

物联网距离和业务特征结合的频谱接入方法

孙君, 朱洪波

(南京邮电大学 通信与信息工程学院 通信技术研究所, 江苏 南京 210003)

摘 要: 针对物联网应用中的频谱使用特性提出一种距离和业务结合的频谱接入方法。首先根据非系统用户与系统用户的距离关系构建用于标识系统用户信道可用度的列表, 以此提供非系统用户间的资源分配等级。其次, 根据非系统用户和系统用户对信道使用特性建立业务匹配关系式, 在可用度列表和业务匹配关系式的基础上, 构建干扰驱动效用函数, 从跨层优化角度设计频谱接入方法。结果证明该方案既能够抑制非系统用户对系统用户干扰, 又能够确保物联网应用的服务质量的资源共享。

关键词: 机会频谱接入; 业务类型; 跨层设计; 频谱共享; 物联网

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)04-0025-06

Opportunistic spectrum accessing joint distance with service characteristics in IOT networks

SUN Jun, ZHU Hong-bo

(Institute of Communication Technology, School of Communications and Information Engineering
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: An accessing scheme which combines distance with service for the applications in IOT networks was proposed. First, a channel-availability list based on the distance relationship between system and non-system users was built. The list provided a priority of each channel for non-system users. Then the service-matched expression between the IOT user and the licensed user was proposed. Based on the list and the expression, a interference-driven utility function was defined. Finally, the accessing scheme was optimized from the cross-layer design point of view. It was proved that the scheme guaranteed both the interference suppression and the resource sharing in IOT based on the QoS requirements.

Key words: opportunistic spectrum access; service type; cross-layer design; spectrum sharing; IOT networks

1 引言

在“2010 年中国通信产业发展形势报告会”上, 物联网成为了 2009 年中国通信产业十大关键词之一, 而目前基于物联网的业务应用已经在交通、农业、物流等行业中开始实施。

物联网未来将应用于无法准确估量的行业和

场景, 必然将产生海量终端, 形成远远大于人与人通信互联的移动通信与无线接入的数据量。同时, 物联网信息交互与传输以无线为主的特点, 注定了它将成为频谱资源需求的大户。届时, 频谱资源的短缺将成为物联网难以克服的瓶颈, 并且不难预想, 物联网面临的不仅是频谱资源越来越匮乏的问题, 而且还将面临着干扰也越来越严重的难题。

收稿日期: 2010-07-15; 修回日期: 2011-10-10

基金项目: 国家青年基金资助项目 (61001080); 江苏省“973”计划基金资助项目 (BK2011027); 国家科技重大专项基金资助项目 (2011ZX03005-005); 南京邮电大学校科研基金资助项目 (NY210007)

Foundation Items: The National Youth Project Foundation(61001080); Jiangsu 973 Project (BK2011027); The Important National Science & Technology Specific Projects(2011ZX03005-005); The Research Fund for Nanjing University of Posts and Telecommunications (NY210007)

资源受限成为未来网络发展的重要制约因素,为解决网络资源受限问题,机会频谱接入(OSA)技术^[1-4]应运而生。最初 OSA^[1]是指非系统用户机会地利用系统用户在空间和时间上的空白频谱进行通信的技术。后来,OSA 被用于各种实际应用的研究中,如能量受限网络应用^[2]等,并由不同的性能指标要求产生对各种算法的研究^[3,4]。

OSA 提供了频谱接入机会,使得非系统用户的无线设备可以瞬时利用系统用户所提供的频谱资源获得更多频带使用机会。这种机制对于系统用户系统而言,可以在不影响其自身的前提下开发二级频谱市场,增加经济效益;对于整个网络而言可以大大增加可用频谱数量,提高频谱利用率。不难想象,OSA 技术也将在物联网世界中发挥作用。以物联网的一个典型应用,智能家居网络为例,可以说明机会利用频谱对解决物联网世界中频谱资源紧缺问题的作用。智能家居网络是无线个域网的一种应用。个域网和移动终端之间的通信不可能单独分配一段授权的频谱资源,必须借助动态、机会的频谱接入技术,利用现有可利用的授权频谱实现共享或共存,这就必然要考虑到 OSA 技术。

OSA 在无线通信网络中的应用是目前的研究热点,例如,以 Zhao 等为代表的部分可观察马尔科夫过程(POMDP)框架下的 OSA 网络 MAC 层协议设计^[5-7],以 Peng 等为代表的博弈模型下的频谱分配策略^[8,9]等。

