

一种基于认知无线电的自组网多信道 MAC 协议*

闵 军^{1,2}, 葛利嘉³

(1.宜宾学院 网络与多媒体管理中心, 四川 宜宾 644000;

2.宜宾学院 计算物理重点实验室, 四川 宜宾 644000;

3.重庆通信学院 三系, 重庆 400035)

摘要: 针对节点具有多个可用信道的自组网的信道资源利用率问题, 提出了一种基于认知无线电的 MAC 接入协议, 协议根据网络中节点的邻居关系, 通过认知推理对两跳邻居范围内的不同网络节点分配不同的驻留信道, 驻留信道的选择考虑了避免信道干扰和冲突, 每个节点只需要两部半双工收发信机就能够实现在多个信道上高效的数据收发。仿真结果表明, 协议在网络总吞吐量、端到端时延等方面具有优良的性能, 能很好地适用于节点密集的应用场合。

关键词: 自组网; 认知无线电; 信道分配; 多信道; MAC 协议

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

A multi-channel MAC protocol for ad-hoc networks based on cognitive radio

MIN Jun^{1,2}, GE Li Jia³

(1. Network and Multimedia Management Center, Yibin University, Yibin 644000, China;

2. Key Laboratory of Computational Physics, Yibin University, Yibin 644000, China;

3. The 3rd Department, Chongqing Communication College, Chongqing 400035, China)

Abstract: Focusing on the spectrum resource utilization, a cognitive radio based on multi-channel MAC protocol for ad-hoc networks with multiple channels available is presented in this paper. The protocol follows a "reasoning" method to assign channels available to mobile hosts dynamically as its resident channel on condition that the channel has not been a resident channel of any other nodes among two-hop network neighborhood, thus protecting mobile hosts against interference and collision resulting from channel sharing among neighborhood. The protocol may leads to efficient data transmission on multiple channels with only two half-duplex transceiver in each node, at the same time with few control messages exchange. By presenting and analyzing simulation results, the protocol is shown to result in good performance in the aspects of packet delivery ratio and average end-to-end delay, which makes it well adaptive to the crowded ad hoc network environment.

Key words: ad hoc networks; cognitive radio; channel assignment; multi-channel; MAC protocol

自组网(Ad-hoc Networks)^[1]是一种移动通信和计算机网络相结合的网络, MAC 协议是其设计、研究的主要技术难点之一, 网络的性能如吞吐量、容量、时延及功耗等性能都依赖于所采用的 MAC 协议。现有自组网对频谱资源的使用所基于的网络频谱资源固定分配假设存

在 2 个缺陷: 未考虑网络周围电磁频谱资源利用对网络容量的影响; 未考虑任意时间任意地点灵活构建的自组网作为临时性网络存在时与周围电磁环境的兼容问题。现有自组网 MAC 技术主要基于 MAC 层的预约和冲突避免, 没有充分考虑底层监测信息的共享, 导致网络开

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(10577007); 重庆市重点自然科学基金项目(CSTC, 2007ba2017); 四川省青年科技基金(03ZQ026-061)

