

Ad Hoc 网络中基于距离的机会频谱接入方案

孙 君, 朱洪波

(南京邮电大学, 江苏省无线通信重点实验室 通信与信息工程学院 通信技术研究所, 江苏南京 210008)

摘 要: 本论文研究 ad hoc 网络中的机会频谱接入(OSA)技术, 建立一种既能够抑制次用户对主用户的干扰, 又能够在非合作次用户间进行公平、无冲突的资源共享的接入机制. 解决了在自组织的多用户 ad hoc 网络中, 主次用户以及次用户之间共享频谱资源, 次用户选择最佳频谱接入, 并确保抑制对主用户的干扰以及自身性能优化的问题. 为此, 建立次用户和可用信道之间的双向选择机制. 在定义了由距离决定的信道可用度的基础上, 引入次用户对信道的选择因子, 次用户根据自己的业务特征和传输要求选择最适合的可用信道. 结果表明, 这种主次用户之间双向选择的接入机制可以有效地避免主次用户以及次用户之间的资源使用冲突, 实现了对频谱资源的合理有效利用.

关键词: 机会频谱接入; MAC 层协议; 跨层设计; 频谱共享; ad hoc 网络

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 07-1679-04

Opportunistic Spectrum Access Based on Distance Over Ad Hoc Networks

SUN Jun, ZHU Hong-bo

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Wireless Communication & Institute of Communication Technology & School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: The opportunistic spectrum access (OSA) techniques in the ad hoc network are researched in this paper. An access scheme is proposed, which can not only suppress the interference between the secondary and the primary users, but also realize the fair and non-conflict resource sharing among secondary users. The solved problems include the spectrum sharing, and the optimal channel selection for secondary users which assure both the interference suppression and the self-optimization. For these purposes, the double selection scheme is built between the secondary users and the available channels. Factors to select channels for secondary users are defined based on the channel available degree. So, the secondary users can select the most appropriate channel according to the service and transfer characteristics. The results prove that the double selection scheme can avoid the conflict and realize the efficient resource sharing.

Key words: opportunistic spectrum access; MAC protocol; cross-layer design; spectrum sharing; ad hoc network

1 引言

随着蓝牙(Bluetooth)、家庭无线网(HomeRF)等移动通信新技术的纷纷涌现, 物联网、车联网等概念的逐步实现和完善, 移动终端连接到现有网络的方式也灵活多样. 在密集、应急等应用场合中, 更加需要一种不依赖基础设施能够快速灵活配置的移动通信网络技术, Ad hoc 网络^[1,2]就是为满足这种特殊应用需求而产生的.

网络中节点的多样和异构特性为 ad hoc 网络的研究提出更多挑战, 尤其是由于网络中不同制式终端对资源使用的受限性成为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)技术应运而生.

OSA 在无线通信网络中的应用已成为目前的研究热点, 例如, 以 Zhao 等人代表的建立在部分可观察马

尔科夫过程(POMDP)框架下的 OSA 网络 MAC 层协议设计^[3~5]. 以及以 Peng 等为代表的建立在博弈模型下的频谱分配策略^[6,7]等. Zhao 等人提出的基于 POMDP 框架的 OSA Ad Hoc 网络非集中式认知 MAC 协议, 存在着非集中式协议不依赖于次用户之间的合作, 次用户间资源共享的公正性无法得到保障, 并且次用户之间的碰撞无法有效避免的不足. 同时, 还存在资源共享的公平性问题.

网络资源的有效性和公正性问题很早就引起关注, 文献[8~11]中就有关于对传统无线网络中资源分配有效性和公平性的探讨. 应用 OSA 技术的无线网络中资源的有效性和公正性问题也是备受关注, 例如, 在文献[6,12~15]中都提到了解决公平性问题的不同方案. Peng 等人在文献[6]中提出了一种基于图论模型的公平

收稿日期: 2010-02-24; 修回日期: 2011-01-26

基金项目: 国家青年基金(No. 61001080); 第二批博士后特别资助基金(No. 200902528); 国家 973 重点基础研究发展计划(No. 2007CB310600); 国家 863 高技术研究发展计划(No. 2009AA011300); 国家科技重大专项课题(No. 2009ZX03003-002, No. 2009ZX03007-004, No. 2011ZX03005-005)

而有效的频谱分配方案,但是,没有考虑多次用户多主用户的 Ad Hoc 网络中的具体应用场景.