但是,OSA 技术在以物联网为背景环境中的应用,还尚未有过讨论。问题在于至今物联网的业务模型并没有权威研究结果,而频谱的利用与业务模型又是密不可分的。鉴于此,本文从物联网的末梢网络,即传感器网络的业务模型入手,在之前研究成果基础上探讨物联网中的 OSA 方案。在此,将传感器网络中要向移动终端发送信息的用户或设备称为非系统用户,将现有系统中固有的用户称为系统用户。

本文提出的接入模型的主要内容包括如下几方面。

1) 建立信道可用度列表:根据非系统用户与系统用户之间的距离关系以及系统用户端对干扰的最大可容忍程度,在非系统用户端建立信道可用度列表,该列表显示了非系统用户对不同信道的选择等级,同时也反映了非系统用户对系统用户资源占用的优先级。

2) 干扰驱动效用函数:考虑到非系统用户占用授权信道给授权用户带来的影响,构建干扰驱动效

用函数,以干扰最小化、效用最高化对可用频谱资源进行选择,实现最佳频谱接入策略。

3) 协议框架的跨层设计:将频谱接入策略的设计与非授权用户的感知行为、业务特性以及主用户的业务特性相结合,探讨在物联网背景下的最佳接入方法。

2 系统模型

物联网环境的一个典型应用场景模型如图 1 所示。

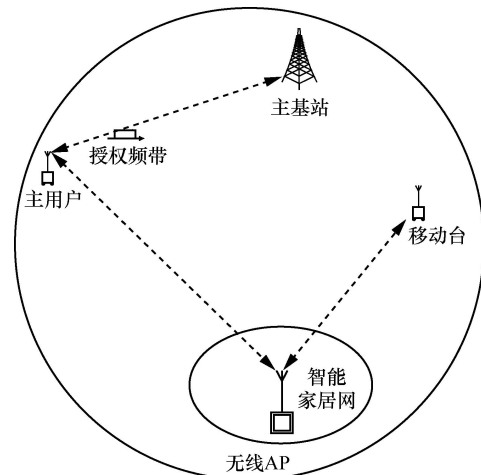


图 1 系统模型

在一个蜂窝网覆盖区域内,有主用户基站、主用户和需要与非系统用户通信的移动台。智能家居网通过感知节点(例如传感器)和个域网技术组网,并将所需要信息汇集到一个无线接入点(AP)上,通过 AP 向相应的移动用户发送信息,同时,移动用户也可以通过 AP 向智能家居网中的节点下达指令,由 AP 进行调度和分配相应的设备执行相关指令。智能家居网中的 AP 要发送信息就需要机会地利用其周围存在的可用信道资源,相对于蜂窝网而言,该 AP 就是一个非系统用户。无线 AP 通过对其附近系统用户的检测,发现可用信道资源,并机会地利用该资源与其移动台通信。

在该场景中无线 AP 附近可能存在若干系统用户,每个系统用户 $x_j, j=1, \dots, J$, 占用一个信道 $n_j, j=1, \dots, J$ 。非系统用户如何选择既保证其与移动台的通信质量,又不干扰系统用户正常通信的可用的频谱资源,是本文所提出的接入方法要解决的问题。

3 信道可用度列表

以图 1 的系统模型为背景,首先根据系统用户

的距离构建用于标识系统用户信道可用度的距离模型，如图 2 所示。

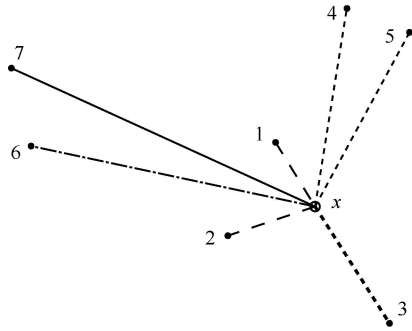


图 2 距离模型

非系统用户抽象为点 x ，其周围系统用户 $\{j=1, \dots, 7\}$ 与该非系统用户的关系如图 2 所示。将离非系统用户距离相同的系统用户放在一个集合内，集合内的系统用户所在的信道对非系统用户具有同等的优先级。由此，图中 7 个系统用户被分别放在了 5 个集合中，即， $cl_1 = \{1, 2\}, cl_2 = \{3\}, cl_3 = \{4, 5\}, cl_4 = \{6\}, cl_5 = \{7\}$ 。每个子集对应一个信道可用度，计算如下：

$$AD_n = \frac{|l_n|^2}{d_{cl_n}} \quad (1)$$

其中， cl_n 为与非系统用户具有相同距离的系统用户的集合。 l_n 为第 n 个子集中的非系统用户与系统用户间的距离， d_{cl_n} 为使用第 n 个子集中的系统用户数目，参数 J 表示综合子集的系统用户总数。由此，非系统用户对每个系统用户所有的信道可用程度有了一个标识。从对系统用户干扰的角度考虑，距离越远的系统用户所用信道的可用度越高。

