

# 自私节点下无线多跳网的节能博弈拓扑研究

陈松林<sup>1</sup> 秦 燕<sup>2</sup>

(中国人民解放军广州军区第一八七中心医院 海口 571159)<sup>1</sup>

(四川大学计算机学院(软件学院) 成都 610064)<sup>2</sup>

**摘 要** 在构建高连通性、低能耗、低干扰且具有合理路由的多跳无线网络中,面对自私节点之间的冲突和彼此之间的协调关系,博弈理论是一种很好的解决工具。利用博弈理论构建网络拓扑结构控制解决方案,采用的方法为设计合理新颖的收益函数。在非合作博弈理论的基础上创建了一个新的收益函数模型,研究表明,利用这种收益函数能够将网络控制在一个稳定的理想状态。最后,对模拟算法的性能进行评估,最终的仿真结果表明,将博弈拓扑结构应用于无线多跳网络能够明显节能。

**关键词** 自私节点,无线多跳网,节能,博弈拓扑

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Energy-efficient Game Theoretic Model in Multi-hop Networks Having Selfish Nodes

CHEN Song-lin<sup>1</sup> QIN Yan<sup>2</sup>

(Guangzhou Military Region 187 Central Hospital, Haikou 571159, China)<sup>1</sup>

(School of Computer Science(Software Engineering), Sichuan University, Chengdu 610064, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In the construction of high connectivity, low energy consumption, low interference and reasonable route multi-hop wireless networks, facing conflict between the selfish nodes and their cooperative relations, game theory is undoubtedly a good solution tool. This paper employed game theory to build the network topology control solutions, using a method of rationally designing novel revenue function. Based on non-cooperative game theory, this article designed a novel revenue function model. Theoretical studies show that the network can be controlled in a stable state through such revenue functions. Finally, we evaluated the performance of simulative algorithm, and the final simulation results show that the game topology for wireless multi-hop network can significantly save energy.

**Keywords** Selfish nodes, Wireless multi-hop networks, Energy-efficiency, Game theoretic model

## 1 绪论

### 1.1 无线多跳网络的概述与应用

有线网络在 20 世纪 80 年代前后就已经得到了广泛的发展,但是新的问题也随着不断发展的有线网络应用逐渐显露出来。有线网络在应用发展的过程中受到了限制,原因在于其较高的维护成本、困难的架设过程以及灵活性的缺乏。为了摆脱这种困境,无线多跳网作为一种新的改进方式很好地解决了这一难题,给用户带来了更加优质方便的服务。

与有线网络不同的是,无线网络改进了有线网络节点任务过于单一、管理集中以及资源子网与通信子网间界定过于死板等现象。作为一种灵活的网络形式,无线多跳网络是由多个节点组成的,而且无人监管区域是其主要的区域,这就要求无线多跳网络拥有自我组织和自我配置的能力。无线多跳网络中的节点能够在实现自我管理网络的同时,在多跳连接状态下动态建立和维护自我管理网络。所以网络节点除了要能够传输数据外,还应当能够对网络进行分布式管理。

从长远的角度来看,无线多跳网络已经衍生出不同应用

场合下的网络,能够满足不同用户的不同需求。由于自身应用的普遍性,无线多跳网络已经成为了一种集成多种无线网络特征的一般网络模型,许多学者在研究时都将其在通信、耗能之间进行利益权衡,研究网络性能的优化以及提高节点吞吐量等等。无线多跳网相互协作形成一个网络互相沟通,在没有任何固定的基础设施的情况下,由自主和独立的无线节点组成。节点能量有限,所以节点倾向于选择小的发射功率,以保证网络的连通性。然而节点的功率并不能无限地减小,这就意味着每个节点在选择发射功率时都会对其他节点选择的功率造成影响。节约能源是设计无线网络的一个重要的要求,节点因为往往是由电池供电的,因而具有有限的操作寿命,所以,节点之间的通讯必须建立一个高效节能的协议。另一方面,多跳网的拓扑结构能极大地影响节点的能量消耗率。目前已经提出几种算法,意图构造一个有效的拓扑结构来使多跳网中的能源消耗达到最佳范围。这种建设的网络拓扑结构被正式称为拓扑控制(TC),已被广泛研究<sup>[1]</sup>。

