbers in Internet of Things, the limited spectrum resources have become more and more scarce. However, today's spectrum resources are regulated by a fixed assignment policy and they are in inefficient usage. How to satisfy users' high mobility and mass data transmission requirements are new challenges. Cognitive Radio is one of these technologies that can offer users a seamless accessing environment, and solves the current spectrum inefficiency problems. It represents a great potential for the development of Internet of Things. In this paper, using Cognitive Radio technologies, we propose a cognitive radio users and networks cooperative spectrum allocation framework, then propose a dynamic spectrum allocation solution. This solution consists of two algorithms: One is a Spectrum Ranking Selecting algorithm (SRS) implemented at cognitive radio users, to meet their QoS and mobility requirements; and the other is a Joint Optimization Matching algorithm (JOM) implemented at the networks, by achieving the co-optimization between spectrum utilization and handoff rate to satisfy the mass data transmission require-

收稿日期:2011-08-31;最终修改稿收到日期:2011-12-29. 本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2011CB302702)资助. 葛雨明,男,1985年生,博士研究生,主要研究方向为未来互联网体系架构. E-mail: geyuming@ict.ac.cn. 孙毅,男,1979年生,博士,副研究员,主要研究方向为下一代互联网. 蒋海,男,1980年生,博士,主要研究方向为未来互联网体系结构. 李军,男,1974年生,博士,高级工程师,主要研究方向为服务计算. 李忠诚,男,1962年生,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机网络.

ment. With the cooperation between cognitive radio users and networks, our solution can construct an efficient dynamic spectrum allocation. Simulation results show that, compared with the traditional mapping algorithm, our solution can significantly improve the performance of networks in terms of throughput by 70% and spectrum handoff rate by 56%.

**Keywords** Internet of Things (IoT); Cognitive Radio (CR); dynamic spectrum allocation; Quality of Service (QoS)

## 1 引言

物联网(Internet of Things, IoT)的迅猛发展,使得人们能够更加方便快捷地利用智能终端,随时随地接入到无线网络当中进行业务传输。然而,激增的用户数和移动多媒体业务越来越高的带宽需求,给日益稀缺的无线频谱资源和现有固定式频谱分配方案带来了巨大挑战。美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的研究结果<sup>[1]</sup>显示,随着时间和空间的变化,固定分配模式下授权频谱资源的利用率为15%~85%。而随着物联网的进一步演进,这种频谱资源紧缺现象势必将更加严重<sup>①</sup>。如何满足物联网节点的高移动性和呈爆炸式增长的业务传输需求,成为未来物联网研究的重要问题。

认知无线电技术(Cognitive Radio, CR)<sup>[2]</sup>的提出被看作是解决上述问题的最直接手段<sup>[3]</sup>。基于认知无线电技术的物联网节点(也称为认知用户或者次用户)具备环境感知和传输参数重配置能力。此类节点通过周期性感知所处环境的频谱有效性信息和智能学习,机会性接入到授权用户(也称为主用户)的空闲频谱资源进行业务传输,从而实现频谱资源的动态利用。借助于认知无线电技术,空闲频谱资源的动态分配,一方面可以为认知用户营造一个无缝的无线接入环境,实现任何时间、任何地点的高可靠性通信,保证物联网节点的高移动性;另一方面可以有效地解决频谱资源稀缺和现有授权频谱资源利用率低的问题,为物联网节点的海量数据传输提供保证。

基于认知无线电技术,本文提出了一个认知用户终端和网络端共同参与决策的两级动态频谱分配框架结构,并在此基础上提出了一套两级动态频谱分配解决方案。该方案设计包含:一个空闲频谱资源排序选择算法(Spectrum Ranking Selecting algorithm, SRS)和一个集中式的联合优化匹配算法(Joint Optimization Matching algorithm, JOM)。通

过认知用户终端和网络端的协调工作,该方案能够有效满足认知用户业务传输的服务质量需求(Quality of Service, QoS),实现空闲频谱资源利用率和频谱间切换概率的联合优化,为物联网节点的高移动性和海量数据传输提供保证。

本文第2节介绍相关研究工作;第3节阐述我们的设计方案;第4节给出仿真实验结果;第5节对全文做出总结。

## 2 相关工作

近些年来,频谱资源的日益稀缺和现有授权频谱资源利用率低等问题已成为物联网进一步发展的瓶颈。基于认知无线电技术的动态频谱分配方法可以有效解决上述问题,因此受到了研究界的广泛关注。在文献[2]中, Akyildiz 和 Lee 指出,具备认知无线电技术的认知用户能够依据频谱资源的空闲情况,合理选择适于当前业务传输的空闲频谱资源,解决现有授权频谱资源利用率低的问题。在文献[4]中, Zhao 和 Sadler 对频谱资源动态分配所需要解决的关键问题进行总结,并对现有不同类别的动态频谱分配方法进行了对比分析。依据优化目标的不同,现有主流的动态频谱分配方法可以划分为以下3类:(1)以最大化空闲频谱资源利用率为目标的动态频谱分配方法;(2)以最小化频谱间切换概率为目标的动态频谱分配方法;(3)以满足认知用户特定服务质量需求为目标的动态频谱分配方法。