鉴于以上研究中存在的问题,我们在文献[16]中也给出了相应的解决方案.本文在文献[16]的基础上,将工作进一步深化,在距离的基础上,将次用户的业务和传输特征一并考虑,建立一种资源的双向选择机制,从而进一步解决主次用户间的干扰问题,并在非合作次用户间实现公平、无冲突的资源共享.本文的主要工作包括:

(1)建立标识信道可用度的距离树模型,定义距离因子:根据次用户与主用户之间的距离关系以及主用户端对干扰的最大可容忍程度,在主次用户之间建立距离树模型,据此次用户计算检测到的可用信道的信道可用度,在主次用户端形成信道可用度矩阵,计算次用户选择接入信道的距离因子.

(2)定义业务因子:根据次用户的业务和传输特性定义次用户接入信道的业务因子.该因子反映次用户所选信道与次用户业务的匹配程度.

(3)公平驱动效用函数:考虑到非合作次用户间竞争信道资源的公平性,构建公平驱动效用函数,并以此作为实现最佳频谱接入策略的基础.

(4)协议框架的跨层设计:将物理层的感知行为以及应用层的流量统计特性与最佳频谱接入策略联合设计,探讨在确定信息和统计信息背景下的接入方案.

2 系统模型

多主用户多次用户同时存在的自组织网络环境的典型场景模型与文献[16]相同.在该场景中每个主用户 $x_j, j=1, \dots, J$, 占用一个信道 $n_j, j=1, \dots, J$. 任一个次用户 $y_i, i=1, \dots, I$ 是一个无线接入点或者 ad hoc 网络中的一个传输链路. 一个次用户周围同时存在若干个主用户和次用户. 对于主用户 x_j , 存在一个由其最大可允许的干扰功率决定的以主用户 x_j 为圆心, 以 $d_p(x_j, n_j)$ 为半径的保护区域. 对于次用户 y_i , 也同样存在一个由其最大可允许的干扰功率决定的以次用户 y_i 为圆心, 以 $d_s(y_i, n_j)$ 为半径的保护区域. 若次用户 y_i 进入主用户的保护区域则对主用户产生干扰, 另一方面, 如果次用户 y_i 在次用户 y_i 的保护区域内与次用户 y_i 使用同一个信道 n_j , 则会发生冲突, 结果是两个次用户都不能正常使用该信道进行通信. 同时, 当信道 n_j 对两个次用户都可用时, 必须保证两者中的一个公平地接入该信道, 该选择至少保证接入用户有最大的频谱利用率.

3 距离树模型及距离因子

以任一主用户 x 为例, 其周围分布着次用户 $\{y_1, \dots, y_m\}$. 分散在主用户周围的次用户与主用户有

着不同的距离关系. 将离主用户距离相同的次用户放在一个集合内, 集合内的次用户在该主用户信道 n 的使用上具有同等的等级. 由此, m 个次用户被分别放在了 Q 个集合中. 每个子集用一个信道可用度 (AD) 进行标记. AD 的计算如下式

$$AD_{n,q} = \frac{|l_{n,q}|^2}{d_{cl_{n,q}}^2}, q=1, \dots, Q \quad (1)$$

$$l_{n,q} \geq d_p(x, n) + d_s(y, n)$$

其中, $cl_{n,q}$ 为距离树模型中使用信道 n 的具有相同距离的第 q 个次用户子集, $l_{n,q}$ 为使用信道 n 的第 q 个子集中的次用户与主用户间的距离, $d_{cl_{n,q}}$ 为使用信道 n 的第 q 个子集中的次用户数目. 由此, 在每个主用户处建立了以 AD 值标志的次用户子集. 同时, 次用户在感知到主用户的同时, 根据距离信息, 也建立了一个关于其周围各个信道可用度的列表. 由此, 在主次用户的控制平台上, 都能够看到以下一个由距离计算得到的信道可用度的表格.

