

认知无线网络自适应能量驱动双门限簇头轮换算法研究

徐贵森, 谭学治

(1. 哈尔滨工业大学通信技术研究所, 黑龙江哈尔滨 150080; 2. 通信网信息传输与分发技术重点实验室, 河北石家庄 050081)

摘 要: 为了延长基于分簇结构的认知无线电网络的网络寿命, 需要采用簇头轮换的方法来平衡认知无线电网络的能耗. 通过分析网络中簇头节点与普通节点之间的能耗差异, 建立能量消耗模型, 并提出了一种基于簇头节点实时负载来估计其启动簇头轮换的双门限自适应簇头轮换算法 (Double Thresholds Adaptive Cluster Rotation Algorithm, DTACRA). 仿真结果表明, 与现有算法 LEACH 和 EDAC 算法等比较, DTACRA 算法可以有效提高节点能量利用效率, 延长了网络生存时间.

关键词: 认知无线网络; 分簇; 双门限轮换; 能量驱动

中图分类号: TP393.01

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2012) 02-0389-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.02.029

An Energy-Driven Double Thresholds Adaptive Cluster Head Rotation Algorithm for Cognitive Radio Network

XU Gui-sen, TAN Xue-zhi

(1. Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

2. Science and Technology on Information Transmission and Dissemination in Communication Networks Laboratory, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

Abstract: In order to extent the lifetime of cognitive radio network based on clustered architecture, the role of cluster head need be changed for balance the energy consumption in cognitive radio network. A energy consumption model is proposed to describe the different between the cluster head nodes and common nodes, and then DTACRA (Double Thresholds Adaptive Cluster Rotation Algorithm) is presented, which double rotation energy thresholds are estimated using cluster head real-time energy load. The simulation results show that comparing with LEACH and EDAC, DTACRA maximizes the utilization of the nodes energy and prolongs the network lifetime.

Key words: cognitive radio network; clustering; double thresholds rotation; energy-driven

1 引言

认知无线网络是在现有 Ad hoc 网络基础上发展起来的一种新型网络, 是一种能在事先没有构建网络基础设施的环境下, 由认知无线电节点临时组成的一种自组织、自管理的网络. 认知无线电节点通常使用一些手持电话和掌上电脑等容量有限、不可持续充电的设备. 该类设备的计算、通信、存储能力也非常有限, 这就要求认知无线电路由协议在考虑认知节点的频谱切换延时和灵活退避主用户机制外以节约能源为主要目标, 最大限度地延长网络生存时间, 保持各节点的通信畅通^[1].

为了使得认知用户行使认知能力, 认知无线电通信网络需要具有如下特点: (1) 统一配置网络中的认知节点参数; (2) 有效避开主用户正在通信的信道; (3) 在新的信道上完成多跳通信^[2]. 根据以上特点, 在认知无线

电网络中应采用广播通信和点对点多跳通信. 前者主要应用在认知用户检测到主用户出现后通知其它认知节点采取有效退避和路由寻找过程中; 后者则应用在两个认知用户间进行数据通信的过程中. 此外, 考虑到节点通信时的能量损耗与传输距离的关系以及网络消息泛洪等问题, 采用基于分簇的路由算法相对平面路由算法具有更好的适应性和节能性.

认知无线网络分簇路由的基本思想是通过簇头对簇内认知节点进行通信参数的配置、主用户出现通知以及路由寻找并通过处理和转发本簇中节点的数据, 其目的是减少数据的传输量和距离, 进而降低网络通信能耗, 延长网络寿命^[3]. 在认知无线网络中簇头承担着繁重的工作, 其能量消耗是巨大的. 因此, 网络中会出现能量失衡的现象, 即有些簇内的节点数量多通信频繁, 或某些簇头处在通信频繁的路由上时, 这些簇头节点

都会很快死亡,使得网络通信中断.如何优化簇头的轮换门限成为分簇路由设计中所必须考虑的重要问题之一,它是影响网络能量损耗分布、提高网络生存时间的关键因素.