现有以最大化空闲频谱资源利用率为目标的动态频谱分配方法中,以文献[5-6]最具代表性。在文献[5]中, Zheng 和 Cao 提出了一种用户驱动的动态频谱分配方法,分析了认知用户公平性和空闲频谱资源利用率之间的合理折中。在文献[6]中, Yuan 和 Bahl 引入空闲频谱资源块的概念,采用空闲频谱带宽和空闲时长来描述可以被认知用户利用的空闲频

① Internet of Things in 2020. <http://www.smart-systems-integration.org/public/internet-of-things>.

谱资源,并将动态频谱分配问题进行了形式化描述.文献[6]中所提出的动态频谱分配方法,不仅给出了当前空闲频谱资源可以使用的中心频点,还计算出了可被利用的频带带宽.

现有以最小化频谱间切换概率为目标的动态频谱分配方法中,以文献[7-9]最具代表性.在文献[7]中,An和Ji提出了3种不同的接入控制机制,通过控制不同区域内的认知用户数量,达到降低认知用户被迫从当前接入频谱断开连接的概率.在文献[8]中,Jo和Cho提出了一个启发式的匹配算法,以最小化空闲频谱时长和应用服务时长的偏差为目标进行动态频谱分配,从而降低了认知用户因上层应用无法完成传输而被迫发生频谱间切换的概率.然而文献[8]中所提算法计算复杂度较高,因此Jo和Cho在文献[9]中又提出了两种复杂度较低的图匹配贪心算法和分级匹配算法.

现有以满足认知用户特定服务质量需求为目标的动态频谱分配方法中,以文献[10]最具代表性.在文献[10]中,Swami提出在进行频谱分配时需要同时考虑用户请求优先级和当前空闲频谱资源属性特征,提出了一种基于分类图匹配的动态频谱分配方法,来满足不同优先级认知用户的服务质量需求.

对现有动态频谱分配方法进行分析,仍存在以下几个问题未得到很好的解决:(1)在对空闲频谱资源属性特征进行描述时,现有大多数动态频谱分配方法仅使用信道容量这个单一指标,然而一个有效的空闲频谱资源刻画方法应当综合考虑影响业务传输的各个频谱资源属性特征,并为各个属性特征自动生成影响权重;(2)物联网节点的业务传输具有多样性和多媒体化的特点,新的动态频谱分配方法应当具备有效满足认知用户业务传输服务质量需求的能力;(3)区别于现有的大多数研究,新的动态频谱分配方法应当考虑空闲频谱资源利用率和频谱间切换概率的联合优化,从而更加有效地解决频谱资源稀缺和现有授权频谱资源利用率低的问题.

### 3 方案设计

面向物联网节点的高移动性和海量数据传输需求,针对现有动态频谱分配方法所存在的不足,本文基于认知无线电技术提出了一个认知用户终端和网络端共同参与决策的两级动态频谱分配框架结构,并对每一个模块的功能进行了详细描述.在此基础上,本文提出了一套两级动态频谱分配解决方案,该方案设计包含以下两个核心算法:在认识用户终端,

为了满足物联网节点随时随地的无线网络接入请求和业务传输服务质量需求,提出了一个基于TOPSIS多属性决策方法的空闲频谱资源排序选择算法(Spectrum Ranking Selecting algorithm, SRS);在网络端,为了实现空闲频谱资源的有效利用,满足物联网节点的海量数据传输需求,提出了一个集中式的联合优化匹配算法(Joint Optimization Matching algorithm, JOM).以下各章节将对本文的研究工作做进一步阐述.

#### 3.1 两级动态频谱分配框架结构

图1即为本文所提出的认知用户终端和网络端共同参与决策的两级动态频谱分配框架结构,该框架结构设计包含以下6个主要的功能模块,分布于认知用户和网络两端.各个模块的功能划分和相互间协作关系,详细描述如下.