表 1 AD 值表格

	主用户 x_1 /信道 n_1	...	主用户 x_j /信道 n_j	...	主用户 x_J /信道 n_J
次用户 y_1	$AD_{1,1}$	...	$AD_{j,1}$	...	$AD_{J,1}$
	$d_{1,1}(q_{1,1})$	...	$d_{j,1}(q_{j,1})$	...	$d_{J,1}(q_{J,1})$
...
次用户 y_I	$AD_{1,I}$	...	$AD_{j,I}$	...	$AD_{J,I}$
	$d_{1,I}(q_{1,I})$	...	$d_{j,I}(q_{j,I})$	...	$d_{J,I}(q_{J,I})$

表中, $AD_{j,i}$ 是次用户 i 对信道 j 的可用度数值, $q_{j,i}$ 表明次用户 i 是在第 j 个主用户的第 $q_{j,i}$ 个子集中, $d_{j,i}$ 表明第 $q_{j,i}$ 个子集中的次用户数目. 根据表 1, 次用户可以计算出当前由距离关系决定的接入每一个可用信道的因子, 称为距离因子, 即,

$$\alpha_{j,i} = \epsilon_i \frac{AD_{j,i}}{d_{j,i}}, \epsilon_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^J AD_{j,i}} \quad (2)$$

系数 ϵ_i 是用户 i 的信道可用度归一化因子.

4 业务因子

次用户接入信道的依据, 除了距离外, 还有一个重要的因素就是次用户自身的业务和传输特性与信道的匹配程度. 现有成果大多直接从信道容量角度进行接入策略的优化, 很少考虑用户业务与信道的匹配问题. 而实际的问题是, 通过容量最大化选择的信道分配给次用户, 对次用户的业务而言未必是适合的. 因此, 本文不仅考虑了最大化利用信道, 同时也要使业务在所选择的信道上进行最有效地传输. 为此, 定义次用户的业务因子 $\beta_{j,i}$ 为

$$\beta_{j,i} = \frac{B_j \gamma_i}{B_j \gamma_j} \quad (3)$$

其中, B_i, γ_i 分别表示次用户 i 的业务传输所需要的带宽和信噪比. B_j, γ_j 分别表示信道 j 的所能提供的带宽和信噪比. $\beta_{j,i} \geq 1$ 表明信道条件可以满足次用户业务的传输要求, 否则, 不满足.

5 公平驱动效用函数和接入策略

主用户对信道占用的特性, 将次用户掌握的主用户的先验信息分为确定信息和统计信息两类. 当主用户业务是固定业务时, 其占用信道的时间段和持续时间是确知的、固定的, 此时称信道信息是确定信息. 反之, 如果主用户业务呈统计特性, 其占用信道的时间段和持续时间服从某一统计分布特性, 此时称信道信息是统计信息. 以下, 将讨论在此两种先验信息下的公平驱动效用函数和信道接入策略.

5.1 确定信息

假设主用户对信道的占用是确知的, 主次用户之间的距离以及各自的最大可容忍干扰功率是影响接入决定的主要因素. 对任意一个次用户 y_i 而言, 从有效性和公平性的角度出发, 定义公平性效用函数 U_{y_i}

$$U_{y_i} = \sum_{j=1}^{N_i} \log(a_{j,i} \alpha_{j,i} \beta_{j,i} B_{j,i} \log(1 + \gamma_{j,i})) \quad (4)$$

其中, $B_{j,i}$ 为次用户 y_i 在信道 n_j 上的信道带宽, $\alpha_{j,i}$ 和 $\beta_{j,i}$ 分别为次用户 y_i 的距离因子和业务因子. N_i 是次用户 y_i 的可用信道数目. 系数 $a_{j,i}$ 为次用户 y_i 在信道 n_j 上的接入状态系数, 定义为

$$a_{j,i} = \begin{cases} 1, & \text{接入信道} \\ 0, & \text{没有接入} \end{cases} \quad (5)$$

