

## 一种小型认知无线网络的通信协议的制定和评价\*

史迎冬,赵雄鹰,汪一鸣

(苏州大学 电子信息学院,江苏 苏州 215000)

**摘要:** 提出了一种小型认知无线网络的频谱协同感知方法,并在此基础上设计了一种小型认知无线网络的通信协议。通过协议程序复杂度的角度切入,对该协议进行了分析和评价。同其他典型协议相比较,该协议通过采用集中式控制、分布式感知、点对点通信的机制,尽可能地做到了扬长避短,使系统的整体稳定性和复杂度得到了兼顾。

**关键词:** 认知无线网络;协同感知;通信协议;程序复杂度

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)21-0060-04

## The design and evaluation of a small-scale cognitive wireless network's communication protocol

Shi Erdong, Zhao Xiongying, Wang Yiming

(School of Electronic Information, Soochow University, Suzhou 215000, China)

**Abstract:** A cooperative spectrum sensing method of small-scale cognitive wireless network is proposed. On this basis, a communication protocol of small-scale cognitive wireless network is designed. Starting from the program complexity, this paper analyzes and evaluates the communication protocol. Compared with other typical protocols, the performance of this protocol is improved by using the mechanism of centralized control, distributed sensing and point to point communication. The stability and complexity of the system are taken into account.

**Key words:** cognitive wireless network; collaborative awareness; communication protocol; program complexity

认知无线网络就是认知无线电的网络化,其本质在于将认知无线电的关键技术——环境感知、智能接入等应用于无线通信网络的整体中去研究<sup>[1]</sup>。认知无线网络能够利用环境认知来获取环境信息,通过对环境信息进行处理和学习做出智能决策,并以此进行网络重构,实现对无线环境的动态适应。目前,欧美等发达国家和地区已经开始进行认知无线网络的网络级行为的研究和协议的制定。但是国内的研究仍然主要处于频谱感知、频谱决策等分支学科研究阶段。

## 1 认知无线网络的环境感知方法

## 1.1 基于单节点的频谱检测方法

基于单节点的发射机频谱检测技术是认知无线电的关键技术之一,是构成认知无线网络环境感知体系的基本元素。只有在单个认知节点能够较为快速、准确、稳

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(60872003); 苏州市应用基础研究计划项目(SYJG0925); 博士学科点专项科研基金(20093201110005)

定地检测出主用户频率使用状态的基础上,认知无线网络才能够做出准确的决策,建立合理的网络架构体系。

目前,国内外研究较多的发射机检测的频谱感知方法主要有:匹配滤波器感知检测、波形感知检测、能量感知检测和小波分析感知检测等。

本课题采用能量感知检测授权用户信号的方法。能量检测法的实现过程如图1所示。

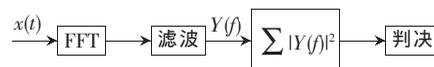


图1 能量检测过程

能量检测的判决规则为:

$$\begin{cases} H_0 \cdots \sum |Y(f)|^2 < \lambda & \text{授权用户不存在} \\ H_1 \cdots \sum |Y(f)|^2 \geq \lambda & \text{授权用户存在} \end{cases}$$

虽然能量感知检测存在无法区分信号和噪声、门限

# 网络与通信 Network and Communication

值不易确定、SNR 较低时性能恶化严重、感应时间较长等缺点,但其具有实现方法简单、计算复杂度低、不需要先验知识等优点,特别适用于成本控制严格、架构简单、对 QoS 要求不高的认知无线网络。

## 1.2 协同感知方法

在一个完整的认知无线网络中,仅仅依靠单个认知用户自身进行频谱感知是远远不够的,单个认知用户的本地频谱检测往往无法完整准确地描述整个网络的频谱环境<sup>[2]</sup>。因此,需要以多用户协同感知的方法来获得更加准确网络频谱环境,以便做出正确的决策。

协同感知一般有集中式感知和分布式感知两种频谱感知方法<sup>[3]</sup>。本课题采用的感知方式融合了集中式控制和分布式控制的特点,由控制节点负责感知覆盖区域内的频谱环境,为认知节点提供端对端认知信道;由认知节点在通信过程中自行检测本地频谱环境,并在必要时及时反馈给控制节点,控制节点根据判决规则重新调整认知信道的分配。本文将这种网络架构协议称之为协议 1。