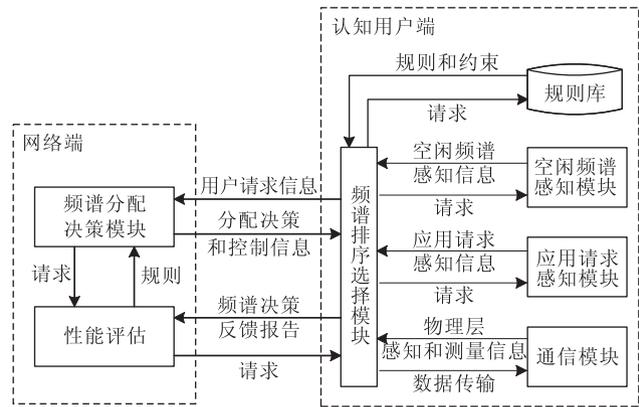


图1 面向物联网需求的两级动态频谱分配框架结构

##### (1) 频谱分配决策模块

频谱分配决策模块位于网络端,其主要功能是收集各个认知用户的空闲频谱检测和应用请求信息,并根据过往周期的决策历史,做出新一轮的频谱分配决策.如何保证分配决策的有效性,以满足物联网节点的海量数据传输需求,是该模块设计实现的重点,将在3.3节中进行详细讨论.

##### (2) 性能评估模块

性能评估模块位于网络端,维护着过往周期的频谱分配决策历史信息,并负责从认知用户终端收集空闲频谱使用反馈报告,从而辅助频谱分配决策模块,改善动态频谱分配的决策性能.

##### (3) 频谱排序选择模块

频谱排序选择模块位于认知用户终端.其主要功能是根据当前应用的服务质量需求,计算认知用户对各个空闲频谱资源的喜好度,并将相应信息上传给网络端的频谱分配决策模块.如何保证物联网节点的高移动性和业务传输服务质量需求,是该模

块设计实现的重点,将在 3.2 节中进行详细讨论。

#### (4) 规则库

规则库设计包含各个应用程序所需要满足的服务质量要求,指导终端频谱排序选择模块对空闲频谱资源进行排序选择。

#### (5) 终端感知模块

终端感知模块位于认知用户终端,包含以下两个重要部分:空闲频谱感知模块,周期性检测频谱资源的空闲信息;应用请求感知模块,周期性检测并识别认知用户的业务传输请求。

#### (6) 通信模块

通信模块是认知用户的终端收发器,受控于频谱排序选择模块,负责数据和控制信令的传送。此外,当认知用户需要在不同频谱间进行切换的时候,通信模块负责切换的执行和切换信令的传输。

### 3.2 空闲频谱资源排序选择算法

在认知用户终端,频谱排序选择模块的设计与实现是解决动态频谱分配问题的重点和难点,为了满足物联网节点的高移动性和业务传输服务质量需求,本文提出了一个基于 TOPSIS 多属性决策方法的空闲频谱资源排序选择算法(Spectrum Ranking Selecting algorithm, SRS)。TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution)<sup>[11]</sup>是经典的多属性决策方法,其基本思想是构造求解问题的正理想解和负理想解,通过计算各个可用方案到理想方案的相对贴适度(尽可能地靠近正理想解而远离负理想解)来对各个方案进行排序,从而选出最优方案。

对于任何一个认知用户  $i$  而言,假设可用频谱资源集合当中有  $m$  个空闲频谱资源,每一个空闲频谱资源的属性特征都由  $k$  个指标来描述,由此可用频谱资源集合和频谱属性特征集合就构成了一个  $m \times k$  阶的决策矩阵  $\mathbf{B} = [b_{j,l}]_{m \times k}$ 。假设空闲频谱资源的属性特征权重向量为  $\mathbf{W} = (\omega_1, \omega_2, \omega_l, \dots, \omega_k)$ , 计算各属性特征对应的权重  $\omega_l$ , 并用其对决策矩阵  $\mathbf{B}$  进行加权,得到变换矩阵  $\mathbf{C} = [c_{j,l}]_{m \times k}$ , 其中  $c_{j,l} = \omega_l \times b_{j,l}$ 。由此,构造空闲频谱资源排序选择问题的正理想解  $C^+$ 、负理想解  $C^-$ ,  $C^+ = \{c_1^+, c_2^+, c_3^+, \dots, c_k^+\}$ ,  $C^- = \{c_1^-, c_2^-, c_3^-, \dots, c_k^-\}$ , 其中

$$\begin{aligned} c_l^+ &= \max\{c_{j,l} | j=1, \dots, m\} \\ &= \omega_l \max\{b_{j,l} | j=1, \dots, m\} = \omega_l b_l^+ \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_l^- &= \min\{c_{j,l} | j=1, \dots, m\} \\ &= \omega_l \min\{b_{j,l} | j=1, \dots, m\} = \omega_l b_l^- \quad (2) \end{aligned}$$

根据式(3)和(4)分别计算各个空闲频谱资源  $j$  与正理想解  $C^+$  和负理想解  $C^-$  的距离  $d_j^+$  和  $d_j^-$ , 进

