

# 认知无线 Mesh 网络联合多路径路由和信道分配策略

顾金媛<sup>1</sup> 章国安<sup>1,2</sup> 包志华<sup>1</sup>

(南通大学电子信息学院 南通 226019)<sup>1</sup> (东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)<sup>2</sup>

**摘要** 从路径交叉的角度为认知无线 Mesh 网络提出一种新的联合多路径路由和信道分配策略,该策略结合按需路由的基本流程,同时根据所选路径情况设置交叉节点的中继功能,以主用户曾经占用每个信道的最少次数作为衡量标准来选择信道,并给出了一种解决信道冲突的方案。仿真结果表明,所提策略与基于链接、基于干扰的策略相比,能够显著改善平均吞吐量和时延等网络参数性能。

**关键词** 多路径路由,交叉节点,信道分配,认知无线 Mesh 网络

中图分类号 TN92 文献标识码 A

## Joint Multi-path Routing and Channel Assignment Strategy for Cognitive Wireless Mesh Networks

GU Jin-yuan<sup>1</sup> ZHANG Guo-an<sup>1,2</sup> BAO Zhi-hua<sup>1</sup>

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)<sup>1</sup>

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In this paper, a novel joint multi-path routing and channel assignment strategy based on path crossing for the cognitive wireless mesh networks was proposed. The strategy combines the basic processes of on-demand routing, and sets up the relay function of cross-nodes according to the chosen routes, then selects the channel based on the minimum number of channels occupied by the primary users, and finally gives a solution to channel conflict. Simulation results show that, compared with the link-based and interference-based strategy, the new strategy has an obvious advantage in the performance of delay and throughput.

**Keywords** Multi-path routing, Cross-nodes, Channel assignment, Cognitive wireless mesh networks

## 1 引言

随着无线和移动通信的蓬勃发展,有限的开放频谱已经无法满足不断增长的需求,而研究表明现有专用频谱中有相当一部分并未得到充分利用。认知无线电(CR)能有效地解决上述频谱分配不均的问题<sup>[1,2]</sup>。CR是一种智能无线通信系统,它能在不影响其它授权用户即主用户(Primary Users, PUs)的前提下智能地利用大量空闲频谱实现在任何时间任何地点的高可靠通信<sup>[3]</sup>。认知无线 Mesh 网络(Cognitive Wireless Mesh Networks, CogWMN)是一种特殊的 WMN,对每个 Mesh 节点使用 CR 技术。对于一个配备 CR 模块的 Mesh 节点,它能够感知主系统中未使用的频谱,并动态地接入到这些频谱中。由于网络节点可用频谱的不同,增加了网络路由的不稳定性以及信道分配的复杂性。信道分配旨在尽可能地最小化整个网络的干扰以及最大化整个网络的吞吐量。研究者已经证明在此种网络中的联合优化路由和信道分配问题是一个 NP 难题<sup>[4]</sup>。

近年来,研究者已针对多信道无线网络提出了多种多路径路由和信道分配策略。文献[5]给出了一种联合多路径路

由和信道分配策略的跨层体系结构,该体系结构主要由三大模块组成:路由发现、信道分配、负载平衡。在路由建立阶段,发现多节点不相交路径同时执行信道分配,这样,在相同干扰域内不同路径上的节点可以在不同的信道上进行传输。所提出的负载平衡方案,允许在节点和信道都不相交的可用路径之中分布流量。文献[6]中提出了路径分段策略,源节点以跳数为参数,将网络中整个路由分割为多个较短的本地段,每个本地段负责对源节点或者上游段的数据包进行缓存、发送本地应答以及转发。这种机制能够有效地解决节点移动所带来的系统吞吐量下降问题,但是其简单地按照跳数分段的方法并不能够适应网络当前的链路状态。文献[7]仅仅以网络中端到端路径的累积时延作为衡量多跳路径优劣的标准。此外,在 CogWMN 环境下,即使寻找到一条最优的路径传输业务数据流,也仍然会因避让主用户使用授权信道而暂时中断业务流的传输,导致数据流延时。利用多路径传输,即使其中一条路径破坏,其他路径节点也可以继续传输数据包,减少数据包延时,保障服务质量。文献[8]指出相比无认知环境的网络,在认知环境下,网络性能可以得到大幅度改善,如多路径传输的时延、平均丢包率、平均队列时间均有所下降。目前 CR

