



基于跨层的认知无线电绿色网络关键技术综述^{*}

王 娇^{1,2}, 赵军辉^{1,2}, 杜家娇¹

(1. 北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044;

2. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室 北京 100044)

摘 要:探讨了跨层的认知无线电技术在绿色网络中的应用,绿色网络以节能为目标,收集和讨论了将认知无线电的各种跨层技术应用于绿色网络的关键技术。首先,讨论了认知无线电绿色网络跨层的方法,从频谱架构、跨层结构两方面分别展开;其次,对多种认知无线电跨层方案,以节能为目标做出对比;最后,为绿色网络的认知无线电跨层技术相关开放性问题提出一定见解,以期为今后设计绿色网络跨层架构提供指导方案。

关键词: 认知无线电;跨层设计;绿色网络

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.03.021

Survey on Cognitive Radio Green Network with Cross-Layer Technology

Wang Jiao^{1,2}, Zhao Junhui^{1,2}, Du Jiajiao¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Applications of the cognitive radio technology based on cross-layer in green networks with the aim of saving energy were explored. A variety of key technologies on cognitive radio based on cross-layer protocol in green network were collected and discussed. First, the spectrum of architecture and cross-layer structure on cognitive radio network were discussed; second, a large number of cognitive radio cross-layer solutions were discussed to make energy-saving target contrast; third, the key challenges were pointed out and possible solutions for cross-layer cognitive radio technology in green network were provided.

Key words: cognitive network, cross-layer design, green network

1 引言

绿色网络旨在减少系统和设备的能源消耗。不同于传统网络的能耗高、效率低和资源浪费,绿色网络为节约能耗提出了可行性方案。绿色网络所采取的策略包括以下两个方面:

· 改变人们的行为方式;

· 节省技术和经济投资。

对于个人和机构(如本地居民、大型组织等)而言,采用绿色网络技术有助于减少碳排放及能量消耗。构建绿色网络已经成为通信技术领域一个意义深远的课题。其中,应用动态频谱接入的认知无线电技术,可以用来解决频谱效率低下及资源浪费的问题,达到降低能耗的目标。

认知网络是具有认知功能的网络,它可以感知网络当

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.61172073),教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(No.NCET-12-0766),中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No.2013JBZ01),轨道交通控制与安全国家重点实验室(北京交通大学)自主研究课题(No.RCS2011ZT003)

前的状况,制定计划,做出决定,并且根据以上条件执行,由此促进了认知无线电(cognitive radio, CR)的发展。认知无线电是可以提高频谱利用率的新技术。图 1 是认知无线电节点的网络拓扑,多跳的无线网络最基本的传输模型就是从源节点向中心节点传输信息。

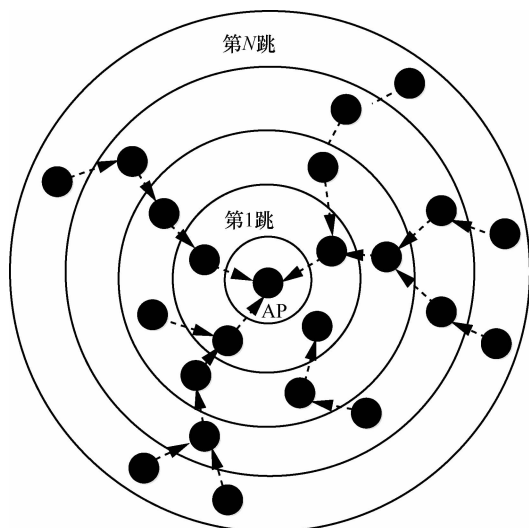


图 1 认知无线电节点网络拓扑

严格的分层体制不能够灵活适应充满活力的无线网络环境,并且阻碍了网络的优化。跨层设计作为一种可以提高网络性能的新趋势应运而生。跨层网络设计更改了单纯的分层步骤,通过不相邻层的直接通信以及层间直接信息共享改变了传统的分层体系。跨层协议的方法已经证明比分层实现更有优势。而且由于跨层考虑使用不同的方法,可以避免复杂的计算和过度的开销,同时发现哪个网络能获得更多资源。

2 认知无线电绿色网络中的跨层技术

跨层的概念最先在 TCP/IP 网络中部署无线链路时被提出^[1]。由于 TCP/IP 协议栈已经被有线通信应用,无线技术作为存在网络的一部分存在性能的缺失。认知无线电绿色跨层优化的共同目标是降低能耗,用高效的路由提供服务质量保证并且优化调度。