销大且效率不高。如何提高频谱利用率,在各地区和各个时间段里有效地利用不同的空闲频道,成为如何进一步提高和优化网络性能问题的另一个重要技术手段^[2]。

在软件无线电基础上提出的认知无线电 CR(Cognitive Radio)是一种新的智能无线通信技术^[3]。在自组网中采用 CR 技术,通过对网络周围电磁环境感知信息的分析推理,在网络不同覆盖范围和时段有效利用不同的空闲频谱资源。一方面,可有效解决信息流量急剧增加与频谱资源紧张之间的突出矛盾,改善网络容量和传输瓶颈问题;另一方面,可解决自组网在复杂多变电磁环境下系统的干扰问题和频谱管理问题,改善网络电磁环境的兼容问题。在自组网中通过 CR 对网络电磁环境的认知推理和共享利用,能把自适应 MAC 技术推向更高层次的智能化,改善现有自组网中典型的隐藏终端和暴露终端问题^[4]。现有自组网路由技术由于底层 MAC 技术的局限而性能较低,尤其是多径路由。通过共享认知无线电对周围电磁环境感知信息实现底层 MAC 性能的提高,可有效地改善路由开销、多径路由的耦合等问题,大大改善网络的分组传输时延低、时延抖动小等服务质量的性能,满足网络业务量和业务类型不断增长的需要^[5-6]。基于 CR 的自组网终端作为网络中的基本节点,在更高级更复杂的应用中,还应具备对传播条件的自适应功能、多种优良的抗干扰能力以及灵活多变的多址方式、多种业务、多种组网与接口的能力等,从而面临类似于多信道软件无线电的组网问题^[7]。基于 CR 频谱感知的 MAC 接入技术,可以在由不同信道和调制方式构成的多径物理拓扑情况下完成代价最小的低耦合多路径路由集合构建,并结合路由协议解决具有不同传输质量和容量的多信道构成的多条路径间的业务流分配问题^[8-9]。

目前已经有不少关于多信道的 MAC 协议提出,参考文献^[10]在对近 20 种已提出的设计方法进行详细研究的基础上,提出了一种拓扑无关的多信道 MAC 协议。协议采取按需方式对信道进行动态预约,所需要的信道数与网络的拓扑和最大连接度无关,不需要在所有网络节点之间进行时钟同步,每个节点只需要 1 部收发信机进行信道状态监测和数据收发。协议能够很好地支持节点的移动性和适应网络业务流强度的变化,对节点的硬件配置要求很低。但是,该协议对于多信道切换时的耳聋问题没有进行很好的解决,即相邻节点在通信过程中有可能由于侦听着不同信道而无法进行信息交互。耳聋问题在多信道自组网中经常发生,造成拓扑结构的动态变化,进而影响网络性能。

基于上述分析,本文针对自组网多信道 MAC 设计中的耳聋问题和通信冲突问题,在参考文献^[10]协议的基础上对每个节点增加了 1 部收发信机,提出了一种新的多信道 MAC 协议,采用认知无线电设计思想进行设

计,通过认知推理对不同网络节点分配不同的驻留信道,驻留信道的选择考虑了避免信道干扰和冲突,有效提高了网络信道资源利用率。

1 协议描述

1.1 基本假设

假设每个节点已实现频谱感知功能,监测其无线覆盖范围附近的频谱使用情况并识别可用频谱。每个节点配备 2 部半双工收发信机,每部收发信机都是频率敏捷的,可以在所选择的可用信道之间快速切换。

假设在网络初始化时,每个节点可以通过交互控制消息知道其两跳邻居节点的状态信息,1 个节点发出的消息能够被其所有的邻居节点在很短的时间内正确收到。

每个节点选择 1 个信道作为其驻留信道,其他节点可以在任何时候找到该节点并与之通信。假设在节点执行驻留信道选择算法期间,节点的邻居关系及邻居状态不发生改变。节点将 1 个收发信机用于监听驻留信道以接收其他节点发送给它的消息,直到由于主用户的出现或节点移动等原因导致邻居关系发生变化,使得本节点在驻留信道上接收到其他用户的 RTS/CTS 等控制分组,之后通过重启驻留信道选择过程为本节点选择 1 个新的驻留信道。节点将另 1 个收发信机用来发送数据,当节点有数据要发送时,切换到与之通信的节点所在驻留信道上发送数据。

1.2 协议设计思想

基于多信道的自组网 MAC 协议包括信道分配和接入控制,前者负责为通信节点对分配相应的信道,使尽量多的节点可以无冲突地同时通信,后者负责确定节点接入信道的时机、冲突的避免和解决方式。本文协议中,信道分配主要是由各节点通过频谱感知获得可用频谱,在可用频谱中分布式选择驻留信道,并通知其邻居节点;信道接入则是各节点在有数据发送时,将其用于数据发送的收发信机切换到需要进行数据交互的邻居节点的驻留信道上,采用竞争方式占用信道进行数据交互。因此,本协议的设计重点是冲突避免的可用信道选择分配。