目前国内尚未出现有效的簇头轮换算法,国外典型的簇头轮换算法中,主要包括周期性轮换与能量门限触发轮换两种簇头轮换方式. LEACH^[4]、HEED^[5]、ACE^[6]等是以预设的时间周期进行全网簇头轮换与拓扑重建,该类算法无法平衡各簇头之间的能量差异,反而将其累积放大,最终无法获得理想的网络寿命,此外轮换周期更加难以确定;EDAC^[7]、EDCR^[8]等则是基于动态计算的能量门限 E_{th} 来触发全网簇头轮换过程.其可以根据网络负载的不对称性,计算出全网簇头轮换的能量门限,与周期轮换算法相比能够得到较理想的网络寿命,但其单门限的处理思想无法确保簇头在轮换时各簇头节点的剩余能量保持在同一范围内,当网络寿命耗尽时各节点保持最少的剩余能量,从而最大化网络寿命.基于以上考虑,本文引入双门限概念,提出双门限簇头轮换算法.

本文以簇为单位分析了在认知无线网络通信状态下,簇头节点和普通节点的能量消耗模型,计算出簇头比例与能量消耗的关系.在此基础上提出了一种自适应能量驱动双门限簇头轮换算法 DTACRA.

2 模型分析

2.1 系统总能量消耗模型

设有 n 个认知无线电节点分布在半径为 R 的圆形区域内,其分布满足期望为 λ 的 Poisson 分布(λ 为单位面积内节点的个数).节点采用二级通信功率实现多跳通信,即簇内通信功率与簇间通信功率.节点的初始能量相同,均为 E_0 .为了描述系统总能量消耗模型,我们需要做出以下假设:(1)普通节点的通信半径为 r ,簇头节点的通信半径为 $2r$;(2)认知节点通信时无碰撞或传输差错的发生,即认知节点无需因各种原因重传数据包;(3)在认知节点通信范围内存在一个正在通信的主用户.根据假设条件我们可以得到,在半径为 R 的圆形区域中认知节点的个数期望 $E[N] = \lambda S$,其中 $S = \pi R^2$,假设认知节点中普通节点成为簇头的概率为 p ,因此簇头的密度为 $\lambda_1 = p\lambda$,普通节点的密度为 $\lambda_0 = (1-p)\lambda$.令 $E[N_c]$ 和 $E[L_c]$ 分别表示在分簇完成的条件下,每个簇中普通节点个数的期望和普通节点与簇头节点间距离之和的期望^[11].则有:

$$E[N_c | N = n] = E[N_c] = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \quad (1)$$

$$E[L_c | N = n] = E[L_c] = \frac{\lambda_0}{2\lambda_1^{3/2}} \quad (2)$$

其中, N 表示圆形区域内认知节点个数的随机变量.在此,我们假设认知节点接收和发送单位数据的能量消耗分别为 E_r 和 E_s .不失一般性,我们令 $E_r = \beta E_s$,其中 $\beta \in [0, 1]$ 称作数据接收能量消耗系数.通过对 2M 带宽的 IEEE 802.11 网卡的实测,该参数的值为 0.73^[12].

若距离为 d 的两认知节点通信,至少需要 $\lceil d/mr \rceil$ 或 $\lceil d/2mr \rceil$ 个节点作为中继,其中 $m \in [0, 1]$ 称作节点密度修正系数,其被定义为如下式子.

$$m = 1 - e^{-\lambda/100} \quad (3)$$

由于 n 个节点将形成 np 个簇,因此令 E_m 表示所有普通节点在传输单位数据时的能量消耗,则有:

$$E[E_m | N = n] = np \frac{E[L_c | N = n]}{mr} (P_t + P_r) \quad (4)$$

令 E_h 表示所有簇头节点在传输单位数据时的最大能量消耗,则有:

$$E[E_h | N = n] = np(E[N_c] + 1) \frac{2R}{2mr} (P_t' + P_r) + npP_r \quad (5)$$