而根据式(5)计算各个空闲频谱资源与理想方案的相对贴适度  $N_j$ 。

$$d_j^+ = \sum_{l=1}^k (c_{j,l} - c_l^+)^2 = \sum_{l=1}^k \omega_l^2 (b_{j,l} - b_l^+)^2, \quad j=1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

$$d_j^- = \sum_{l=1}^k (c_{j,l} - c_l^-)^2 = \sum_{l=1}^k \omega_l^2 (b_{j,l} - b_l^-)^2, \quad j=1, 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

$$N_j = \frac{d_j^-}{d_j^+ + d_j^-}, \quad j=1, 2, 3, \dots, m \quad (5)$$

从式(5)可以看出,相对贴适度  $N_j$  是衡量空闲频谱资源与理论最优解贴适度以及与理论最差解远离程度的变量,它的取值越大说明该空闲频谱资源越合适。对于每一个认知用户而言,就是要根据  $N_j$  的取值对可用频谱资源集合进行排序,尽可能选取  $N_j$  值最大的空闲频谱资源进行业务传输。此外,对于  $N_j$  值相同的空闲频谱资源,本文认为这些空闲频谱资源能为认知用户提供的服务质量保证是相同的,对其随机进行排序。

然而,  $N_j$  的计算要依赖于空闲频谱资源的属性特征权重向量  $\mathbf{W}$ , 因此合理计算影响频谱排序选择的属性特征权重向量  $\mathbf{W}$ , 是 SRS 算法执行的前提条件。本文提出了一种多属性权重自生成方法,为空闲频谱资源的各个属性特征自动生成权重,避免用户直接指定权重的主观不合理性和计算复杂性,以下即为该方法的详细计算过程:

从式(5)可以看出,贴适度  $N_j$  与  $d_j^+$  成反比,即  $d_j^+$  越小所选空闲频谱资源越适合于当前业务传输,由此构造最优化函数:

$$\begin{aligned} \text{目标: } \min & \sum_{j=1}^m d_j^+ = \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^k (b_{j,l} - b_l^+)^2 \omega_l^2 \\ \text{s. t. } & \sum_{l=1}^k \omega_l = 1 \quad (6) \end{aligned}$$

应用拉格朗日乘法对上式作变换,得到式(7):

$$f_{\text{lagrange}}(\mathbf{W}, \lambda) = \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^k (b_{j,l} - b_l^+)^2 \omega_l^2 - \lambda \left( \sum_{l=1}^k \omega_l - 1 \right) \quad (7)$$

由拉格朗日乘法原理可知式(6)的极值点包含在式(7)的偏导方程组中,令  $\frac{\delta f_{\text{lagrange}}}{\delta \mathbf{W}} = 0$ ,

$\frac{\delta f_{\text{lagrange}}}{\delta \lambda} = 0$ , 得到

$$\begin{cases} 2 \sum_{j=1}^m (b_{j,l} - b_l^+)^2 \omega_l - \lambda = 0, & l=1, 2, 3, \dots, k \\ \sum_{l=1}^k \omega_l - 1 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

求解式(8)的多元线性方程组,最终得到

$$\omega_l = \frac{1}{\sum_{l=1}^k \frac{1}{\sum_{j=1}^m (b_{j,l} - b_l^+)^2} \times \sum_{j=1}^m (b_{j,l} - b_l^+)^2} \quad (9)$$

显然,由式(9)求得的权重满足  $\omega_l \geq 0$  且求和等于1,并且能够满足目标函数(6)的取值最小,因此,我们可以使用(9)计算得到的权重向量对可用频谱资源集合与频谱属性特征集合构成的决策矩阵  $\mathbf{B}$  进行加权。

空闲频谱资源排序选择算法(SRS)的具体描述如算法1所示。首先根据认知用户各业务流的服务质量需求构建可用频谱资源集合,其次由权重自生成方法计算各个属性特征在决策过程中的影响权重,最后利用 TOPSIS 多属性决策方法计算可用频谱资源集合中各个空闲频谱资源的相对贴近度,认知用户尽可能选择相对贴近度较大的空闲频谱资源进行业务传输。

#### 算法1. 空闲频谱资源排序选择算法.

输入: 认知用户  $i$  的应用请求感知信息和空闲频谱感知信息

输出: 认知用户  $i$  对空闲频谱资源  $j$  的喜好度  $N_j$

初始化: 依据规则库的业务传输服务质量需求,对满足当前应用服务质量需求的空闲频谱资源进行筛选,得到可用频谱资源集合;

权重自生成: 合理计算影响空闲频谱资源排序选择的频谱资源各个属性特征权重  $\omega_l$ ;

TOPSIS 多属性决策: 计算认知用户  $i$  对可用频谱集合中空闲频谱资源  $j$  的喜好度  $N_j$ , 并依据  $N_j$  对空闲频谱资源进行排序。