4 业务匹配关系式和干扰驱动效用函数

根据智能家居网络的感知节点采集信息的特性，将非系统用户与移动台之间的通信定义为 ON-OFF 模型，如图 3 所示。

根据不同业务类型 i ，非系统用户占用信道的

时间变量为 t_{si} ，服从参数为 β_{s0i} 的指数分布，释放信道的的时间变量为 tt_{si} ，服从参数为 β_{s1i} 的指数分布。系统用户对信道的占用模型也假设为 ON-OFF 模型，主用户占用信道的平均持续时间为 β_0 。主用户释放信道的平均持续时间为 β_1 ，主用户由占用信道到释放信道所用的时间为 t ，由释放信道到使用信道所用的时间为 tt ，二者均服从指数分布。如图 3 所示，非系统用户在系统用户释放信道的的时间 tt 内根据自身对信道占用的特点对信道进行机会共享。

4.1 业务匹配关系式

要保证非系统用户不对系统用户产生干扰，在如图 3 所示的机会共享方式中，需要满足

$$(m+1)t_{si} + mtt_{si} = tt \quad (2)$$

其中，参数 m 为在一个系统用户的 tt 时间内，非系统用户所包含的 t_{si} 的个数。只有保证在一个 tt 时间内非系统用户占用信道的次数和释放信道的次数之和为整数，并且占用信道的次数比释放信道的次数多一次，才能保证系统用户和非系统用户之间的传输不发生碰撞。公式中的时间参数都是随机变量，并令 $(m+1)t_{si} + mtt_{si} = x$ ， x 的概率密度函数为

$$f_x(x) = \frac{c^2 - 1}{2b} (e^{-\frac{x}{b(c-1)}} - e^{-\frac{x}{b(c+1)}}) H(x) \quad (3)$$

$$b = 2m(m+1)\beta_{s0i}\beta_{s1i} / (m\beta_{s0i} + (m+1)\beta_{s1i})$$

$$c = -(m\beta_{s0i} - (m+1)\beta_{s1i}) / (m\beta_{s0i} + (m+1)\beta_{s1i})$$

其均值表达式为

$$E[x] = \frac{b}{2(c^2 - 1)} ((c+1)^2 - (c-1)^2) = \frac{2bc}{c^2 - 1} \quad (4)$$

变量 tt 的概率密度函数为

$$f_{tt}(x) = \frac{1}{\beta_1} \exp\left(-\frac{x}{\beta_1}\right) \quad (5)$$

其均值为 β_1 。由此，令 $\frac{2bc}{c^2 - 1} = \beta_1$ ，即有

$$|m\beta_{s0i} - (m+1)\beta_{s1i}| = \beta_1 \quad (6)$$

于是，得到非系统用户与系统用户在不发生碰

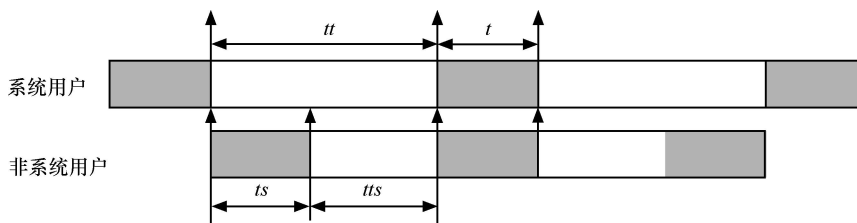


图 3 系统用户和非系统用户占用信道特性

撞时，由不同业务类型决定的非系统用户与系统用户间对信道的占用关系。式(6)为业务匹配关系式，该式能够保证非系统用户对系统用户的最低干扰，满足以上业务类型的系统用户信道可以被非系统用户机会使用的优先权高于不满足以上关系的系统用户的信道的使用优先权。同样，对于不同业务类型的非系统用户而言，满足上述关系的业务类型的非系统用户对系统用户信道的使用具有优先权。