其中, P_t' 表示簇头节点发射功率,由于其发射半径为 $2r$,因此对于自由空间信道模型发射距离与能耗的关系,则 $P_t' \approx 4P_t$; npP_r 表示簇头节点需要时时检测主用户的通信信道的占用情况所需的能量.若主用户停止通信,或两节点间的通信距离小于 $2R$ 等其他情况时, $E_h' < E_h$.因此式所示为簇头节点传输单位数据时的能量消耗上限.令 E_t 表示在认知无线网络中传输单位数据所需要的总能量,则有:

$$\begin{aligned} E[E_t | N = n] &= E[E_h | N = n] + E[E_m | N = n] \\ &= E[N] \left[\frac{(1+\beta)(1-p)}{2mr\sqrt{p\lambda}} + \frac{(4+\beta)R}{mr} + \beta p \right] P_t \quad (6) \\ &= \lambda \pi R^2 P_t \left[\frac{(1+\beta)(1-p)}{2mr\sqrt{p\lambda}} + \frac{(4+\beta)R}{mr} + \beta p \right] \end{aligned}$$

式(6)两端对 p 求导并令求导后的式子为零,可得如下公式:

$$cp^{3/2} - p - 1 = 0 \quad (7)$$

其中, $c = 4mr\sqrt{\lambda}\beta/(1+\beta)$,解关于 p 的高阶方程,我们可以得到三个根,舍弃其中的两个虚根,实根表示如下:

$$\begin{aligned} p = & \left[\frac{\sqrt[3]{8 + 12\sqrt{3}c\sqrt{27c^2 + 4 + 108c^2}}}{6c} + \frac{1}{3c} \right. \\ & \left. + \frac{2}{3c\sqrt[3]{8 + 12\sqrt{3}c\sqrt{27c^2 + 4 + 108c^2}}} \right]^2 \quad (8) \end{aligned}$$

由式(8)得到的最优簇头概率 $p(\beta, m)$ 可使认知无线网络中传输单位数据过程中的能量消耗最小.令 $R = 10\text{m}$, $r = 1\text{m}$, $P_t = 1$, $m = 1$, $\beta = 1$ 即发射能量与接收能量同为单位能量,使用 Matlab 仿真软件根据式(6)

不难绘制出如图 1 所示的单位时间内网络能量消耗与 p 和 λ 的关系图。

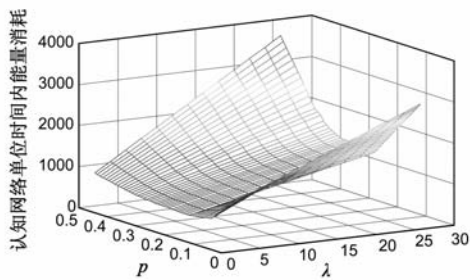


图1 单位时间内网络能耗与 p 和 λ 的关系

由图 1 可知,网络单位时间内的能量消耗最小值并不是网络中簇头节点最少的情況,这是因为考虑到节点发送和接收数据都需要消耗一定的能量,而且每个簇头平均管理 $(1-p)/p$ 个成员节点,单位时间内还要接收 $(1-p)/p$ 个节点发送的数据包.因此过多或过少的成员都会影响单位时间内网络的总能耗。

2.2 DTACRA 算法双门限值的计算

在这一节中,我们延续上一节的思想对认知无线网络能耗模型做进一步分析,通过对认知网络中的簇内节点增加约束条件来计算认知无线网络双门限簇头轮换的门限值。

我们假设簇内普通节点与簇头的通信距离不大于普通节点的通信半径 r . 参考文献[12]的能量模型,通信节点的发送和接收能量消耗可表述为如下公式:

$$\begin{cases} E_r = E_{\text{elect}} k \\ E_t = E_{\text{elect}} k + E_{\text{amp}} l^\alpha k \end{cases} \quad (9)$$