### 3.3 联合优化匹配算法

在网络端,频谱分配决策模块的设计与实现是解决动态频谱分配问题的重点,为了实现空闲频谱资源的有效利用,满足物联网节点的海量数据传输需求,本文提出了一种集中式的联合优化匹配算法(Joint Optimization Matching algorithm, JOM). 该算法以联合优化空闲频谱资源利用率和频谱间切换概率为目标,解决认知用户和空闲频谱资源之间的分配选择问题. 假设  $SU = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  为认知用户集合,  $n$  为认知用户数量;  $SEP = Sep_1 \cup Sep_2 \cup \dots \cup Sep_n = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}$  为可用频谱资源集合,  $M$  为空闲频谱资源数量,其中  $Sep_i$  为认知用户  $i$  的可用频谱资源集合. 则该动态频谱分配问题可以表示为在集合  $SU$  和集合  $SEP$  之间寻找一个匹配关系满足

$$\text{目标: } \max_{1 \leq i \leq N} \min_{1 \leq j \leq N} N_{i,j} \times U_{i,j} \times P_{i,j}$$

$$\max \sum O_{i,j} \times P_{i,j}$$

$$\text{s. t. } U_{i,j} = \frac{x_{i,\text{requirement}}}{y_{j,\text{capacity}}}$$

$$\sum_i O_{i,j} = \sum_i P_{i,j} = 1$$

(10)

$$\sum_j O_{i,j} = \sum_j P_{i,j} = 1$$

$$O_{i,j} \in \{1, 0\}, P_{i,j} \in \{1, 0\}$$

式(10)的目标函数1表示最小最大化各个空闲频谱资源的资源利用率;目标函数2表示最小化频谱间切换概率,即在不影响业务传输服务质量需求的情况下,新一轮的频谱分配决策能够尽可能维持原有的频谱分配决策选择.  $U_{i,j}$  表示认知用户  $i$  占用空闲频谱资源  $j$  的的频谱资源利用率;  $N_{i,j}$  表示认知用户  $i$  对空闲频谱资源  $j$  的喜好度,由3.2节计算得到;矩阵  $\mathbf{O} = [O_{i,j}]_{N \times N}$  和  $\mathbf{P} = [P_{i,j}]_{N \times N}$  分别记录了上一个频谱分配决策周期和新一轮频谱分配决策周期,认知用户集合与可用频谱资源集合之间的匹配关系,其中  $N = \max\{n, M\}$ .

由式(10)可以看出这是一个多目标的0-1规划问题,使用传统算法进行求解的复杂度是  $O(n!)$ . 为了降低算法的计算复杂度,本文提出了JOM算法,在不影响性能的情况下,有效降低算法复杂度至  $O(n^3)$ .

在每一轮频谱分配决策周期内,JOM算法将根据空闲频谱资源的资源利用率和  $SU/SEP$  映射是否为原有匹配关系,为  $SU/SEP$  构成的二部图  $G$  的每条边分配一个新的权值 *Hyper-weight*,如图2所示. 权值的详细分配原则如下:对于不能满足新一轮频谱分配决策周期内最低频谱资源利用率要求的边,设定其 *Hyper-weight* = 0;对于满足最低频谱资源利用率要求的边,如果认知用户与空闲频谱资源映射存在于原有匹配关系当中,则设定 *Hyper-weight* =  $N+1$ ;其余情况设定 *Hyper-weight* =  $N$ . JOM算法通过引入新的二部图权值,将空闲频谱资源利用率和频谱间切换概率的双目标优化问题,转换成单一目标二部图  $G$  的最大权值完美匹配问题,该问题可以由匈牙利算法直接进行求解<sup>[12]</sup>.

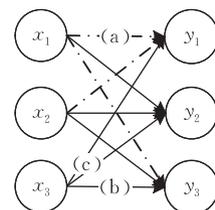
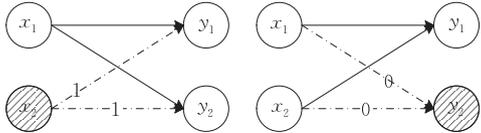


图2 权值 *Hyper-weight* 设定

由于标准化的二部图才存在着完美匹配,如何构造一个标准化二部图成为 JOM 算法实现的关键. 本文提出了一个预处理机制,对集合  $SU$  和  $SEP$  所构成的二部图  $G$  进行标准化处理. 如果认知用户数目  $n$  小于空闲频谱资源数目  $M$ ,则增加  $M-n$  的认知用户至集合  $SU$ ,并设定其相应权值为 1,如图 3(a)所示;如果认知用户数目  $n$  大于空闲频谱资源数目  $M$ ,则增加  $n-M$  的空闲频谱资源至集合  $SEP$  并设定其相应权值为 0,如图 3(b)所示.