4.2 干扰驱动效用函数

定义非系统用户的干扰驱动效用函数 $U_{si,j}$:

$$U_{si,j} = a_{si,j} B_{si,j} \log(1 + \gamma_{si,j}) \quad (7)$$

其中, $B_{si,j}$ 为非系统用户 i 在第 n 个子集中系统用户 j 所在信道所需的带宽, $a_{si,j}$ 为非系统用户 i 在信道上的接入状态系数, 其定义分别为

$$a_{si,j} = \begin{cases} 1, & \text{非系统用户 } i \text{ 接入信道 } j \\ 0, & \text{用户 } i \text{ 没有接入信道 } j \end{cases} \quad (8)$$

$$\gamma_{si,j} = \frac{|h_{si,j}|^2 P_{si,j}}{N_0 B_{si,j}} \quad (9)$$

其中, $P_{si,j}$ 为非系统用户的发送功率, $h_{si,j}$ 为非系统用户间衰落信道的衰减系数, N_0 为非系统用户在信道上的加性噪声功率。同时, 定义约束条件为

$$\gamma_{c,j} = \frac{h_{p,j}^2 P_{0,j}}{|h_{ps,j}|^2 P_{si,j} + N_0 B_{p,j}} \leq \gamma_{th} \quad (10)$$

定义 $\gamma_{c,j}$ 为发生干扰时非系统用户对系统用户的干扰对信噪比的影响, $h_{ps,j}$ 为非系统用户与系统用户间衰落信道的衰减系数, $h_{p,j}$ 为系统用户与基站间衰落信道的衰减系数, $P_{0,j}$ 为系统用户的发送功率, γ_{th} 是一旦发生碰撞后, 系统用户对干扰可容忍的信噪比门限。

非系统用户通过对吞吐量的优化, 得到最佳的接入信道 j^* :

$$\begin{aligned} j^* &= \arg \max_{j \in \{1, \dots, J\}} U_{si,j} \\ \text{s.t. } \gamma_{c,j} &= \frac{h_{p,j}^2 P_{0,j}}{|h_{ps,j}|^2 P_{si,j} + N_0 B_{p,j}} \leq \gamma_{th} \end{aligned} \quad (11)$$

4.3 信道选择准则

非系统用户需要对信道可用度、业务匹配关系和效用优化结果进行综合比较之后, 做出对信道选择的决定, 这三者之间的关系如表 1 所示。

可用信道集合	业务关系式	信道可用度	最优化结果
子集 1	1	满足/不满足	是/否
	2	满足/不满足	高/中/低
...
子集 5	7	满足/不满足	高/中/低

对每个非系统用户而言, 其所能感知到的可用信道集合中的每个子集中的每个信道都存在业务关系式满足或不满足, 信道可用程度是高、中或者低, 以及效用函数优化结果是优还是不优的结果比较, 根据表 1 中的结果, 非系统用户做出信道选择的准则如图 4 所示。

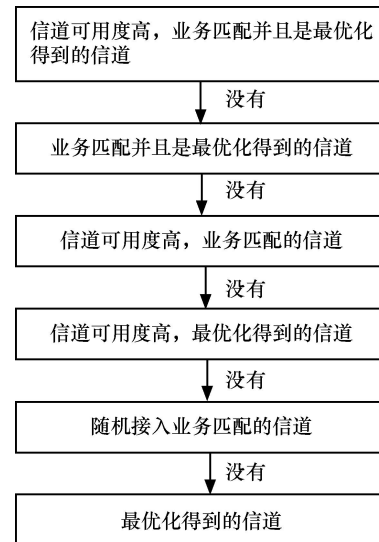


图 4 非系统用户对信道的选择准则

首先选择业务匹配、信道可用度高并且是最优化结果得到的信道; 如果不存在这样的信道就选择业务匹配并且是最优化结果得到的信道; 如果还没有这样的信道, 在信道可用度高的集合中选择业务类型匹配的信道; 如果仍然没有这样的信道, 在信道可用度高的集合中选择最优化选出的信道; 如果还是没有这样的信道, 则在业务匹配的信道中随机选择信道接入; 如果仍然没有, 则选择最优化结果选出的信道。