网络初始化阶段,各个节点首先通过频谱感知模块获得网络中可用信道集合。如果节点没有收到来自其他节点的驻留信道占用信息,就在可用信道中随机选择 1 个信道作为本节点的驻留信道。收到其他节点驻留信道占用信息的节点,则在节点驻留信道状态表中记录下邻居节点的 ID 号及所在驻留信道,并根据当前两跳邻居节点驻留信道状态表,在剩余的可用信道中尽量选择 1 个与所有两跳内邻居节点驻留信道不同的信道作为本节点的驻留信道。如果节点无法选择到与两跳范围内所有邻居节点驻留信道完全不同的信道,则尽量使得相邻节点不使用同 1 个信道作为驻留信道。完成了驻留信道

选择的节点后,将本节点所在驻留信道及本节点当前所记录的一跳邻居节点驻留信道状态表,通过广播的方式告诉其邻居节点。

可见,本协议的实现主要依据邻居节点的驻留信道状态表,该表的建立及更新通过如下方法实现:对于一跳邻居节点驻留信道状态表和两跳邻居节点驻留信道状态表,每个节点都维护一个邻居节点驻留信道状态表,该表记录两跳范围内邻居节点当前所在的驻留信道,其更新通过邻居节点控制信息交互实现。因此,节点驻留信道状态表包括:邻居节点 ID 号;节点属性为一跳或两跳;节点当前所在驻留信道。

在邻居节点驻留信道状态表的基础上,各节点根据下述分布式方法实现两跳邻居范围内的无冲突驻留信道选择:通过邻居节点驻留信道状态表构造两跳冲突拓扑图 G ,该图顶点集 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$,边集 $E=\{e|e=v_i v_j, |i-j|\leq 2\}$,节点 v_i 对应可选信道集 C_i 。根据两跳冲突拓扑图优化选择各节点驻留信道,使相邻两跳范围内的所有节点不选择相同可用信道作为驻留信道,如果无法实现,则尽量使相邻节点不使用同一个信道。当 $|C_i|=1$ 时,节点 v_i 选定信道。

可见,通过上述方法,网络实现了避免冲突的可用多信道选择分配,该方法具有 3 个特点:

(1) 完全分布式的信道选择在每个节点本地完成,可以克服集中式分配算法情况下网络中信道信息交互引入的附加开销、控制中心瓶颈等诸多缺陷。

(2) 每个节点配备两部半双工收发信机,1 部收发信机驻留在 1 个与邻居节点避免冲突的可用信道上,使得节点可以同时 2 个信道上进行收发工作,大大提高了网络的吞吐量,避免了由于耳聋问题而产生的链路中断。

(3) 节点信道的选择考虑了避免信道干扰和冲突,对于上层协议性能的提高打下了基础,有利于优化提高网络吞吐量。

1.3 多信道分配算法

网络拓扑初始化完成或重启驻留信道选择过程时,信道分配具体算法均如下所述:

步骤 1: 记录拓扑图 G 的初始度序列 $d(v)$ 。

步骤 2: 若 $G=\Phi$, 算法结束; 否则, 从小下标开始, 选择 1 个度最大的节点 v_i :

若 $|C_i|=1$, 则表示 v_i 已选定信道, 转步骤 3;

若 $|C_i|\geq 2$, 在 C_i 中选择 1 个在 v_i 的所有邻节点中总共出现次数最少的 1 个信道 c_k , 则 $o(n^2)C_i=\{c_k\}$, 转步骤 3。

步骤 3: 对于 v_i 的邻节点 v_j , 若 $|C_j|=1$, 则表示 v_j 已选定信道, 转步骤 4;