(a) 二部图标准化( $n < M$ ) (b) 二部图标准化( $n > M$ )

图 3

联合优化匹配算法(JOM)的具体描述如算法 2 所示. 算法首先构造集合  $SU$  和  $SEP$  的标准化二部图  $G$ ;其次计算新一轮频谱分配决策周期的最低频谱资源利用率,并结合认知用户与空闲频谱资源映射是否存在于原有匹配关系当中,为每条边设定 *Hyper-weight* 权值;最后利用匈牙利算法求解最大权值完美匹配问题,得到认知用户与空闲频谱资源之间的匹配关系. 此外,JOM 算法可以通过调整新一轮频谱分配决策周期内的最低频谱资源利用率阈值,来平衡空闲频谱资源利用率和频谱切换概率两者之间的优化关系.

#### 算法 2. 联合优化匹配算法.

输入: 认知用户  $i$  的可用频谱资源集合  $Sep_i$ ;

输出: 认知用户集合  $SU$  和可用频谱资源集合  $SEP$  之间的匹配关系

二部图构造: 构造由认知用户集合  $SU$  和可用频谱资源集合  $SEP$  组成的二部图  $G$ ;

阈值计算: 以频谱资源利用率最小最大化为单一优化目标,计算新一轮频谱分配决策周期内所应满足的最低频谱资源利用率;

二部图  $G$  的权值 *Hyper-weight* 设定: 对于频谱资源利用率低于新一轮频谱资源利用率阈值的匹配关系,设定其权值 *Hyper-weight* = 0,对于频谱资源利用率高于新一轮频谱资源利用率阈值且为原有匹配关系的,设定其权值 *Hyper-weight* =  $N+1$ ,其余情况,设定其权值为 *Hyper-weight* =  $N$ ;

匈牙利算法: 求解二部图  $G$  的最大权值完美匹配问题.

## 4 仿真实验

本文通过仿真实验对所提出的两级动态频谱分

配方案进行了性能评估. 假设认知用户和授权用户的到达概率均服从泊松分布. 假设仿真场景中存在两类空闲频谱资源: 空闲频谱 {1,2,3} 为开放式 ISM 频段频谱资源; 空闲频谱 {4,5,6} 为蜂窝网通信频段频谱资源. 各个空闲频谱资源的属性特征如表 1 所示,其中延迟和带宽随频谱分配决策周期而变化.

表 1 空闲频谱资源各属性特征指标

	带宽/Kbps	时延/ms	抖动/ms	丢包率/%
空闲频谱 1	4000	150~500	10	<5
空闲频谱 2	5000	140~500	20	<5
空闲频谱 3	4500	130~500	15	<5
空闲频谱 4	2000	37~50	3	<1
空闲频谱 5	96	35~50	4	<1
空闲频谱 6	1000	43~50	3	<1

仿真中产生 3 种类型的业务: 话音、视频和文件传输. 其中话音业务的服务质量需求最为严格(时延 < 50 ms, 抖动 < 5 ms, 丢包率 < 3%, 带宽占用 9.6 Kbps); 视频业务需求(时延 < 200 ms, 抖动 < 50 ms, 丢包率 < 5%, 带宽占用 90 Kbps); 而文件传输类业务对时延、抖动和丢包率无特殊需求,支持最高传输速率为 120 Kbps.

图 4 显示了采用本文所提出的两级动态频谱分配解决方案,不同类型业务随分配周期变化的空闲频谱资源占用情况. 话音业务,该方案优先将其分配到蜂窝网通信频段的空闲频谱上进行传输,这是由于该频段的频谱资源能够更好地满足话音业务的高服务质量需求. 视频和文件传输业务,在满足时延需求的前提下,该方案优先将其分配到 ISM 频段的空闲频谱上进行传输,这是由于 ISM 频段的空闲频谱资源可以提供较高的传输带宽. 此外,该方案在不影响空闲频谱资源利用率的情况下,通过维持原有的频谱分配决策,来尽可能避免发生频繁的频谱间切换. 而在当前空闲频谱资源不能满足业务传输服务质量需求或者物联网节点发生移动的情况下,该方案能够自适应感知周围环境的频谱资源空闲信息,将认知用户切换到其他空闲频谱资源上进行业务传输,满足物联网节点随时随地的无线网络接入请求和高移动性要求.