## 2 认知无线网络的通信协议设计

### 2.1 协议层次架构

本课题设计的认知无线网络通信协议的层次和功能如图 2 所示。

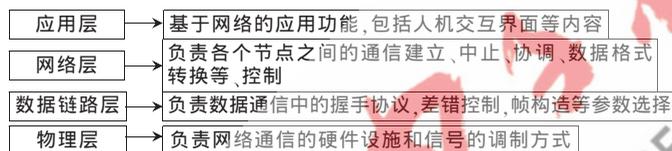


图 2 通信协议的层次和功能

由图 2 可以看出,物理层的全部功能和数据链路层的部分功能已经固化到了硬件系统中,只有少数参数可以通过软件进行修改。而应用层的内容主要由用户在具体环境中进行具体设置。因此通信协议设计的主要工作集中在网络层和数据链路层。

### 2.2 控制节点的工作时序

本认知无线网络控制节点需要完成的功能包括:接收认知无线网络节点发送的通信请求、通知目的节点、寻找最佳频率、将最佳通信频率告知源节点和目的节点、信道恶化时重新寻找最佳通信频率并告知。

根据以上要求,认知无线网络控制节点的一个工作循环如图 3 所示。

### 2.3 认知节点的工作时序

认知无线网络节点需要完成的基本功能有两个:数据的发送和数据的接收。

(1)数据的发送。作为数据发送方的认知节点为了实现在认知信道的通信,首先要保持和控制节点的通信畅通,这样才能够获得最优化的决策;其次,节点需要有感知功能,作为数据发送方的认知节点需要在发送数据的过程中随时监测信道质量,一旦发现信道状况恶化,该认知节点需要立刻终止数据发送并通知控制节点,以便

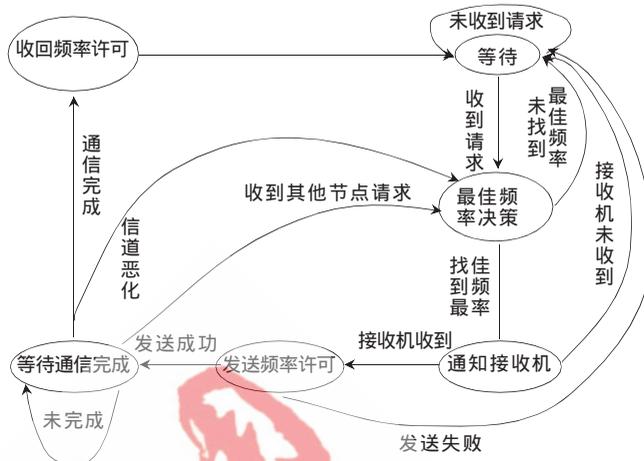


图 3 控制节点的一个工作循环

迅速获得新的最佳频率许可恢复通信。其实现过程循环如图 4 所示。



图 4 认知无线网络节点发送数据的工作循环

(2)数据的接收。根据上文的数据发送过程,接收方认知节点应当这样设置:

- ①在预设控制信道等待。一旦有通信请求,根据上文可知该通信请求无论来自哪个节点都一定是由基站向目的节点通知的。
- ②一旦收到控制节点的通信许可,接收节点立刻切换到基站下发的通信频率中,等待同发送节点的通信。
- ③由于接收节点不负责频谱感知,因此从接收节点的角度出发,一旦通信受阻,无论是何种原因导致,均可认定是信道恶化。此时,接收节点将切换到预设控制信道等待新的通信许可,如果未收到新的许可,则认定通信失败。
- ④一旦通信结束,接收节点将重新切换到预设控制频道。认知网络接收节点的一个工作循环如图 5 所示。