其中 E_{elect} 为电路能耗, E_{amp} 为射频增益, k 为发送或接收的比特数, l 为通信距离, α 为信道衰减因子,对于自由空间信道模型 $\alpha = 2$. 因此公式(4)和(5)可以进一步表述如下:

$$E[E_m | N = n] = npkE[N_c](2E_{\text{elect}} + E_{\text{amp}}r^2) \quad (10)$$

$$E[E_h | N = n] = npk[(E[N_c] + 1)(2R/2mr) \cdot (2E_{\text{elect}} + E_{\text{amp}}(2r)^2) + E_{\text{elect}}] \quad (11)$$

由此可得到认知网络处理 k bits 数据网络的总能耗为

$$\begin{aligned} E[E_t | N = n] &= E[E_h | N = n] + E[E_m | N = n] \\ &= \lambda \pi R^2 k \left[(3 - 2p + \frac{2R}{mr}) E_{\text{elect}} + (1 - p + \frac{4R}{mr}) E_{\text{amp}} r^2 \right] \end{aligned} \quad (12)$$

因此,可计算出认知网络可支持交换的数据总量期望 $E[D | N = n]$,其表述如下:

$$\begin{aligned} E[D | N = n] &= \frac{nE_0}{E[E_t | N = n]} \\ &= \frac{E_0}{\left[(3 - 2p + \frac{2R}{mr}) E_{\text{elect}} + (1 - p + \frac{4R}{mr}) E_{\text{amp}} r^2 \right] k} \end{aligned} \quad (13)$$

为了使认知网络寿命最大化,势必要平衡各簇之间的能耗差异,保证当网络停止工作时,节点 i 的剩余能量 $(E_{\text{res}})_i, i = 1, 2, \dots, n$ 小于簇头节点处理单位数据的能耗 $E[E_h | N = n]$. 为此,我们设计了认知无线网络双门限簇头轮换算法。

令 E_{mem} 表示任意普通节点传输 k bits 数据到簇头节点的能耗,其表述如下:

$$E_{\text{mem}} = k(2P_{\text{elect}} + P_{\text{amp}}r^2) \quad (14)$$

则在网络运行过程中,节点 i 的总能量 E_0 可表述如下:

$$E_0 = ((E_h)_i - E_{\text{mem}})(D_h)_i + E_{\text{mem}}D \quad (15)$$

其中, $(D_h)_i$ 表示节点 i 担当簇头时所需要处理的 k bits 数据包的数量,其可表述如下:

$$(D_h)_i = \frac{E_0 - (E_{\text{res}})_i - E_{\text{mem}}D}{E_h - E_{\text{mem}}} \quad (16)$$

因此,第二道能量门限触发时簇头能量为:

$$\begin{aligned} (E_{\text{th2}})_i &= (E_{\text{res}})_i - (E_h)_i (D_h)_i \\ &= (E_{\text{res}})_i - \frac{(E_0 - (E_h)_i - E_{\text{mem}}D)}{1 - [E_{\text{mem}}/(E_h)_i]} \end{aligned} \quad (17)$$

由于认知节点非均匀分布在圆形区域中,因此对于各个簇头来说,其所管理的普通节点个数各不相同,而其转发的数据也会因其所在的位置而有所不同.而簇头节点在下一次轮换之前还需要处理 D_h 个数据,而这些数据又可细分为必须处理的数据和可选择处理的数据,如下式所示。

$$D_h = D_{h_nec} + D_{h_opt} \quad (18)$$

其中, D_{h_nec} 表示簇头必须要处理的数据个数,包括本簇内节点通信时传输到簇头的的数据个数、簇头将普通节点和自身的数据发送出去的个数以及簇头检测主用户通信时数据的个数, D_{h_opt} 表示簇头处理其他簇通过该簇头转发数据的个数.令 E_{c_nec} 表示簇头必须处理数据的能耗,其具体表述如下:

$$\begin{aligned} E_{c_nec} &= k(E[N_c] + 1)[P_{\text{elect}} + (2P_{\text{elect}} + P_{\text{amp}}(2r)^2)] \\ &= \frac{k}{p}(3P_{\text{elect}} + 4P_{\text{amp}}r^2) \end{aligned} \quad (19)$$