本文中,我们从博弈拓扑模型出发,调查哪些节点能够动态地调整它们的传输功率在每一个数据包的方式,尽量减少

到稿日期:2013-02-25 返修日期:2013-05-28

陈松林(1984—),男,工程师,主要研究方向为计算机网络;秦 燕(1973—),女,硕士,讲师,主要研究方向为计算机网络。

表1 博弈拓扑控制模型的框架

博弈拓扑控制要素	相关描述
参与者集合 $N$	$N = \{1, 2, \dots, n\}$ , 拓扑控制博弈的参与者表示网络中的节点。
策略集合 $P$	$P_i \in P_i$ , $P_i$ 表示节点 $i$ 所选择的功率级, $P_i$ 表示节点 $i$ 可以选择的功率级集合。策略集 $P$ 为所有节点功率级集合 $P_i$ 的笛卡儿积, $P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n$ , $p = (P_1, P_2, \dots, P_n) = (P_i, P_{-i})$ 表示策略向量(功率向量)。
收益函数 $u_i(p)$	$u_i(p) = (N + p_{\max}) f_i(p) g_i(p) - h(p_i) - p_i$

它们的能源使用,同时考虑流量负载和传输功率参数。最后,对该拓扑模型进行合理的仿真分析。

## 1.2 博弈论的基本知识

### 1.2.1 博弈论的定义

博弈即是指一些组织、团队或个人利用自己所掌握的信息,或者只是在给定的条件下,同时或者先后,一次或者多次地,以自身行为策略为出发点选择与之相应的策略来实施,获得最终的效益。

博弈的主要组成元素有3个,分别是效用、参与者以及策略空间。效用也被称作效益,指参与者从博弈中做出决策之后获得的相应利益。参与者则是指在博弈中能够独立决策且承担相应后果的主体,这个主体既可以是团队也可以是个体,它的目的是优化集体或者个体的利益。而决策空间则是指参与者能够依据自身行为选择相应的行为和策略的集合,参与者根据需求从策略空间中选择一个或多个决策进行博弈。根据这3个要素,我们能够将博弈系统地概括成,在多个参与者参与的博弈中,每个参与者都有自己的策略空间,参与者能够根据参与的策略空间构建相应的效用函数,通过效用函数选择最佳的策略。

### 1.2.2 无线多跳网络博弈论的研究现状

分开来看,以博弈理论为基础的网络模型,网络中每个节点其实是指参与者。节点根据实际网络情况来构建相应的策略空间,在策略空间内评论预测期望收益。协议以博弈论作为理论基础,是无线多跳网络实现自主优化的实体。其功能在于实现整个网络与节点的优化,以微观视角诠释宏观网络特性<sup>[2]</sup>。

无线多跳网络没有实际的基础设施,所以要求节点自行管理网络。而且构建网络模型时,还要考虑无线多跳网络的特点,即有限性和自主性,在优化网络的同时应当注重成本与效用之间的权衡。

## 2 无线多跳网的节能博弈拓扑模型

### 2.1 博弈拓扑模型的定义

多跳无线网络的拓扑模型可以简化为  $G(V, E)$ , 其中  $V$  表示节点集,  $E$  表示边集。在二维平面上定义  $i \in V$  的坐标为  $(x(i), y(i))$ ,  $L$  则表示所有节点坐标的集合。

若每个节点都具备全向天线,那么便可以自由调整它的发送功率级  $P_i \in [0, P_{\max}]$ ,  $p = (P_1, P_2, \dots, P_n) = (P_i, P_{-i})$  则表示网络中的功率向量,本文假设每个节点都能从广播中获得某些时刻的网络功率向量,定义  $P_{ij}$  为节点  $i$  能向节点  $j$  发送数据所要求的最低发送功率。

定义  $e_{ij} \in E$ , 表示图中连接节点  $i$  和  $j$  的边,而且只有在  $P_i \geq P_{ij}$  且  $P_j \geq P_{ji}$  时  $e_{ij}$  才合理存在,这表明图  $G(V, E)$  中每条边都是双向的链路。

定义  $G_R(V, E)$  是所有节点都是最大功率(功率级向量  $P = (P_{1, \max}, \dots, P_{n, \max})$ ) 发送数据包时的拓扑图,拓扑控制目标都是设计一种功率高效性的算法以找到  $G_R$  的子图  $G$  使得网络满足一定的性能要求<sup>[3]</sup>。