2.1 认知无线电绿色网络的频谱架构

认知无线电绿色网络频谱架构可以分为两个主要部分:主网和 CR 网络。主网是指现有的网络,主用户(PU)有执行许可,可以运行特定的频段。如果主网有一个基础的支持,PU 的操作被主机站控制。由于它们具有频谱接入的优先权,PU 不被次用户所影响。CR 网络(或者次网络)没

有在特定频段运行的许可,CR 用户(或者次用户)需要额外的功能来分享许可的频段。此外,CR 用户具有移动性,能够在互相之间以多跳方式在授权或者未授权频段进行交流。通常情况下,CR 网络作为独立网络,不具备与主网络直接沟通的渠道。因此,每个 CR 网络的行为取决于当时的条件。

为了适应动态的频谱环境,就必须进行 CRAHN(cognitive radio Ad Hoc network)的频谱感知操作,形成一种认知循环。认知周期包括 3 个频谱管理功能:频谱感知、频谱决策和频谱共享。为了实现 CRAHN,每个功能都必须融入传统的分层,如图 2 所示。频谱管理功能的主要特征介绍如下。

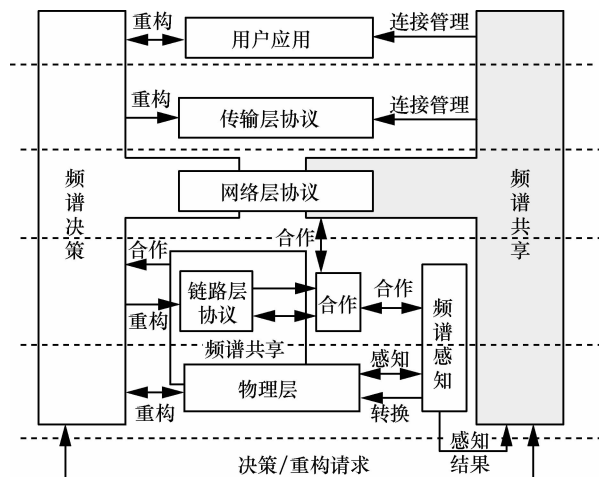


图 2 跨层网络频谱管理

- 频谱感知:一个 CR 用户分配到一个未使用的频谱。CR 用户应检测到可用频谱,然后监测频谱空穴。频谱感知是 CR 网络的一个基本功能,同其他频谱管理功能密切相关,靠分层协议提供频谱可用性。
- 频谱决策:一旦可获得的频谱被认定,CR 用户可以根据自己的 QoS 要求选择最合适的频段。此外,在 CRAHN,频谱决策设定 CR 用户共同承担的频谱并形成路线。
- 频谱共享:由于可能会有多种 CR 用户尝试访问频谱,它们的传输应该加以调节,以防止频谱重叠碰撞。频谱共享一般分为集中式频谱共享和分布式频谱共享方式。

2.2 认知无线电绿色网络的跨层结构

不同于传统的网络层,认知无线多跳网络需要考虑以



下4层^[2]:应用层、网络层、媒体接入控制(MAC)层和物理层。一些跨层协议已经被设计用来控制拥塞和终端对终端的通信(传输层的功能)。图3表明在应用层可以获知MAC层的服务质量需求,以更好地调度程序来运行应用,信道状态信息(channel state information, CSI)可以被发送到网络层,从而使路由协议可以避免破坏路径。

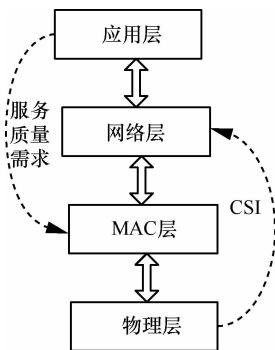


图3 跨层结构

跨层架构在4个基本的方式上做了改变:创建新接口;合并相邻层;设计没有新接口的耦合;跨层垂直校准。跨层协议设计能够设计两层或者更多层的参数,参数可以被检索或者修改,以实现优化。

3 认知无线电绿色网络中的跨层方案

绿色网络以节约能耗为主要目标,适用于各种认知无线网络。以认知无线传感器网络为例,由于传感器节点多为电源供电,如何有效地节能成为研究的关键问题,跨层方案为绿色网络的节能优化提出了新的思路。如图4所示为认知无线电绿色网络的跨层方案,各层通过认知跨层控