到稿日期:2010-06-28 返修日期:2010-09-27 本文受国家自然科学基金项目(60872002,50875132),江苏省高校自然科学重大基础研究项目 07KJA51007,东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(W200912),江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX09S\_021Z),南通市科技计划项目(AA2007025),南通大学研究生科技创新计划项目(YKC09046)资助。

顾金媛(1986-),女,硕士生,主要研究方向为认知无线 Mesh 网络;章国安(1965-),男,博士,教授,主要研究方向为无线网络、认知无线 Mesh 网络等,E-mail:gzhang@ntu.edu.cn(通讯作者);包志华(1955-),男,教授,主要研究方向为认知无线电、超宽带通信技术。

网络中信道分配方案一般采用基于链接的方法<sup>[9-11]</sup>。但是,基于链接的方法也有其局限性,会使 CR 网络的整体性能下降。

在 CogWMN 中,由于频谱分布不均匀,各节点的频谱接入机会集合各不相同,且动态变化,为了确定 CogWMN 中下一跳节点以及与之通信的频段,多跳 CogWMN 的路由必须和频谱分配紧密结合在一起<sup>[12]</sup>。因此本文提出一种新的联合多路径路由和信道分配策略(Joint Multi-Path Routing and Channel Assignment, JMPRCA),该策略结合按需路由的基本流程,同时根据所选择的路径情况设置交叉节点的中继功能,以主用户曾经占用这个信道的最少次数作为衡量标准选择信道,最后还给出了一种解决信道冲突的方案。它能够有效避免基于链接的信道分配的应用局限性,同时又遵守机会主义频谱共享接入规则,能够大大提高网络性能。

## 2 联合多路径路由和信道分配策略

### 2.1 多无线电多路径路由策略

多无线电多路径(Multiple Radio Multiple Path, MRMP)路由策略能够克服单无线电单路径中的信道竞争和冲突问题,其考虑到路径数的增多,因此可以使网络端到端的吞吐量得到有效提高。MRMP 路由由协议可以适当地分裂数据流,传输中使用的无线电接口数充足,并通过 MAC 协议得到有效的分配。例如,假设存在 2 个时隙,2 条路径。其中,在时隙 1 中,一个节点沿着路径 1 在信道上传输数据包给下一跳节点,同时,在路径 2 上的另一个节点也能够信道上传输数据包给其下一跳节点。在时隙 2 中,所有节点仍然可以使用一个无线电接口从前面的节点接收数据包,同时使用另一个无线电接口将其转发到下一节点。因此,在 MRMP 下,相对于单路径情况,网络数据速率能够提高多倍,也就是端到端吞吐量可以提升接近多倍。

### 2.2 联合多路径路由与信道分配策略

#### A 路由发现

本文提出的路由策略基于 AODV 的基本流程,当且仅当有数据要发送且无有效路由时,认知 Mesh 源节点通过广播路由请求(RREQ)包来启动路由发现过程。目的节点将会通过相反的路径向源节点发出路由回复(RREP)消息。RREQ 携带了源节点端到目的节点的每个节点的可用信道列表(Available Channel List, ACL)信息,而 RREP 消息中除了携带每个节点的 ACL 信息,还记录了每个节点的已分配信道信息。

本文提出的 CogWMN 按需路由的主要过程如下:在路由发现阶段,源节点将自身的 ACL 信息通过 RREQ 广播出去;中间节点也将自身的 ACL 加入 RREQ 中的“ACL 链表”。接收到 RREQ 的节点比较“ACL 链表”与自身的 ACL,当且仅当存在交集时才继续转发 RREQ。这样能确保 RREQ 沿着空间和信道切换时都有可用的路径到达目的节点。具体的 RREQ 程序流程图见图 1。

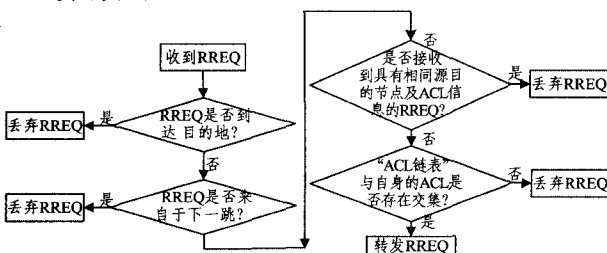


图1 RREQ 程序流程图

#### B 多路径“交叉点”设置策略

对于多跳 CogWMN 中多路径工作场景,当某个节点在传输数据包过程中出现丢包现象时,产生端到端时延的主要原因之一是源节点需要等待足够长的时间才能够开始重传丢弃的数据包,而这段等待时间与源节点、该节点以及目的节点之间的距离有关。由于端到端路径由多个链路组成,无论数据包在任何链路上出现丢弃,重传过程开始之前都需要等待大量时间确认数据包丢失。