因此第一道能量门限触发时,簇头节点处理可选择处理数据的能耗不大于 E_{th1} ,表述如下:

$$\begin{aligned} (E_{\text{th1}})_i &= (\frac{E_h}{np} - E_{c_nec})(D_h)_i \\ &= \frac{k}{mr}[(2R + mpr - 3mr)E_{\text{elect}} + (R - mr)4E_{\text{amp}}r^2] \end{aligned} \quad (20)$$

认知节点在达到门限 E_{th1} 后会拒绝中继其他簇的数据,而仅服务于本簇内的节点,等待簇头轮换消息或到达门限 E_{th2} 时发起全网的簇头轮换操作。

3 DTACRA 算法描述

这一节中具体描述 DTACRA 算法的实现步骤,但

其前提条件是认知网络已经采用簇头选举算法选举出了一定数量的簇头. 下面我们将详细描述本文提出的算法在通信过程中实现的流程:

(1) 在簇头选举结束后, 网络进入到了正常通信阶段. 此时, 簇头节点周期性的向簇内普通节点发送配置信令, 其中包括主用户的信道使用情况、簇内节点通信时可用的信道等相应的信息. 同时全部转发本簇内的通信信息. 再根据式(20)计算出门限 1 的能量值, 有选择性的转发来自其他簇内的需要转发的信息. 普通节点周期性的将自身的剩余能量通知簇头节点, 以便在下次簇头选举过程中使用.

(2) 经过了一定周期的数据交换后, 各簇头的能量在门限 1 的控制下基本保持在相同范围内. 以下两种情况簇头都可触发轮换:

(a) 当簇头能量小于由式(17)计算出的能量门限后, 该簇头将发起簇头轮换消息 MSG_CLUSTER_ROTATION, 通知全网重新选择簇头;

(b) 当簇头发出路由请求消息 RREQ(Route Request)后, 由于各簇头节点基于门限 1 的能量考虑, 没有回复 RREP(Route Reply)造成了源节点无法寻找到目的节点, 此时源簇头认为网络中的各簇头节点都已基本到达门限 2 的剩余能量, 也会发起 MSG_CLUSTER_ROTATION 消息, 重新选择簇头.

(3) 当普通节点在一定周期内没有收到簇头的配置信令, 则其认为簇头已经死亡, 该普通节点会采用簇内发射功率发起 MSG_CLUSTER_REBUILD 消息, 采用簇头选举算法在局部重新选择簇头接入到认知网络中, 保持各节点通信的畅通.

4 仿真结果

4.1 能量消耗模型验证

本文采用 NS2 2.29 仿真软件搭建仿真平台对提出的认知无线网络能量消耗模型进行仿真验证. 仿真区域设计为半径为 100m 的圆形区域, 其中分布若干认知无线电节点. 网络层采用 CBRP 分簇路由协议, MAC 层采用 IEEE 802.11 接入机制, 每个节点以 50bits/s 为期望的 Poisson 分布产生数据, 以 10s 作为单位时间统计认知网络的能量消耗, 节点的初始能量均为 5J, 发射功率为 0.001J. 如图 2 所示, 为认知网络仿真前 10s 的能量消耗情况.

由图 2 可知, 认知网络的最低能耗与最优簇头概率和簇内节点个数的期望值有关, 这正好与由公式(6)绘制的图 1 呈现的规律相吻合. 此外, 如图 2 所示, 随着簇内节点个数期望的增加, 产生最低能耗的最优簇头概率的值在减小. 为了得到 p 和 λ 的关系, 令 $\sqrt{\lambda} = \alpha^3$, 其

他变量均作为常数, 则式(8)可近似得到如下关系:

$$p \propto \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha^3} + \frac{1}{\alpha^5} \right)^2 \quad (21)$$

由此可见, 最优簇头概率与簇内节点个数期望值成反比例关系.