否则对于 v_i 满足 $|i-j|=1$, 令 $C_j=C_j-C_i\cap C_j$;

对于 v_{i-2} , 若 $|C_i|=|C_{i-1}|=1$, 且 $C_{i-2}=C_i\cup C_{i-1}$, 令 $C_{i-2}=C_i$; 否则 $C_{i-2}=C_{i-2}-(C_i\cup C_{i-1})\cap C_{i-2}$;

对于 v_{i+2} , 若 $|C_i|=|C_{i+1}|=1$, 且 $C_{i+2}=C_i\cup C_{i-1}$, 令 $C_{i+2}=C_i$; 否则 $C_{i+2}=C_{i+2}-(C_i\cup C_{i-1})\cap C_{i+2}$;

$$G=G-\{v_i\}, d(v)=\begin{cases} d(v_j)-1, v v_j \in E \\ d(v_j), v v_j \notin E \end{cases}, \text{转步骤 2};$$

步骤 4: 将选择的信道分配给节点, 结束。

2 性能分析与仿真结果

2.1 性能分析

给出的信道分配方案实现了两跳范围内的无冲突信道优化选择。算法步骤 2 中的选择机制保证了在现有条件下最大限度地避免两跳干扰, 这是因为对于避免两跳干扰的这个目标来说, 左右都受到限制的中间节点可选择性最小, 但是又必须选择, 只好选择 1 个可能造成干扰最小的信道, 这在拓扑图 G 中对应的就是度最大的节点。但步骤 2 中的选择机制并不能完全避免两跳干扰, 这是由于节点的可选信道太少。步骤 3 的分类讨论可以尽量避免单跳干扰。

算法给出的信道选择方法为网络中每个节点分配了 1 个驻留信道, 并通过控制信息交互将其发布给各邻居节点, 从而解决了参考文献[10]中的耳聋问题。该问题的解决是通过增加 1 部收发信机实现的。同时, 每个节点在其驻留信道上实现其他节点的接入控制, 有效地改善了参考文献[10]中控制信道为网络吞吐量性能瓶颈的问题, 等效于通过增加控制信道改善了数据信道的接入效率。

算法实现两跳邻居范围内的无冲突信道选择, 其复杂度为 $o(n^2)$ 。算法中步骤 2 每次选择 1 个节点, 这样至多循环 n 次算法结束, 在每 1 个循环中, 选择度最大的节点至多花费 $o(n)$ 时间, 其他的选择都跟 n 无关, 因此算法的复杂度不超过 $o(n^2)$ 。

2.2 仿真结果

采用仿真工具 OPENET 8.1 对本文提出的多信道 MAC 协议进行性能评估的仿真结果分别如图 1 和图 2 所示。仿真采用参考文献[10]中的方式进行仿真参数的设置: 将 60 个节点随机分布在 $1\ 000\text{ m}\times 1\ 000\text{ m}$ 区域内, 每个节点的通信范围是 250 m , 传播时延为 $1\ \mu\text{s}$, 控制分组长度为 256 bit , 每个节点的分组到达速率为 λ 分组/s, 每个信道都设定为 1 Mb/s 带宽。仿真中对协议性能的评估主要集中在协议对网络吞吐量和端到端时延的影响。在多跳环境中, 配合相应的路由协议, 本文中的 MAC 协议将具有更好的性能表现。

在给定分组长度为 512 B 的情况下, 网络总吞吐量与可用信道数 N 及分组到达速率 λ 的关系如图 1 所示。从图中可以看出, 随着信道数 N 的不断增长, 网络的吞吐量也随之不断地增长, 但本文算法所获得的网络吞吐量性能明显优于参考文献[10]中协议。在可用信道数较少情况下, 2 种算法当分组到达率达到公共控制信道的吞吐量极限时, 会引起较多的控制分组冲突。在可