5 距离和业务结合的机会频谱接入框架

在以上讨论和定义的基础上, 本文所提出的物联网应用环境中距离和业务结合的机会频谱接入框架如图 5 所示。

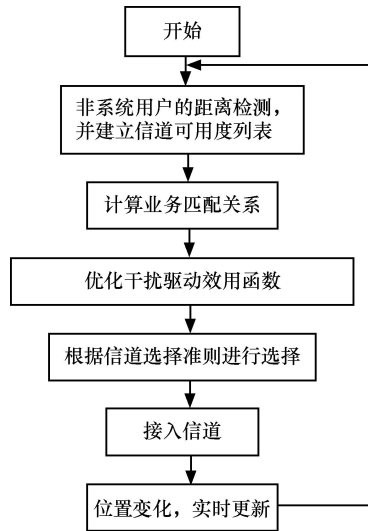


图 5 距离和业务结合的机会频谱接入框架

对非系统用户而言，当有数据传输需求时，首先对周围可能存在的系统用户进行距离检测，并根据检测结果将系统用户信道进行分类，计算相应的信道可用度数值，建立列表。对检测到的系统用户上的信道，先根据系统用户和非系统用户的业务类型，即对信道的占用特性，计算业务匹配关系式，得出业务是否匹配的结果。再根据干扰驱动效用函数，进行优化选择，并保存结果。最后，在信道接入时，根据信道选择准则做出选择。并且在非系统用户端建立的关于以上参数的列表会随着系统用户的位置变化而变化，需要进行实时更新。

6 仿真分析

在图 2 所示的系统场景下进行仿真分析。系统用户对信道占用符合参数为 β_0 、 β_1 的 ON-OFF 模型，非系统用户对信道占用符合参数为 β_{s0i} 、 β_{s1i} 的 ON-OFF 模型。非系统用户 x 根据式(1)计算得到可用信道集合中关于每个可用信道的可用度，根据式

(6)计算得到业务匹配的结果，根据式(11)得到对效用函数的优化结果。然后根据图 4 的流程，在 β_{s0i} 、 β_{s1i} 、 β_0 、 β_1 取不同参数时对应的不同业务类型，系统对非系统用户与系统用户之间的碰撞概率进行仿真和统计，得到表 2。

表 2 中列向量是非系统用户在不同业务模型下信道的占用模型对应的不同参数，例如，表中第 2 列和第 3 列，分别是在非系统用户对信道占用的参数为 $\beta_{s01}=25$ 、 $\beta_{s11}=100$ 和 $\beta_{s02}=30$ ， $\beta_{s12}=120$ 时，对应系统用户在释放信道时间参数 β_1 取不同值时得到的碰撞概率。行向量是系统用户对信道释放时间参数 β_1 固定时，非系统用户在不同业务模型下与系统用户碰撞概率的比较。从表 2 中的数据可以看出，主用户释放信道的平均时间参数 β_1 与非系统用户对信道占用信道的参数 β_{s0i} 和 β_{s1i} 满足业务匹配关系（式(6)）时，系统与非系统用户间的碰撞概率最低，并且主用户释放信道的平均持续时间越长，碰撞概率也越低。