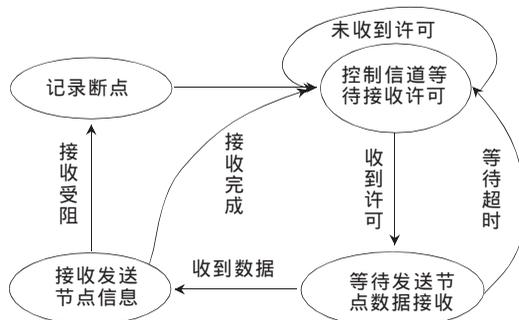


图 5 认知无线网络节点接收数据的工作循环

## 网络与通信 Network and Communication

### 3 其他典型通信协议架构形式

图6左侧这种网络被称作“完全非合作认知无线网络”,也可以叫做“分布式认知无线网络”,其架构思路很简单,那就是频谱的感知、决策和数据通信完全由节点自身完成。这种架构最大的特点是,作为通信的接收节点,由于通信之前没有任何先验信息,因此,接收节点需要在所有预设信道中轮流等待接收,直到收到握手包为止。本文将这种网络架构称之为协议2。

图6右侧这种网络的特点是,对频谱的感知和决策由基站完成,认知节点不需要负责。认知节点只需要在通信时与基站联系,并通过由基站分配的认知信道将数据传输给基站,基站负责将数据投递给目的节点。一旦在数据传输过程中出现信道恶化,由基站进行感知和信道切换,并及时将信道变化通知通信双方的认知节点。本文将这种网络架构称之为协议3。

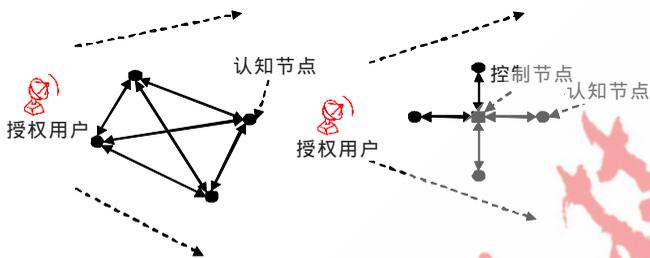


图6 独立感知的认知无线网络

### 4 基于算法时间复杂度的系统性能评价

#### 4.1 算法复杂度概念简介

同一个问题可以有多个解决方案,比如说对于本文的认知无线网络,上文列出的三种协议架构都能够完成两个认知节点的通信。但是哪一种方法能够使用更少的资源去完成相同的任务呢?这就是复杂度的评判标准<sup>[4]</sup>。一般而言,完成一项任务所需要用到的资源越少,则说明方法的复杂度越低;反之则越高。

这里用运算元来衡量复杂度。一般而言,运算元指处理器每执行一次不能再次分解的运算代码的过程。在本文中,运算元指的是处理器每完成一次预定义好的模块化程序的过程,且虽然网络架构方式不同,但是在完成一项功能时所做的基本动作是相同的。因此,这样定义运算元将有助于简化对时间复杂度的估计。经估算,不同运算元的执行时间如表1所示,其单位为机器周期。

表1 主要运算元的机器周期

运算元	初始化	发送一帧数据	接收一帧数据	一次载波检测
机器周期	10	2 500	45 000	600

在认知无线网络中,通信协议的程序复杂度是由预设认知信道数目  $N$  和通信数据帧数  $P$  决定的。因此,故时间复杂度  $T=T(N, P)$ 。

#### 4.2 通信链路建立的复杂度分析

根据分析可知,信道建立过程的一般顺序为:首先进行频谱决策确立最佳通信信道,然后发送节点同接收

节点之间建立链路。建立链路的过程被称为“握手”。令通信链路建立算法的时间复杂度为  $T_a$ ,则本文的三种协议的网络架构的复杂度为  $T_{a1}$ 、 $T_{a2}$ 、 $T_{a3}$ 。

架构一的通信链路建立程序算法中,在最坏情况下,发送节点共需要执行1次模块初始化运算元,1次数据接收运算元,1次数据发送运算元。同样地,在最坏情况下,接收节点需要执行1次模块初始化运算元,1次数据接收运算元,1次数据发送运算元;控制节点需要执行1次初始化运算元, $N$ 次载波检测运算元,两次数据接收运算元,两次数据发送运算元。