制器进行认知决策。

3.1 物理层

超宽带(UWB)是无线传感器网络跨层协议的物理层可以考虑的技术之一,这种短距离高数据速率传输的技术具有低成本、低复杂度、较强抗多径衰落性和抗干扰性的优点^[3]。

参考文献[4]提出一种跨层自适应码位置调制(adaptive crosslayer position modulation, ACPM)方案,定义了一个新的层——数据分组调度层,这个层可以计算时延和分组丢失率。从时延需求可选择最佳调制方案,从分组丢失率的角度,物理层可以决定一个分组在传输过程中所遇到的最大误码率,因此,为满足需要,可以调整预定的调制发射功率。

对于认知无线传感器网络,传感器是只有一个发送和接收天线配备的小型设备。而对于MIMO通信,每套设备需要多个天线,可以通过节点的合作实现虚拟的通信。这种通信模式也能减少能源的消耗^[5]。参考文献[6]即应用了虚拟MIMO双跨层的方法。

参考文献[7]提出的多级调制可以利用多跳映射和调度的算法在每个传感器节点中寻找其认为的最佳应用映射。通过动态电压缩放,可以参考最小的功率来计划任务,同分布式计算架构相比,节点的能量消耗减少了52%。

3.2 MAC层

多址接入的载波监听碰撞(carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA)是MAC层主要考虑的技术。按照分组丢失率、物理层测量和分组碰撞率、分组阻塞率和服务时间的概率分布计算MAC层的工作周期。计

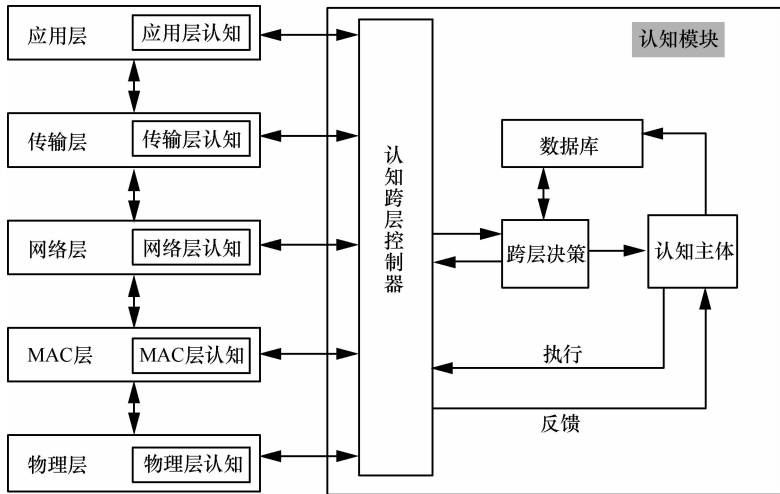


图4 认知无线电绿色网络跨层方案

算工作周期需要考虑收集和分发两个过程。对于收集, 汇聚节点决定了工作时间并将它们传输给其他传感器节点, 这实现了可靠性, 却使协调节点更耗能。分发方面, 协调节点只发送传感器节点的数目, 每个传感器节点都可以计算出自身的占空比, 以保持高于预定义限制的可靠性。这样, 协调节点的能耗变少了, 网络传感的可靠性还保持在相同的水平。

带碰撞检测的载波监听(CAEM)是一个考虑了带碰撞检测的载波监听多路访问(carrier sense multiple access with collision detection, CSMA-CD)的跨层能力管理办法, CSMA-CD 为信道访问方法^[8]。所有的传感器不停地感知信道的状态, 如果它们中的一个要发送数据分组, 信道条件好的话就能完成, 信道条件不好, 分组就会被延缓。

参考文献[9]提出睡眠感知树(SS-tree), 传感器节点树可以进行传感器睡眠调度。然后, 用 CSMA 接入媒体, 通过下游和上游阶段使用, 减少分组冲突的数量。这样, 可以在满足监控要求的同时达到降低能耗的目的。

跨层设计也可考虑时分多址(TDMA), 可以自动重复请求和在 MAC 层考虑采用 TDMA 思路的电源控制方案^[10]。利用集中式验证算法检查每个环节的信道状态。然后, 它可以定义每个信息流的最佳路径, 也适应转播的限制, 以增加分组投递的成功率。因此, 分组传输之间的概率和网络寿命之间要均衡。