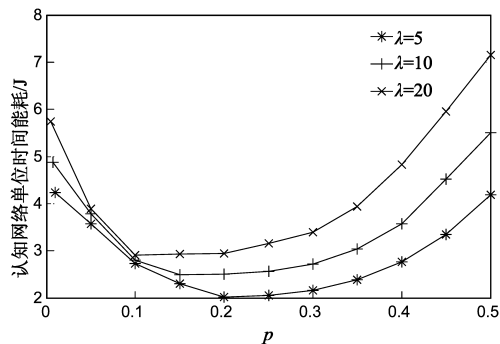


图2 仿真前10s时认知网络能耗情况

4.2 DTACRA 算法的仿真分析

下面在能量模型确定的网络最小能耗的基础上, 仍采用 NS2 2.29 仿真软件, 仿真参数不变, 进一步比较 LEACH、EDAC 和 DTACRA 三种算法在延长网络寿命方面的能力. 文献[11]中指出, 网络寿命是当网络通信建立开始到任意节点能量耗尽所经历的时间.

由于实际分簇算法获得的簇规模不等, 再加上每个簇头所处的链路闲忙程度不同, 故每个簇头的能耗速率不尽相同. 图 3 为网络采用 ($p = 0.102, \lambda = 20$) 配置下各节点在仿真前 10s 的能量消耗情况. 可见, 簇头节点的能耗消耗远高于簇成员节点, 且网络能耗极不平衡. 因此, 如 LEACH 等时间驱动的轮换策略和 EDAC 等某些固定能量门限的簇头轮换策略都难以获得优化结果, 采用自适应能量驱动簇头轮换算法会是较好的选择.

对比 LEACH、EDAC 和 DTACRA 三种簇头轮换算法及理论计算下网络的生存时间, 当网络中簇规模增长的情况下, 网络生存时间如图 4 所示, 其中, 理论寿命根据网络节点总能量与网络运行 10s 内的能耗相比得到的网络寿命理论值. LEACH 的簇头轮换时间阈值参数为 300s, EDAC 的轮换阈值参数 $p_{opt} = 0.644$, ($E_{th} = p \cdot E_{res}$)^[12], 由于网络初始能量相同, 而依据簇头节点的实

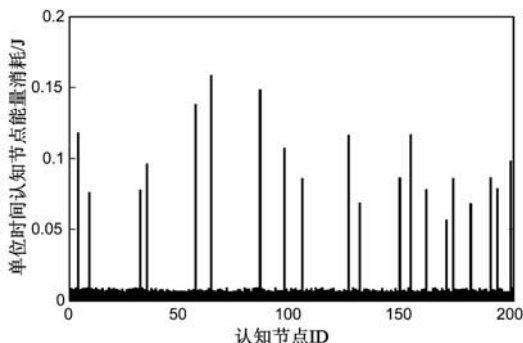


图3 采用最小能耗配置下的网络各节点能耗情况

时负载动态计算能量阈值的 DTACRA 算法可以获得最高的网络寿命,说明 DTACRA 算法对于节点的能量利用效率最高,EDAC 次之,而 LEACH 最差(一些节点过早耗尽能量缩短了网络寿命)。