### 2.2 博弈拓扑模型的框架及要素

相关研究显示,博弈的框架被定义为  $G = \Gamma(N, P, u)$ , 具体包含的3个要素如表1所列。

### 2.3 节点的收益函数

由于难以将节点获得的收益进行量化,导致函数的确定比较困难,甚至节点之间的收益也很难计算得出。由于节点的自私性原因,我们必须对拓扑目标进行控制,主要原因如下:第一是网络的连通性,即任意两个节点之间都具备有向路径;第二是每个节点都具备最大化的收益<sup>[4]</sup>。所以设计出符合实情的节点收益函数非常重要,下面将从4个方面对节点的收益进行阐述。

#### (1) 节点发送功率

拓扑控制的主要目的就是实现功率高效化,而节点收益的主要来源是节点自身的发送功率,因此在收益函数中必须将发送功率的大小体现出来。

#### (2) 网络层的路由性能

目前,大部分多跳无线网络路由协议的度量标准是最少跳数,同样地,也必须在收益函数中体现平均最短路径的长短。将节点  $i$  的度数定为  $k_i$ , 网络中所有节点最小度数阈值则定为  $k_{\min}$ , 最小的度数阈值函数设为  $g_i(p) = g_i(p_i, p_{-i}) = 1 (k \geq k_{\min}); g_i(p) = g_i(p_i, p_{-i}) = 0 (k < k_{\min})$ ,  $g_i(p)$  则为单调非递减函数。虽然限制网络中的每个节点度数都超过或者等同设定的最小度数阈值会消耗一定的功率的高效性能,但最小度数阈值的增加会导致节点  $i$  到其他各个节点之间的平均最少条数减少,进而提高整个网络层的路由性能<sup>[5]</sup>。

#### (3) 链路层的连通性能

连通性是拓扑控制中网络性能的保障,节点的收益和整个网络之间的连通联系紧密,所以收益函数也要体现一定的连通性,将连通性的函数定义为:  $f_i(p) = f_i(p_i, p_{-i}) = 1$  (如果网络连通), 否则,  $f_i(p) = f_i(p_i, p_{-i}) = 0$ , 函数  $f$  单调非递减, 即  $f_i(p_i, p_{-i}) \geq f_i(q_i, q_{-i}), \forall j \in N$  且  $q_i < p_i$ 。

#### (4) 最佳的响应算法

将节点的传播范围设为  $d_i$ , 冲突范围设为  $d_i' = 2d$ 。节点的冲突范围的大小与网络性能的关系紧密,冲突范围越小信道的复用度就越高,网络吞吐量也越高,所以冲突范围也是整个节点的收益来源的一部分。将节点  $i$  的冲突影响函数设为  $h_i(p_i) = N_i(d_i') - N_i(d_i)$ , 其中  $N_i(d_i)$  表示以  $i$  为圆心、以  $d_i$  为半径的圆中节点的个数,显然  $N_i(d_i)$  是单调非递减函数<sup>[6]</sup>。

综上所述,收益函数定义为式(1):

$$u_i(p) = (N + p_{\max}) f_i(p) g_i(p) - h(p_i) - p_i \quad (1)$$

### 2.4 核心响应算法

用最佳响应算法计算纳什均衡点,拓扑控制中,最佳响应算法的工作流程是将单个节点根据目前网络的运行情况选择能够让自己收益最多的策略,数学表达式如下:

$$P_i = \{\arg \max u_i(q_i, q_{-i})\} \quad (2)$$

假定我们能够从广播信息中获得网络的全局信息,单个

节点在自身的发送功率被更新后能够向其他邻居节点通知其更新结果,并且假设当某个节点执行最佳响应算法时,其它节点的状态保持固定,那么网络中任意时刻任意节点的功率用量就是被知晓的。

根据式(1)、式(2)设计拓扑控制最佳响应算法,其伪码如下:

```

Input: 节点位置集合 L、最大功率级  $P_{\max}$  和最小节点度数域值  $k_{\min}$ 。
Output: 优化后的图  $G(V, E)$  和节点功率矩阵  $P=(P_1, P_2, \dots, P_n)^{[7]}$ 。
Begin
根据 L 和  $P_{\max}$  可得  $G_R(V, E)$ 。
if  $G_R(V, E)$  不连通 then p
return false;
end if
while  $p(t) \neq p(t-1)$ 
do for 网络中的每个节点
do for  $p_i = p_i - 1$ 
do if  $f_i(p) = 0$  或  $k_i < k_{\min}$ 
then break;
end if
end for
end while
end