次用户 y_i 通过对下式吞吐量的优化, 得到最佳的接入信道 n_y^* ,

$$n_y^* = \arg \max_{n \in \{1, \dots, N_i\}} U_{y_i} \quad (6)$$

约束条件为

$$\sum_{j=1}^{N_i} a_{j,i} \leq 1 \quad (7)$$

5.2 统计信息

当主用户业务到达的时间和占用信道的持续时间呈统计特性时, 次用户对信道的接入也应该根据信道空闲的统计特性来决定, 现有状态依赖于所有过去的判决(感知和接入行为)和观察(通知)的信任状态之和. 假设, 主用户对信道的占用服从两状态 $M=2$ 的马尔可夫过程, 状态转移概率 $p_{m,l}$, $m, l=0, 1$. 效用函数根据贝叶斯准则进行迭代更新, 定义为

$$U_{j,i}(t) = \sum_{l=1}^M \sum_{s=0}^1 \left\{ P_r[S_{j,i,l}=s | \Delta_{j,i,l}(t)] \cdot (a_{j,i} \beta_{j,i} B_{j,i} \log(1 + \gamma_{j,i}(t))) \right\} \quad (8)$$

$$\Delta_{j,i,l}(t) = \frac{\sum_{m=1}^M \Delta_{j,i,m}(t-1) p_{m,l} P_r[S_{l,i}=s | \Delta_{j,i,m}(t-1)]}{\sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^M \Delta_{j,i,m}(t-1) p_{m,l} P_r[S_{l,j}=s | \Delta_{j,i,m}(t-1)]} \quad (9)$$

统计信息下的优化过程详见文献[16].

6 接入协议框架

对任意次用户 y , 当有数据传输需求时, 首先对周围可能存在的主用户进行粗检测, 并获得相应主用户返回的 AD 值, 并在主次用户数据控制中心形成 AD 值矩阵, 并根据 AD 矩阵计算距离因子.

同时, 次用户根据自己的业务特征计算在不同可用信道上的业务因子. 根据距离因子和业务因子, 通过优化公平驱动效用函数得到在所选信道中的最佳接入信道. 之后, 次用户向所选信道发出接入请求, 所选信道的主用户基站首先检查该信道是否已经被其它次用户申请, 若没有, 向该次用户发出允许接入消息, 否则, 次用户以 $p_{j,i} = 1/d_{j,i}$ 的概率接入信道.

7 仿真分析

仿真环境与文献[16]相同. 文献[16]已给出的结果表明, AD 值不仅取决于距离, 而且与主用户端最大可容忍干扰功率有关.

图1给出了采用引入距离因子、业务因子后的接入策略与文献[16]结果以及未引入距离树模型时的接入策略时, 次用户间的碰撞概率在不同干扰功率处的比较.

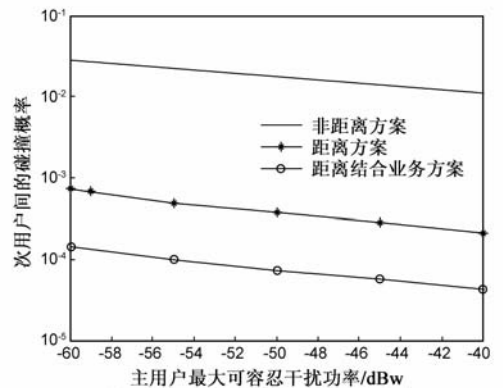


图1 次用户间碰撞概率比较曲线

图中直线标记的曲线是系统仅采用吞吐量效用函数最优化的接入策略时, 次用户间碰撞概率曲线. 星号标注的曲线是系统采用文献[16]的接入方案, 次用户间碰撞概率曲线. 圆圈标注的曲线是系统采用本文的接入方案后, 次用户间碰撞概率曲线. 可以看到, 采用本文方案后, 次用户间的碰撞概率平均又降低8个百分点.