TDMA 也可通过使用两种算法相结合的方法, 以最佳方式安排所有可能的传输^[11], 同前一种算法的最大程度相比, TDMA 的时隙分配能耗减少了 17%, 同节点调度算法相比, 能耗减少了 5%。

参考文献[12]提出了一种无线体域网(wireless body area network, WBAN)的跨层电池感知的 TDMA MAC 协议, 研究了电池动力学, 得出的结论是如果电池使用有空闲时间, 那么电池能量耗尽的时间会较长。因此, 文献中建议使

一个节点的非传输时间尽可能长, 在相同的服务质量下, 同 IEEE 802.15.4 相比, 传输的数据分组多达 50 倍, 同蓝牙相比, 高达 33 倍。

参考文献[13]提出非线性跨层优化模型, 认为 TDMA 可以作为介质访问的方法。文献中提出了一种数学模型, 可以利用收集的传输负荷信息、重新传输信息来制定调制方案, 计算最佳的传输流量和比率。通过用非线性优化模型分析计算趋势, 提出了一个最小时延调度算法。该算法进行了线性、网格和随机拓扑测试, 证明其是节能的。

为了解决节点接入问题并降低 WMSN 的能耗, 笔者认为传感器节点的媒体接入可以通过 TDMA 的方式进行, 采用 TDMA 传输方式的节点的速度范围从静止到低速, 可形成一个在混合整数线性规划的处理节点参与下网络寿命最大化的问题^[14]。如图 5 所示, 每个节点的活动周期内, 要在沿传输路径上下一节点开始控制传输过程之前发送传输警报。因此, 有数据分组需要传送的节点要发送一个短报文, 以便接收节点保持活动状态, 用于接收数据分组。

吞吐量最大化 MAC(TM-MAC)协议^[15]是一个介质接入的新型跨层协议, 它能够将超宽带微网分成组, 并计算出最佳调度和传输速率, 以减少干扰。同 IEEE 802.15.3 表现相比, 吞吐量提高到 22%, 而数据分组的传输时间缩短达 32%。

总之, 在 MAC 层理论框架下建模分析认知无线电绿色网络的性能是一件复杂的事。尽管对系统性能标准的某些方面进行了简化, 但所建模型依然为决策者提供了一个评估认知网络性能的具体方法。

3.3 网络层

基于路由和媒体接入控制的空中平台(APRMAC)协议^[16], 每个传感器节点需要通过发送 hello 分组发现相隔一跳的节点。然后, 所有传感器将这个信息发送给一个 LOS 的空中节点。这个控制平台负责计算所有传感器到离它们最近的汇聚节点的路由, 然后为所有的节点安排媒体

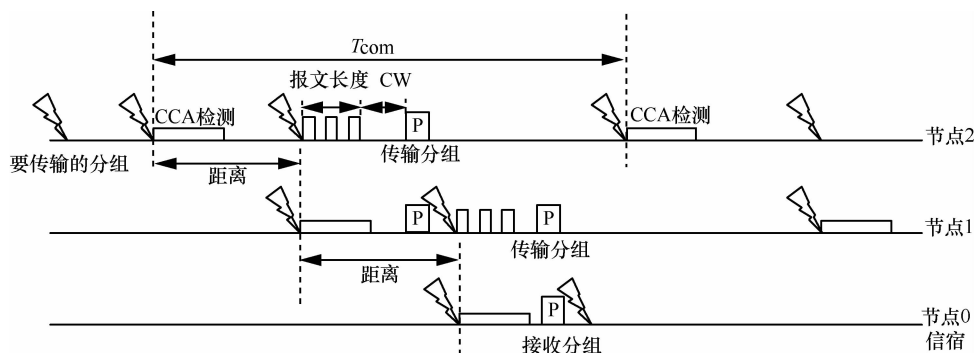


图 5 级联 MAC 协议中节点活动周期



接入时间。这样,每个节点知道什么时候可以传输,什么时候可以支持收听,什么时候可以进入休眠模式,比交通自适应介质访问(traffic adaptive medium access, TRAMA)模式节约了至少5%的传感器能量。

最短路径或最小能耗路由解决方案^[17]没有考虑到无线传感器网络的带宽限制。因此,参考文献[17]提出了一个能够根据利用率调整时分多址(TDMA)的连接速率的跨层路由协议。已经证实,同最短路径相比网络的生命周期增加了40%,而且链接的能力也有了提升。