图 5 显示了网络有效吞吐量随认知用户数量的变化关系. 网络有效吞吐量定义为满足认知用户服务质量需求的吞吐量,即认知用户所发送的数据包能够被接收端成功接收的才视为对网络有贡献的吞吐量. 与传统图匹配方法相比,本文所提出的两级动态频谱分配解决方案设计包含一种基于 TOPSIS 多

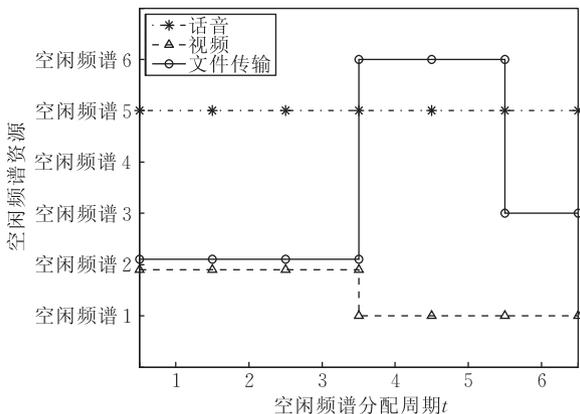


图 4 物联网节点的频谱分配选择和切换

属性决策方法的空闲频谱资源排序选择算法(SRS). 该算法在考虑信道容量的同时, 采用更多的频谱资源属性特征对空闲频谱资源进行刻画, 包括时延、抖动和丢包率. 因此, 本文提出的两级动态频谱解决方案能够更好地满足认知用户业务传输的服务质量需求, 提高网络有效吞吐量, 从而满足物联网节点的海量数据传输需求. 仿真实验结果表明, 该解决方案能够平均提高全网有效吞吐量 70%.

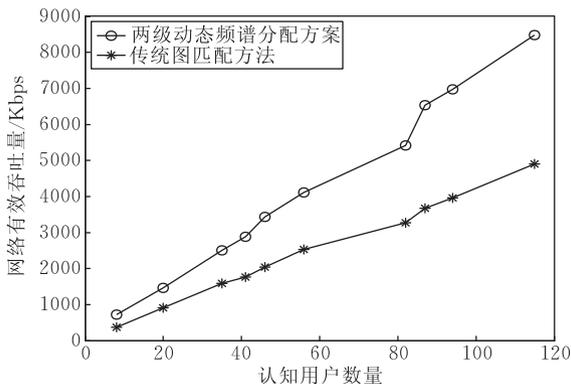


图 5 网络有效吞吐量随认知用户数量的变化关系

图 6 描述了认知用户频谱间切换概率随认知用户数量的变化关系. 与传统图匹配方法相比, 本文提出的两级动态频谱分配解决方案设计包含一个集中式的联合优化匹配算法(JOM). 该算法在提高空闲频谱资源利用率的同时, 考虑对频谱间切换概率的联合优化. 此外, 算法通过引入新的二部图边权值, 将该双目标优化问题转化为可以利用匈牙利算法直接进行求解的最大权值完美匹配问题, 有效降低了算法的计算复杂度. 因此, 本文提出的两级动态频谱分配解决方案能够实现空闲频谱资源利用率和频谱间切换概率的联合优化. 仿真实验结果表明, 在不损失空闲频谱资源利用率的情况下, 该解决方案能够平均降低频谱间切换概率 56%.

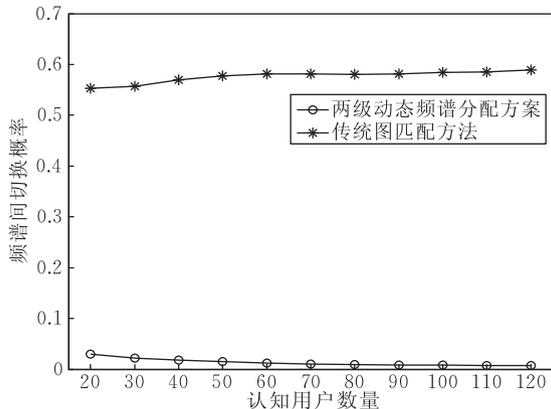


图 6 频谱间切换概率随认知用户数量的变化关系

## 5 总 结

物联网的迅猛发展, 给日益稀缺的无线频谱资源和现有固定式频谱分配方案带来了巨大压力. 在频谱资源紧缺的情况下, 如何保证物联网节点的高移动性和海量数据传输需求是本文研究的重点.

基于认知无线电技术, 本文提出了一个认知用户终端和网络端共同参与决策的两级动态频谱分配框架, 并在此基础上提出了一套两级动态频谱分配解决方案. 该方案设计包含一个空闲频谱资源排序选择算法(SRS)和一个集中式的联合优化匹配算法(JOM). SRS 算法位于认知用户终端, 该算法在考虑信道容量的同时, 采用更多的频谱资源属性特征(包括时延、抖动和丢包率)对空闲频谱资源进行刻画; JOM 算法位于网络端, 通过引入新的二部图边权值 *Hyper-weight*, 在不增加计算复杂度的情况下, 实现了空闲频谱资源利用率和频谱间切换概率的联合优化. 在认知用户终端和网络端的协同工作下, 本文所提出的两级动态频谱分配解决方案能够有效实现空闲频谱资源的动态分配: (1) 满足物联网节点的高移动性和业务传输服务质量需求; (2) 为物联网节点的海量数据传输提供保证. 仿真实验结果表明, 与传统图匹配方法相比, 该解决方案能够平均提高全网有效吞吐量 70%、平均降低频谱间切换概率 56%.