```

## 2.5 模型分析

我们模拟多跳网的  $G(V, E)$ , 其中  $V$  表示节点集,  $E$  表示边集。为了直接沟通, 建立一个直接任意节点  $j, i$  应该使用的发射功率, 节点由  $P_{ij}$  表示, 且  $P_{ij} \geq P_{ij}^{\min}$ , 其中  $P_{ij}^{\min}$  的最小发射功率需要从节点  $i$  到  $j$ 。  $P_{ij}^{\min}$  的价值依赖于相关信道模型、节点  $i$  和  $j$  之间的地理距离、信道衰减以及节间的分离等。我们假设  $P^{\min}$  是对称函数, 即  $P^{\min} = P^{\max}$ 。假设每个节点能够在每一个链接或每包的基础上动态调整其发射功率, 即一个节点可以使用不同的电源。另外, 双向链接确保反向路径传输的 ACK/MAC 协议、链路级的确认和 RTS/CTS 是正常运行的, 这一点很关键。有很多的 MAC 层和代码分配协议已经调节信道接入, 避免收到传输信号的干扰。

由于每个节点都能够使用不同功率等级的传输数据包,  $i$  节点使用最小功率值  $P_{ij} = P_{ij}^{\min}$  发射或延迟节点  $j$ 。如果链路  $(i, j)$  的链接价值比  $(k, l)$  需要更高的功率, 就是大于  $(k, l)$ , 并把它写为  $(i, j) > (k, l)$ , 即  $P_{ij} > P_{kl}$ 。节点  $i$  和  $j$  不相邻的情况下,  $i$  节点应该使用一些中间的其他节点转发数据包到节点  $j$ 。为了提供这种多跳网络中的连接, 我们也给出了  $R(G(V, E))$ , 在每对五节点之间确定一个单一的多跳路径, 用  $r_{ij}$  表示节点  $i$  到  $j$  的路由路径, 用  $S_k$  作为经历的链路。除非另有明确规定, 否则, 我们默认  $R$  为普遍的最小跳数路由算法<sup>[8]</sup>。

由于无线多跳网中的节点往往功率受限, 因此, 有必要从非常重要的用户和设计者的角度来开发提供高效节能的节点之间的通讯协议。为了评估通信的能效, 我们也需要测量节点的能耗<sup>[5]</sup>。设  $T$  是连续两次拓扑控制协议执行之间的时间间隔, 节点消耗的时间间隔  $T$  (记为  $e_i$ ) 服从下列关系:

$$e_i = \sum_{j, (i,j) \in E} v_{ij} \cdot P_{ij} \quad (3)$$

$v_{ij}$  是在时间间隔  $T$  内预期的超过链路  $(i, j)$  的交通量, 参数  $v_{ij}$  取决于时间  $T$  内的交通分布。除非预期的数据流量的准确信息是已知的, 否则很难准确地预测  $v_{ij}$ 。然而, 由于高流量的控制消息 (如路由发现信息) 充斥在整个网络, 因此, 如果我们考虑到预期的流量速率与每个路径上发送的速率相

同, 式(1)中的关系可以被改写为:

$$e_i \sim r \cdot T \cdot \sum_{j, (i,j) \in E} |S_{i,j}| \cdot p_{i,j} \sim \sum_{j, (i,j) \in E} |S_{i,j}| \cdot p_{i,j} \quad (4)$$

$|S_{ij}|$  是超过链路  $(i, j)$  路径的数目, 在下文中, 我们参考  $\sum_{j, (i,j) \in E} [S_{ij}] \cdot P_{ij}$  作为节点的能量消耗。

我们定义  $p_i^{\max}$  为可以使用的最大功率值,  $G_{\max}(V, E_{\max})$  为  $E_{\max} = \{(i, j) | P_i^{\max} \geq P_{ij}^{\max}, P_j^{\max} \geq P_{ji}^{\min}\}$ 。其实,  $E_{\max}$  为所有可能存在的网络的集合。通常情况下, 拓扑控制算法的目标是要找到一个子集  $E \in E_{\max}$ , 并且能够实现既高效节能又保持稳定的连接。能量效率拓扑控制的概念已被定义在几个方面, 例如所有节点之间的发送功率的总和应当最小或最大<sup>[9]</sup>。