参考文献[18]也在跨层协议中考虑 MIMO 通信。设计者将 LEACH 协议作为多簇路由协议的基础。簇头(CH)能够根据终端到终端的 QoS 参数,通过实现可接受的最小数据分组错误概率,选择与下一个簇头参与 MIMO 通信的节点,这样可以最大限度地避免数据分组重传,减少整体的能源消耗。

3.4 应用层

参考文献[19]提出多层次的速率路由(MLRR)考虑正交相移键控(QPSK)和正交幅度调制(QAM)。这两个建议都能计算出最佳的传输速率,以实现低分组错误率。

数据融合(也称数据聚集)是用来减少测量误差的技术。在这种情况下,数据不被编码,以减少传输的比特数。相反,系统会从多个传感器接收数据进行比较来搜索错误。因此,Liang 等人提出了一个可靠的,可以提高数据融合和网络寿命的跨层解决方案。该方案利用传感器的信道状态信息设置传感器多路径传输,获得更好的体验效果,也可以利用这些信息来衡量一个传感器进行测量融合时数据的可靠性。因此,为了保证传感器发射通道性能,最大比合并融合算法误比特率可降低1000倍,从而更加节能。

数据融合也被用于数据融合和路由策略协议 GRASS(grid-based routing and aggregator selection protocol)。在此场景下,簇得以形成,簇头将来自簇内传感器的数据聚合起来。然后,簇头有责任找到一个通往基站的路由以实现网络寿命最大化。结果显示同定向扩散协议相比,至少有35%的寿命增益。此外,为避免网络中簇头的生命周期太短,簇内会阶段性地选出新的簇头。

图6为认知无线电应用跨层算法的功率收敛,随着认知用户数目的增加,系统功率分配性能(收敛性)减缓,最终在较短的次数限制内达到较好的控制。在应用层,存在一个负责应用程序调度的框架。该框架基于不同操作系统和硬件平台,其算法具有可移植性并且能够实时地监测并

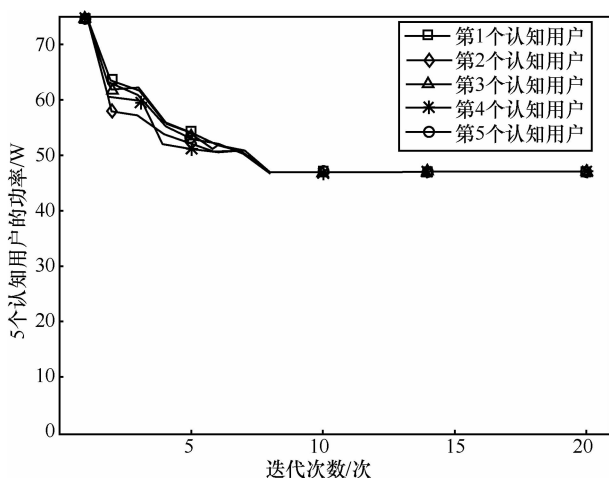


图6 应用跨层算法的5个认知用户环境下功率分配性能

降低应用程序的能耗。该算法可以使工作负载、可用资源和应用程序需求三者互相平衡,还可决定处理器何时可以进入低功耗模式。通过系统功率分配性能(收敛性),得到较好的控制结果,可以看出,应用跨层算法的认知网络在改善功率分配上功效显著。

4 结束语

跨层设计能够通过层间的交互,动态地分配频谱资源,可以避免复杂的计算和过度的开销,同时发现哪个网络能获得更多资源,达到认知无线绿色网络节能、节约资源的目标。本文归纳了以下两点。

第一,将跨层技术应用于认知无线电中,各层协议能够通过获取交互的数据自动去改变自身行为方式。例如,当节点获取当前网络的状态以后,MAC层会自动改变节点的睡眠时间;在获取网络和链路状态后,物理层可以通过改变发送速率、发送能耗和编码方式适应应用的需求。

第二,跨层设计应用与认知无线电可以实现逻辑上并不相邻的协议层次间的设计互动与性能平衡,支持网络能量管理的优化,提高网络的实用性和可行性。以传感器网络为例,在网络中,可以采用自适应的跨层优化协议,在能量受限的情况下,有效节省能量,延长网络的生存期。