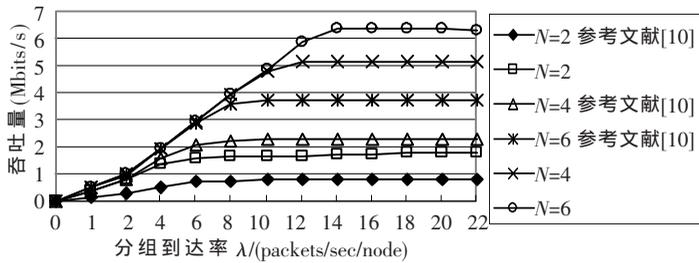


图1 2种算法网络总吞吐量与信道数 N 及分组到达速率 λ 的对比关系

用信道数增加的情况下,本文算法能获得非常大的性能提高。

在分组长度为512 B的情况下,端到端时延特性与信道数的关系如图2所示。从图2中可看出,本文多信道分配方式相比参考文献[10]算法对于网络端到端时延特性有一定的改善作用,且随着信道数的增加,其改善程度与网络吞吐量增加情况具有相类似的变化趋势。

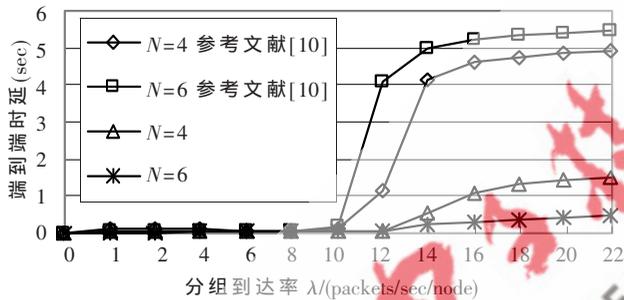


图2 端到端时延特性与信道数的关系

本文采用认知无线电思想从频谱理性占用的角度,对改善自组网的频率资源使用效率问题进行了研究,通过无冲突的分布式信道分配方法,充分发挥通信终端的使用效能,提高自组网网络容量和对服务质量的支持。仿真结果表明,本文提出的多信道MAC协议在网络总吞吐量和端到端时延特性方面都具有良好的性能,使得本协议能够支持更多的数据信道和获得更好的网络总吞吐量和端到端时延性能。

下一步将结合路由协议设计,针对现有分布式网络中的路由开销、多径路由耦合等问题进行进一步的研究。

参考文献

- [1] 郑相全. 无线自组网技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [2] 郑相全. 基于认知无线电的移动自组网关键技术研究[J]. 重庆通信学院学报, 2006, 25(6): 4-7.
- [3] MITOLA III J. Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio[Ph.D]. Doctor Dissertation, Royal Institute of Technology(KTH), Sweden; May, 2000.
- [4] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, et al. Next generation dynamic spectrum access cognitive radio wireless networks: A survey[J]. Computer Networks (Elsevier), 2006(50): 2127-2158.
- [5] FUJII T, SUZUKI Y. Ad-hoc cognitive radio-development to frequency sharing system by using multi-hop network [C]. 2005 First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN, 2005, November 8-11, 2005: 589-592.
- [6] XIN C. A novel layered graph model for topology formation and routing in dynamic spectrum access networks[C]. Proc. 2005 First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2005, November 8-11, 2005: 308-317.
- [7] 郑相全, 郭伟. 软件无线电台自组网技术研究[J]. 电信科学, 2004, 20(2): 13-18.
- [8] RANIWALA A, GOPALAN K, CHIUH T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks [J]. Mobile Computing and Communications Review, 2004, 8(2): 50-65.
- [9] NIE N, COMANICIU C. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks[C]. 2005 First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2005, November 8-11, 2005: 269-278.
- [10] 郑相全, 郭伟, 葛利嘉. 一种新的拓扑无关的按需分配多信道自组网MAC协议[J]. 计算机科学, 2005, 32(5): 34-40.

(收稿日期: 2009-04-08)