图 6 给出了在系统用户不同最大可容忍的干扰门限条件下，本文提出的方法下非系统用户的平均容

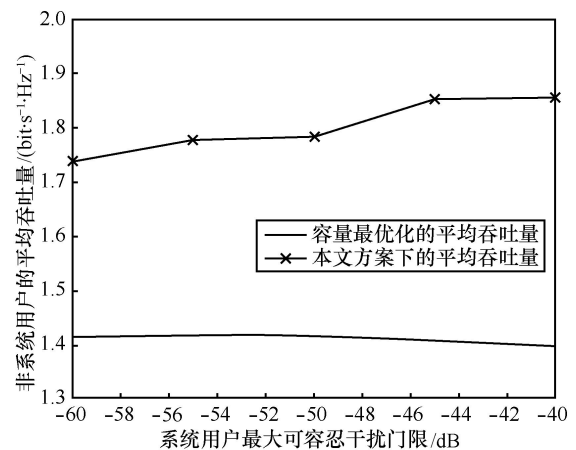


图 6 本文方法下认知用户的平均吞吐量

表 2 不同业务下系统用户与非系统用户间的碰撞概率比较

系统用户	非系统用户					
	$\beta_{s01}=25$ $\beta_{s11}=100$	$\beta_{s02}=30$ $\beta_{s12}=120$	$\beta_{s03}=35$ $\beta_{s13}=140$	$\beta_{s04}=40$ $\beta_{s14}=160$	$\beta_{s05}=45$ $\beta_{s15}=180$	$\beta_{s05}=50$ $\beta_{s15}=200$
$\beta_1=325$	0.033 1	0.942 5	0.926 7	0.970 9	0.905 3	0.910 4
$\beta_1=390$	0.906 9	0.015 4	0.885 7	0.890 1	0.882 3	0.877 9
$\beta_1=455$	0.471	0.541	0.042 7	0.604	0.58 7	0.565
$\beta_1=520$	0.338 5	0.354 0	0.364 0	0.037 5	0.377 9	0.382 0
$\beta_1=585$	0.137 5	0.149 9	0.158 7	0.158 1	0.015 5	0.163 0
$\beta_1=650$	0.116 5	0.135 8	0.132 4	0.135 0	0.141 0	0.013 6

量与单纯从容量优化角度进行接入方法的非系统用的平均容量的比较,从图中曲线可以看出本文方法的优势,整体性能比单纯的容量优化方法可以有平均 0.35bit 的增加。

7 结束语

本文考虑未来物联网对频谱使用面临的问题,以及针对物联网的应用特性导致对频谱使用特性,提出适用于物联网频谱利用的机会频谱接入方法。对物联网应用和授权网络并存的网络环境下的距离、业务、干扰特性进行分析,并分别构建了信道可用度列表、业务匹配关系式以及干扰驱动函数等,三方面结合从跨层角度协同完成频谱的机会接入策略,结果证明了本文方案的优越性,以及对物联网环境下频谱使用研究思路的可行性,相关内容的研究和结果还有待进一步深入。

参考文献:

- [1] BERGER R J. Open spectrum: a path to ubiquitous connectivity[J]. ACM, Queue, 2003, 1(3): 60-68.
- [2] HOANG A T, LIANG Y C, WONG D, *et al.* Opportunistic spectrum access for energy-constrained cognitive radios[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3):1206-1211.
- [3] CHANG N B, LIU M Y. Optimal competitive algorithms for opportunistic spectrum access[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(7): 1183-1192.
- [4] MASKERY M, KRISHNAMURTHY V, ZHAO Q. Decentralized statistic spectrum access for cognitive radios: cooperative design of a non-cooperative game[J]. IEEE Transactions on communications, 2009, 57(2): 459-469.
- [5] CHEN Y, ZHAO Q, SWAMI A. Distributed spectrum sensing and access in cognitive radio networks with energy constraint[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(2): 783-797.
- [6] CHEN Y, ZHAO Q, SWAMI A. Joint design and separation principle for opportunistic spectrum access in the presence of sensing errors[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(5): 2053-2071.
- [7] ZHAO Q, TONG L, SWAMI A, *et al.* Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in IOT networks: a POMDP framework[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC): Special Issue on Adaptive, Spectrum Agile and Cognitive Wireless Networks, 2007, 25(3): 589-600.
- [8] PENG C, ZHENG H T, ZHAO B Y. Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access[J]. Mobile Networks & Applications, 2006, 11(4): 555-576.
- [9] ZHENG H, PENG C. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access[A]. Proc 40th annual IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Seoul Korea, 2005.
- [10] WU Y, TSANG D H K. Dynamic rate allocation, routing and spectrum sharing for multi-hop cognitive radio networks[A]. IEEE International Conference on Communications Workshops[C]. Dresden, Germany, 2009. 14-18.
- [11] MA M, TSANG D H K. Joint spectrum sharing and fair routing in cognitive radio networks[A]. 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference[C]. Las Vegas, Nevada, 2008.
- [12] HAMDY K, LETAIEF K B. Power, sensing time, and throughput tradeoffs in cognitive radio systems: a cross-layer approach[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. Budapest, Hungary, 2009.
- [13] LEI D, MELODIA T, *et al.* Distributed joint routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio ad hoc networks[A]. 12th ACM International Conference on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems[C]. Tenerife, Canary Islands, Spain, 2009.

作者简介:



孙君(1980-),女,山东烟台人,南京邮电大学副研究员、硕士生导师,主要研究方向为异构网络融合、无线资源管理、动态频谱管理、频谱感知、信道估计、系统性能分析和优化等。



朱洪波(1956-),男,江苏扬州人,南京邮电大学副校长、教授、博士生导师,主要研究方向为通信工程、无线通信与电磁兼容、移动通信与宽带无线技术等。