认知无线电跨层的方法对绿色网络而言具有广阔的发展前景。绿色网络节约频谱资源、合理分配网络、减少能耗等目标可以应用跨层的认知无线电方法得到优化,同时需要注意的是,由跨层的优化框架建议表明,越考虑跨层,优化方法越多。因此,最佳的跨层解决方案需要各方面综

合考虑达到最优。

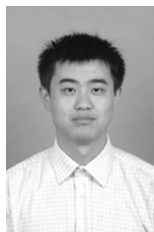
参考文献

- 1 李玥, 彭木根. 基于虚拟小区的分层异构无线组网方案. 电信科学, 2013, 29(1): 8~14
- 2 Zhao J H, Guan X, Li X P. Power allocation based on genetic simulated annealing algorithm in cognitive radio networks. Chinese Journal of Electronics, 2013, 22(1): 177~180
- 3 Yuan Y, Yang Z K, He J H, *et al.* An adaptive code position modulation scheme for wireless sensor networks. IEEE Communications Letters, 2005, 9(6): 481~483
- 4 Tang J, Xue G L, Zhang W Y. Cross-layer design for end-to-end throughput and fairness enhancement in multi-channel wireless mesh networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(10): 3482~3486
- 5 Liang J, Liang Q L. Channel selection in virtual MIMO wireless sensor networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2249~2257
- 6 Tian Y, Ekici E. Cross-layer collaborative in-network processing in multihop wireless sensor networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(3): 297~310
- 7 Lin X H, Kwok Y K. CAEM: a channel adaptive approach to energy management for wireless sensor networks. Computer Communications, 2006, 29(17): 3343~3353
- 8 Ha R W, Ho P H, Shen X S. Cross-layer application-specific wireless sensor network design with single-channel CSMA MAC over sense-sleep trees. Computer Communications, 2006, 29(17): 3425~3444
- 9 Mao J L, Wu Z M, Wu X. A TDMA scheduling scheme for many-to-one communications in wireless sensor networks. Computer Communications, 2007, 30(4): 863~872
- 10 Su H, Zhang X. Battery-dynamics driven TDMA MAC protocols for wireless body-area monitoring networks in healthcare applications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(4): 424~434
- 11 Shi L Q, Fapojuwo A. TDMA scheduling with optimized energy efficiency and minimum delay in clustered wireless sensor networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(7): 927~940
- 12 Phan K T, Fan R F, Hai J, *et al.* Network lifetime maximization with node admission in wireless multimedia sensor networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3640~3646
- 13 Ren Q C, Liang Q L. Throughput and energy-efficiency-aware protocol for ultrawideband communication in wireless sensor networks: a cross-layer approach. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(6): 805~816
- 14 Macedo M, Grilo A, Nunes M. Distributed latency-energy minimization and interference avoidance in TDMA wireless sensor networks. Computer Networks, 2009, 53(5): 569~582
- 15 Mitchell P D, Qiu J, Li H G, *et al.* Use of aerial platforms for energy efficient medium access control in wireless sensor networks. Computer Communications, 2010, 33(4): 500~512
- 16 Cheng M, Xuan G, Lin C. Joint routing and link rate allocation under bandwidth and energy constraints in sensor networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3770~3779
- 17 Zhang L L, Zhang Y. Energy-efficient cross-layer protocol of channel-aware geographic-informed forwarding in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(6): 3041~3052
- 18 Wang W, Peng D M, Wang H G, *et al.* Cross-layer multirate interaction with distributed source coding in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(2): 787~795
- 19 Liang Q Q, Yuan D F, Wang Y, *et al.* A cross-layer transmission scheduling scheme for wireless sensor networks. Computer Communications, 2007, 30(14/15): 2987~2994
- 20 Al-Karaki J N, Ul-Mustafa R, Kamal A E. Data aggregation and routing in wireless sensor networks: optimal and heuristic algorithms. Computer Networks, 2009, 53(7): 945~960

[作者简介]



王娇, 女, 北京交通大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为认知无线电技术、室内定位技术以及认知网络等。



赵军辉, 男, 博士, 北京交通大学电子信息工程学院教授, 主要研究方向为无线和移动通信(MIMO、OFDM、CDMA、合作通信、中继和认知无线电)、射频识别(定位技术、防碰撞技术和安全协议)和应用开发(停车场管理系统、嵌入式车载防盗系统和GPS导航系统开发)等。



杜家娇, 女, 北京交通大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为协作中继通信技术。

(收稿日期: 2013-09-17)