## 3 仿真结果

通过对多跳网使用节能博弈拓扑控制, 能够计算出相关的总能量消耗结果。正如我们从图 1 中看到的, 节能博弈拓扑法要优于传统的拓扑控制, 节能博弈拓扑更接近最佳的解决方案, 并具有明显的优越性, 在 MST 中 (平均约 30%) 是一种有效的网元拓扑结构。传统拓扑结果算法的结果为 17% (平均), 逊于节能博弈拓扑, 这是远远优于其最坏情况下的临界点。所有的算法中的能源消费总量节点密度从  $\lambda=1$  增加, 一直增加到 300% (当  $\lambda=8$ ), 如图 1 所示。在原来的 TC 中, 仅仅依赖发送功率来估计节点能耗能量, 当节点密度较大时, 我们将有更多的节点, 再加上我们假设每个节点之间都有连接, 因此也增加了超过节点的路径, 进而导致节点能耗的增加<sup>[10]</sup>。

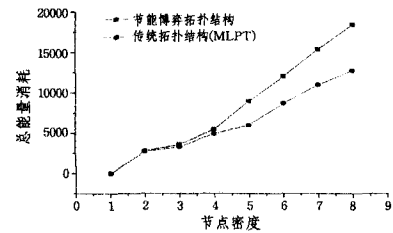


图 1 结果统计

对图 1 中的全局算法和局部算法进行比较, 我们发现, 虽然在好一点的响应的算法节点上所消耗的总能量比 MLPT 差约 30%, 但是局部化的算法能够跟上 MLPT 的仅有 5% 以上的能源消耗总量。尽管较好的响应和 MLPT 算法的最大能量消耗非常相近, 但是我们局部化算法的结果远远优于其他两种方法, 约 25%。除此之外, 局部化算法构成的拓扑中的路径比由 MLPT 形成的拓扑的短 15%, 比由较好的响应构成的拓扑结构的短 40%。上述结果表明, 我们可以通过适当选择部分的连接信息来节省更多的能源, 并获得较低的延迟。这个问题在获得连接信息的能量消耗数据包转发成本占主导地位的情况下变得更加明显。我们的研究结果还显示, 更好的响应和局部化算法以大致相同的迭代次数收敛于 NE 拓扑。虽然局部化的算法与最佳响应算法相比有一个更大的收敛时间, 但是它可以通过限制主要的节点接受拓扑结构改变这个缺点。在拓扑结构的演变过程中, 该算法可以保持连接性, 但是在收敛到最终结构之前, 节点能够互相通信。因此必须注意, 无论什么时候, 每当一个节点加入或离开网络或改变它的位置时, 只有在  $k$  跳附近的节点应该调整自己的决定, 而其他节点的方法不变<sup>[11]</sup>。

从  $100 \times 100$  的二维平面上随机抽取 100 个节点, 每个节

点的最大传输范围为 30。我们不仅进行了主观的比较,还给出了性能分析,目的是对不同最小节点度数域值下的网络性能进行比较。

从图 2 所示的几个网络拓扑图可以看出,当  $k_{\min}$  增大时,网络会牺牲一定的功率高效性,这会引引起干扰程度的增大,进而减少较远节点之间的最少跳数。要想达到网络性能最优化,可以通过选择最小节点度数域值实现。

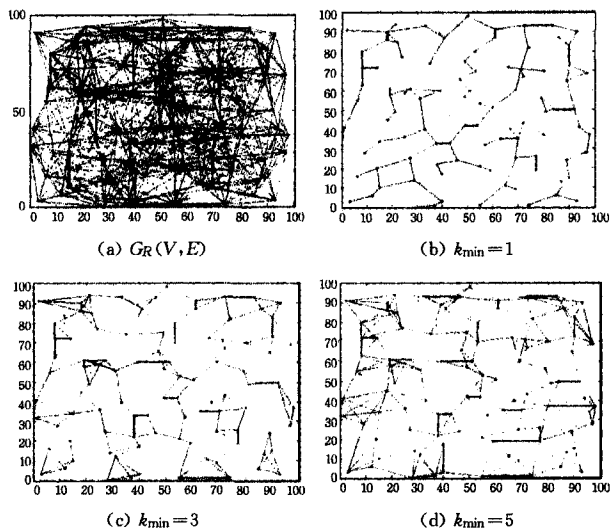


图 2

**结束语** 本文以拓扑控制博弈理论为基础设计的收益函数,将网络运行的实际情况都考虑进去,能够对节点从网络的性能获取上来进行收益分析评价,据此进行相应的量化。通过最佳响应算法求解纳什均衡点,可以得出优化的网络拓扑结构。通过分析彼此之间的性能,我们可知随着最小节点度数阈值的增大,网络为了增大一定程度的实际干扰,会牺牲一定功率。在此情况下,较远节点之间的最少跳数将减少,网络路由层的性能便会提高,其次还可以通过折中最小节点的度