本文所提出的两级动态频谱分配方案仍然是一种集中式的动态频谱分配方法, 需要网络当中具备物理或者逻辑上的集中式控制节点, 负责信息的汇聚和处理. 然而, 在本文的讨论当中并没有考虑集中式信息交互和处理所带来的交互时延和开销. 未来的研究工作一方面将设计实现认知用户与集中式控

制节点之间的信息交互机制, 计算信息交互所带来的时延和开销; 另一方面将研究提出一种分布式的动态频谱分配方法, 从而避免集中式信息交互所带来的问题。

### 参 考 文 献

- [1] FCC. Notice of proposed rule making and order. ET Docket No. 03-222, Dec, 2003
- [2] Akyildiz I F, Lee W Y, Vuran M C, Mohanty S. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks Journal*, 2006, 50(13): 2127-2159
- [3] Qin Y, Shen Q, Lin T, Zhao Z, Tang H, Ci S, Feng Z. Cognitive network management in Internet of things. *China Communications*, 2011, 8(1): 1-7
- [4] Zhao Q, Sadler B M. A survey of dynamic spectrum access. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(3): 79-89
- [5] Zheng H, Cao L. Device-centric spectrum management// *Proceedings of the IEEE DySPAN 2005*. Baltimore, USA, 2005: 56-65
- [6] Yuan Y, Bahl P, Chandra R, Moscibroda T, Wu Y. Alloca-

ting dynamic time-spectrum blocks in cognitive radio networks//*Proceedings of the MOBIHOC 2007*. Montreal, Canada, 2007: 130-139

- [7] An C, Ji H, Si P. Dynamic spectrum access with QoS provisioning in cognitive radio networks//*Proceedings of the IEEE Globecom 2010*. Miami, USA, 2010: 1-5
- [8] Jo O, Park J H, Cho D-H. QoS provisioning spectrum management based on intelligent matching and reservation for cognitive radio system//*Proceedings of the IEEE CrownCom 2007*. Orlando, USA, 2007: 530-534
- [9] Jo O, Cho D-H. Efficient spectrum matching based on spectrum characteristics in cognitive radio systems//*Proceedings of the IEEE WTS 2008*. Pomona, Canada, 2008: 230-235
- [10] Swami S, Ghosh C, Dhekne R P, Agrawal D P, Berman K A. Graph theoretic approach to QoS-Guaranteed spectrum allocation in cognitive radio networks//*Proceedings of the IEEE IPCCC 2008*. Austin, USA, 2008: 354-359
- [11] Deng H, Yeh C H, Willis R J. Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights. *Computers & Operations Research*, 2000, 27(10): 963-973
- [12] Kuhn H W. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1955, 2(1-2): 83-97



**GE Yu-Ming**, born in 1985, Ph. D. candidate. His research interest is future Internet architecture.

**SUN Yi**, born in 1979, Ph. D., associate professor. His research interest is next generation Internet.

**JIANG Hai**, born in 1980, Ph. D.. His research interest is future Internet architecture.

**LI Jun**, born in 1974, Ph. D., senior engineer. His research interest is service oriented computing.

**LI Zhong-Cheng**, born in 1962, Ph. D., professor. His research interest is computer networks.

### Background

With the fast development of wireless communication technologies and the amazing increasing of user numbers in Internet of Things, the limited spectrum resources have become more and more scarce. However, today's spectrum resources are regulated by a fixed assignment policy and they are in inefficient usage. In this situation, how to satisfy users' mobility and mass data transmission requirements are new challenges. Cognitive Radio is one technology that can offer users a seamless accessing environment, and regarded as the most promising technology to solve the current spectrum inefficiency problems. It represents a great potential for Internet of Things. The basic idea of CR technologies, a secondary user (SU), also referred to as a cognitive radio user or opportunistic user, is capable of periodically sensing, and identifying available channels in the frequency spectrum to occupy them while they are not being used by a primary user

(PU). Once a PU is detected, the SU occupying the PUs' channels needs to vacate them. In this paper, using Cognitive Radio technologies, we propose a cognitive radio users and networks cooperative spectrum allocation framework, then propose a dynamic spectrum allocation solution. This solution consists of two algorithms: one is a Spectrum Ranking Selecting algorithm (SRS) implemented at cognitive radio users, to meet their QoS and mobility requirements; and the other is a Joint Optimization Matching algorithm (JOM) implemented at the networks, by achieving the co-optimization between spectrum utilization and handoff rate to satisfy the mass data transmission requirement. With the cooperation between cognitive radio users and networks, our solution can construct an efficient dynamic spectrum allocation.

This research work is supported by the National Basic Research Program(973 Program) of China (2011CB302702).