当然,在3个时间复杂度中,有些程序流程是同时进行的,所以,如果要计算整个系统的时间复杂度,则需要减去其中重复计算的部分。就整个系统而言,在最坏的情况下,完成一次通信链路的建立共需要花费1个模块初始化复杂度的时间,两个数据收发的复杂度时间和  $N$  个载波检测复杂度的时间。

将机器周期代入,可以得到

$$T_{a1}=10+5\ 000+90\ 000+150N=95\ 010+150N\approx$$

$$95\ 000+600N(N\geq 1)(\text{机器周期})$$

根据以上思路,经统计,三种协议所占用的时间复杂度如表2所示。

表2 三种通信协议建立通信链路的时间复杂度

	初始化	发送一帧数据	接收一帧数据	一次载波检测
通信协议1	1	2	2	$N$
通信协议2	1	$N$	1	$N$
通信协议3	1	2	2	$N$

故有:

$$T_{a2}=10+2\ 500+45\ 000N+600N\approx 48\ 100N(N\geq 1)$$

(机器周期)

$$T_{a3}=T_{a1}$$

#### 4.3 通信中断恢复程序算法的复杂度分析

所谓通信中断恢复,指的是在认知用户通过认知信道通信的过程中,一旦遭遇授权用户开机或者是信道恶化的情况,认知无线网络能够尽快地识别并切换工作信道,将认知用户的通信恢复的过程。这个过程是维持认知无线网络正常工作运转必需的环节。其占用的资源和耗费的时间也是评价认知无线网络性能的重要标准和依据。

经统计,三种协议所占用的时间复杂度如表3所示。

表3 三种通信协议通信中断恢复的时间复杂度

	初始化	发送一帧数据	接收一帧数据	一次载波检测
通信协议1	1	3	3	$N$
通信协议2	1	$N+1$	2	$N$
通信协议3	1	4	4	$N$

令三种架构协议的在通信中断恢复程序算法上的复杂度为  $T_{b1}$ 、 $T_{b2}$ 、 $T_{b3}$ ,则:

$$T_{b1}=142\ 500+600N(N\geq 1)(\text{机器周期})$$

$$T_{b2}=47\ 500+48\ 100N(N\geq 1)(\text{机器周期})$$

# 网络与通信

Network and Communication

$$T_{i3}=190\ 000+600N(N\geq 1)(\text{机器周期})$$

## 4.4 数据通信过程复杂度分析

数据通信过程复杂度是指认知无线网络节点完成一次数据通信所需要消耗的系统时间资源和空间资源。对于认知无线网络而言,在通信过程中未出现认知信道被占用的情况下,其频谱感知速度和数据通信速度都将达到最快,因为不需要为授权用户而退出频段重新建立链路。但是,由于授权用户具有不需预告而直接使用频段的优先权,因此,实际上认知用户在每次发送数据帧之前系统都会执行一次本地的信道检测。故发送1帧数据需要执行1次频谱检测运算元,1次数据发送运算元和1次数据接收运算元。所以,完成一次数据通信需要执行 $P$ 次频谱检测运算元、 $P$ 次数据发送运算元。同时,数据通信的过程不需要控制节点的干预。

令三种架构协议的数据通信过程复杂度为 $T_{c1}$ 、 $T_{c2}$ 、 $T_{c3}$ ,则:

$$T_{c1}=2\ 500P+45\ 000P+600P\approx 48\ 100P(P\geq 1)(\text{机器周期})$$

对于协议2而言,在没有授权用户干预的前提下,完成一次数据通信程序所占用的时间复杂度和架构一是相同的,即:

$$T_{c2}=2\ 500P+45\ 000P+600P\approx 48\ 100P(P\geq 1)(\text{机器周期})$$

而协议3所有的通信均依赖于基站,因此完成一次数据通信需要执行 $P$ 次频谱检测运算元,2 $P$ 次数据发送运算元和2 $P$ 次数据接收运算元。即:

$$T_{c3}=5\ 000P+90\ 000P+600P\approx 95\ 600P(P\geq 1)(\text{机器周期})$$

## 5 基于程序算法复杂度的性能评价

图7为随着认知信道数目的增加,三种协议完成信道链路建立的时间复杂度变化曲线。

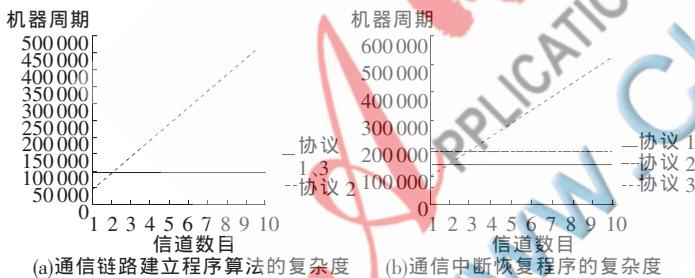


图7 协议通信链路建立和中断恢复算法的复杂度

从图7可以看出,虽然三种协议均为一阶复杂度,但是由于载波检测过程所占用的时间资源非常之少,因此,决定程序算法时间复杂度的根本在于寻找接收节点并握手的过程。从图7可以看出,当预设认知信道为1个,即固定信道时,无控制节点的架构方案的时间复杂度更低。但是随着预设认知信道的增加,有控制节点的架构方案其时间复杂度的增加幅度很小,而没有控制节点的架构方案其复杂度迅速增长。由此可见,基站对于改善时间复杂度的作用多么重要。

图8为随着通信数据量的增加,三种协议的时间复杂度变化曲线。

由于协议1和协议2在数据通信的过程中均采用

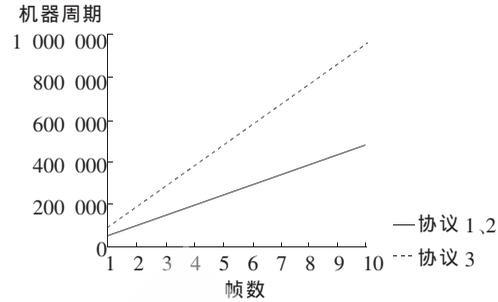


图8 协议数据通信过程的复杂度

点对点通信的方式,因此两者的时间复杂度随着帧数的变化趋势是相同的。由于协议3的数据发送需要完全依赖基站,故每发一帧数据要比其他两种通信方式增加近一倍的复杂度。在数据通信方面,协议1和协议2的方案无疑更加优越。

在链路建立程序算法方面,通过增加一个控制节点分担原本由发送节点完成的频谱检测和链路建立的工作,可以极大地增加系统的稳定性,缩短链路建立时间。这种改进思路与算法设计中常用到的“以空间换时间”是类似的,即通过增加系统的空间复杂度(增加控制节点)来降低系统的时间复杂度。

而在数据通信方面,点对点通信无疑可以节省更多的复杂度开销,而如果将数据通信也交由基站转发,则每一次数据通信需要完成两次点对点通信,无疑极大地增加了控制节点的负担,降低了系统的可靠性,增加了系统的复杂度开销。

根据以上分析可知,本文所采用的方案(协议1)同其他的典型架构方案相比无疑具有更大的优越性。该方案结合了协议2和协议3各自的优点,通过采用集中式控制、分布式感知、点对点通信的机制,尽可能地做到了扬长避短,使系统的整体稳定性和复杂度得到了兼顾。

## 参考文献

- [1] 王金龙,吴启晖,龚玉萍,等.认知无线网络[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [2] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks; efficient protocols and outage behaviour [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(1): 3062-3080.
- [3] 李希金,纪红.基于认知的异构无线网络信道借用策略[J].北京邮电大学学报,2009, 32(5): 20-23.
- [4] 郑丽英,孟昱煜,王海涌.计算机算法设计与分析[M].北京:中国铁道出版社,2009.

(收稿日期:2011-06-15)

## 作者简介:

史迎春,男,1986年生,硕士研究生,主要研究方向:认知无线网络的频谱感知和智能决策。

赵雄鹰,女,1986年生,硕士研究生,主要研究方向:移动Ad Hoc网络。

汪一鸣,女,1956年生,教授,博导,主要研究方向:多媒体通信和无线通信,通信信号处理,宽带无线通信技术及信源信道联合编码等。