数阈值来优化网络性能。以后的实际工作中,我们应当着重考虑实际情况的节点收益函数的设计。

## 参考文献

- [1] 赵家兴,多跳无线网络中基于博弈理论的拓扑控制算法研究[J]. 科技信息,2011(35):103-105
- [2] Jones C E, Sivalingam K M, Agrawal P, et al. A survey of energy efficient network protocols for wireless networks[J]. Wireless Networks, 2012, 7(4): 343-358
- [3] 康凯. 无线多跳网中多址和路由选择技术的研究[D]. 成都:电子科技大学,2010
- [4] Komali R S, MacKenzie A B. Analyzing selfish topology control in multi-radio multi-channel multi-hop wireless networks[C] // Proc. of IEEE ICC, 2011
- [5] 江小玲,王新颖. 基于节能的移动 Ad-hoc 网络 AODV 路由协议改进[J]. 通信技术,2012,41(7):121-123
- [6] Felegyhazi M, Hubaux J P, Buttyan L. Nash equilibria of packet forwarding strategies in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(5): 463-476
- [7] 郭伟,刘仁婷. 一种 TDMA 无线多跳网中新的传输调度算法[J]. 电子科技大学学报,2011,36(2):173-175
- [8] 李建东. Ad-hoc 网络中基于方向性天线的分布式拓扑控制算法[J]. 软件学报,2011,18(6):1308-1318
- [9] Komali R S, Thomas R W, DaSilva L A, et al. The price of ignorance: Distributed topology control in cognitive networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4): 1434-1445
- [10] Zarifzadeh S, Nayyeri A, Yazdani N, et al. Joint range assignment and routing to conserve energy in wireless ad hoc networks[J]. Elsevier Computer Networks, 2012, 53(11)
- [11] 姬广芹,张登银. Ad-hoc 网络中基于 DSR 的节能路由协议研究[J]. 计算机技术与发展,2011,19(8):15-18

(上接第 173 页)

二级用户能够有效利用稀少的频谱资源。然而,这些操作需要二级用户间的协作,因此基本不会给协作用户创造破坏网络运行的机会。本文对恶意二级用户存在时主用户位置估计的方案进行了研究;采用来自具有不同信任等级的用户的位置报告作为证据来支持主用户位置的假设;通过利用 saSL,阐述了证据和各种位置假设之间的空间关系,并提出了一种证据融合和推理机制,这一机制可以发现以最大置信度包含主用户的大小固定的区域。大量仿真验证了该算法在恶意二级用户存在时具有鲁棒性,并且性能相比其他认知无线网络定位技术更优良。

本文提出并分析了基于证据推理和 saSL 的定位机制的基本原理。在未来的计划中,重点对系统的动态操作进行研究,例如定位操作进行到下一个时各种二级用户的信任指数发生的演变;其次,根据信任值来调整 saSL 的参数并研究这些参数的校正机制;最后要对本算法背离实际数据定位跟踪的行为进行进一步评估。

## 参考文献

- [1] Haykin S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Commu-

nications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220

- [2] Mitola III J. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Radio[D]. Sweden: Royal Institute of Technology (KTH), 2000
- [3] 郭彩丽,冯春燕,曾志民,等. 认知无线网络技术及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010
- [4] 王景平,张雷,赵君喜. 一种基于 D-S 理论的认知无线电分组协作频谱检测方法[J]. 信号处理,2009(8A):404-406
- [5] 杨柯,张翠芳. 认知无线电的合作检测及其综合判决算法研究[D]. 成都:西南交通大学,2010
- [6] 王慧锋,高瞻,蔡延华,等. 认知无线网络中移动加权质心定位算法[J]. 军事通信技术,2013(2):8-12,67
- [7] 李炜,邢志强. 认知无线网络中的主用户定位算法研究[D]. 北京:北方工业大学,2012
- [8] 马志,陈巍,曹志刚. 认知无线网络中基于检测概率的主用户定位法[J]. 北京邮电大学学报,2009,32(2):14-19
- [9] 柳其许,张建新. 基于认知无线电的空间 S 频段测控新途径[J]. 航天器工程,2012(12):36-39
- [10] 陈维克,李文锋,首珩,等. 基于 RSSI 的无线传感器网络加权质心定位算法[J]. 武汉理工大学学报,2006,20(12):2695-2700