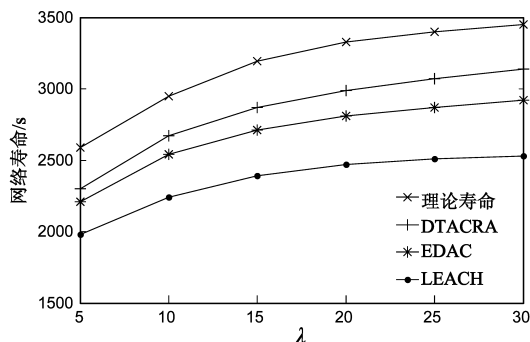


图4 网络寿命随着网络规模变化情况

5 结语

本文分析了基于分簇的认知无线网络能量驱动的双门限簇头轮换策略,给出了一种基于簇头节点实时负载估计其启动轮换的能量阈值的方法,并通过仿真给出了其与现有算法如 LEACH 和 EDAC 算法的性能比较,结果表明,DTACRA 算法能够有效的平衡网络节点的能量差异,使得节点的能量利用效率更高,从而延长了网络生存时间.结合文献[11]提出认知网络簇头选举算法,将会使得认知网络寿命得到进一步的提升。

参考文献

- [1] 马志■,曹志刚.认知无线网络用户合作机会接入方案的研究[J].电子学报,2009,37(4):678-683.
Ma Zhiyao, Cao Zhigang. Secondary user cooperative opportunistic access scheme in cognitive radio networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 678-683. (in Chinese)
- [2] Kondareddy Y R, Agrawal P, et al. Cognitive radio network setup without a common control channel[A]. Military Communications Conference[C]. San Diego: Academic Press, 2008. 1-6.
- [3] 谢志军,钱江波.传感器网络中基于域的分布式自动成簇算法研究[J].电子学报,2010,38(1):218-221.
Xie Zhijun, Qian Jiangbo. Researches on area based distributed clustering auto model in sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 38(1): 218-221. (in Chinese)
- [4] Deosarkar B P, Yadav N S, et al. The effect of spreading factor on network Lifetime and energy consumption rate of low energy adaptive clustering hierarchy (LEACH)[A]. Advances in Computing, Control, & Telecommunication Technologies[C]. Trivandrum, Kerala: Academic Press, 2009. 428-432.
- [5] Heikalabad S R, Rahmani N, et al. REACH: The new routing algorithm based on energy aware clustering hierarchical for lifetime increasing in wireless sensor networks[A]. Electronics and

Information Engineering[C]. Kyoto: Academic Press, 2010. 288-291.

- [6] Shangping D, Pingping W. An energy efficient clustering formation algorithm for wireless sensor networks[A]. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing[C]. Dalian: Academic Press. 2008. 1-4.
- [7] Na X, Hawei Q, et al. Estimated energy based adaptive clustering protocol in WSNs[A]. Communications and Mobile Computing[C]. Yunnan: Academic Press. 2009. 141-145.
- [8] Gamwarige S, Kulasekera C. Optimization of cluster head rotation in energy constrained wireless sensor networks[A]. Wireless and Optical Communications Networks[C]. Singapore: Academic Press, 2007. 1-5.
- [9] Weichao X, Hung Y S, et al. Asymptotic mean and variance of gini correlation for bivariate normal samples[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(2): 522-534.
- [10] Fei H, Lakdawala S, et al. Low-power, intelligent sensor hardware interface for medical data preprocessing[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2009, 13(4): 656-663.
- [11] 谭学治,徐贵森,等.极大网络寿命的认知无线网络自组网算法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2010,38(6):29-34.
Tan Xuezhi, Xu Gui-sen, et al. An automatic construction algorithm of cognitive radio networks based on maximal network lifetime[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(6): 29-34. (in Chinese)
- [12] Gao R X, Zhaoyan F. Architectural design of a sensory node controller for optimized energy utilization in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2006, 55(2): 415-428.

作者简介



徐贵森 男,1982年出生于黑龙江哈尔滨.现就读于哈尔滨工业大学通信技术研究所攻读博士学位.主要研究方向为认知无线网络组网技术研究. E-mail: xuguisen@hitrc. hit. edu. cn



谭学治 男,1957年出生于黑龙江哈尔滨.哈尔滨工业大学通信技术研究所副所长,教授,博士生导师.研究方向有专用移动通信系统、个人移动通信、通信新技术、智能信息系统、认知无线电技术.