左右,性能得到明显改善.

仿真发现,本文方案在确定信息和统计信息条件下的吞吐量性能与文献[16]的结果基本一致,可见,容量达到最优后的吞吐量基本是一致的.详细结果可以参考文献[16].

8 结论

本文提出了基于距离和业务的 ad hoc 网络中的机会频谱接入协议框架,结果表明该框架及其中的策略是原有工作的深入和改进,在自组织多用户的功率受限网络中实现了对主用户的干扰抑制以及公平有效的资源共享,有效地降低了次用户间的碰撞概率,提高资源利用率.

参考文献

- [1] 韩小博,罗涛. Ad Hoc 认知无线网络中基于博弈论的公共信道建立算法[J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1699 – 1704.
- [2] 吴克军,于全,田艳霞. 一种位置信息辅助的 Ad Hoc 网络按需距离矢量路由协议[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 983 – 988.
- [3] CHEN Y, et al. Distributed spectrum sensing and access in cognitive radio networks with energy constraint[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(2): 783 – 797.
- [4] CHEN Y, et al. 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.
- [5] ZHAO Q, TONG L, et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in Ad hoc networks: A POMDP framework[J]. IEEE JSAC: Special Issue on Adaptive, Spectrum Agile and Cognitive Wireless Networks, 2007, 25(3): 589 – 600.
- [6] PENG C, et al. Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access[J]. Mobile Networks & Applications, 2006, 11(4): 555 – 576.
- [7] ZHENG H, et al. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access[A]. Proceedings of 40th Annual IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. NJ USA: IEEE Press, 2005. 3132 – 3136.
- [8] HUANG X, et al. On max-min fairness and scheduling in wireless ad-hoc networks: analytical framework and implementation [A]. Proceedings of the 2nd ACM International Symposium On Mobile Ad Hoc Networking & Computing[C]. NY USA: ACM Press, 2001. 221 – 231.
- [9] Nandagopal T, et al. Achieving Mac layer fairness in wireless packet networks[A]. Proceedings of the 6th Annual International Conference On Mobile Computing And Networking[C]. NYUSA: ACM Press, 2000. 87 – 98.
- [10] Salonidis T, et al. Distributed on-line schedule adaptation for balanced slot allocation in wireless ad hoc networks[A]. Proceedings of IEEE International Workshop on Quality of Service (IWQoS)[C]. NY, USA: IEEE Press, 2004. 20 – 29.
- [11] Byun Sang-Seon, et al. Statistic spectrum allocation in wireless cognitive sensor networks: Improving fairness and energy efficiency[A]. Proceedings of Vehicular Technology Conference [C]. NY, USA: IEE Press, 2008. 1 – 5.
- [12] Alaya-Feki A, et al. Opportunistic spectrum access: online search of optimality [A]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) [C]. NY, USA: IEEE Press, 2008. 1 – 5.
- [13] HOANG A T, et al. Opportunistic spectrum access for energy-constrained cognitive radios[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1206 – 1211.
- [14] CHANG N B, et al. Optimal competitive algorithms for opportunistic spectrum access[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(7): 1183 – 1192.
- [15] PAWELCZAK P, et al. Quality of service assessment of opportunistic spectrum access: a medium access control approach [J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 15(5): 20 – 29.
- [16] SUN JUN, et al. Opportunistic spectrum access framework for video over Ad Hoc wireless networks[J]. IET Communications, 2010, 4(11): 1269 – 1276.

作者简介



孙 君 女, 1980 年 8 月生, 山东烟台人. 南京邮电大学通信与信息工程学院副研究员, 硕士生导师. 主要研究方向为异构网络融合, 无线资源管理, 动态频谱分配, 频谱感知, 信道估计, 系统性能分析和优化等等.
E-mail: freyjajune@163.com



朱洪波 男, 1956 年 2 月生, 江苏省扬州市人. 教授, 博士生导师. 现任南京邮电大学副校长. 长期从事通信工程、无线通信与电磁兼容, 移动通信与宽带无线技术等主要学术研究方向的教学和科研工作.