为了能够有效减少等待时间,本文指定网络中的数据流交叉点负责保存所发送的数据包并且对接收的数据包进行回复,从而将端到端路径分解为多个较短路径,以减少确认数据包丢失的等待时间,降低分组的端到端延迟。若当前所选择的路径为两条节点和链路都分离的路径,则不存在交叉节点;否则,根据所建立的多径路由情况,网络中将存在多个交叉节点,具体原理可以通过图 2 来说明。

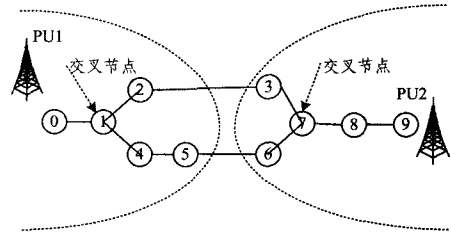


图2 多路径中存在“交叉点”的网络模型

在图 2 中,存在两个主用户,源节点 0 建立路由到目的节点 9,其中在交叉节点 1 到交叉节点 7 之间存在两条路径。这两个交叉节点负责对数据包进行缓存、本地回复以及转发。例如节点 5 在传输数据包过程中出现丢包现象,那么需要数据包的重传。此时由于交叉节点 1 存储了先前丢弃的数据包的信息,重传过程就可以从节点 1 开始,而不需要从源节点 0 处开始,从而缩短了分组的端到端延迟。这种方式能够有效地保证数据包的可靠传输,同时避免单个节点计算、处理过于复杂的情况。

#### C 路由回复与信道分配

本文的信道分配在路由回复阶段进行。在 CogWMN 中,由于主、次用户一直互相存在,并且主用户对所接入的信道有唯一的优先权,因此次用户在机会主义地使用主用户当前未占用的信道时,可以先对主用户当前未占用的每个信道做使用频繁次数统计,即主用户曾经占用这个信道的频繁次数。

假设主用户占用过的信道集合用  $S_{PU}$  表示,因为每个节点  $i$  在 RREQ 阶段都已获知自身  $ACL_i$ ,那么,节点  $i$  感知到的信道  $c$  使用频繁次数统计可以表示为:

$$CU_i(c) = \sum W_i(c, ACL_i, S_{PU}) \quad (1)$$

式中,

$$W_i(c, ACL_i, S_{PU}) = \begin{cases} 1, & \text{如果 } c \in ACL_i \& c \in S_{PU} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

然后再从这些信道中选择占用频繁次数最少的一个作为当前操作信道:

$$C_{selected} = \operatorname{argmin}_{c \in ACL_i} CU_i(c) \quad (3)$$

由于主用户占用该信道频繁次数越少,次用户接入到这个信道的机会就越大,因此主用户的频谱切换而导致的次用户信道切换次数也就越少,这样,可以大大减少信道冲突,提升网络性能。

在路由回复阶段,目的节点根据收到的 RREQ 中沿途节

点的 ACL 集合分布情况率先分配信道,然后将所选择信道封装在 RREP 消息中发往源节点。中间节点按照信道分配策略依次进行信道分配,同时更新路由表进行转发,直到源节点接收到 RREP。

#### D 信道冲突

信道分配过程中发生信道冲突的情况之一是:当发送节点所选择的信道对于接收节点来说不是最佳选择时。这种情况发生在接收节点发现另一个信道比所选择的信道具有更小的索引时。发生这种信道冲突的概率一般是比较低的。本文假设干扰距离  $R_i = qR_r$  ( $q=2$ ) (其中  $R_r$  表示两个节点间的传输距离),当使用 RTS/CTS 通信模式时,两跳内的链接会发生彼此干扰。图 3 中,节点 A 建立路由到节点 G,当节点 B 选择一个信道给节点 C 时,只有在干扰区域内(图 3 中阴影区域所示)的节点才能够影响其决定。这里节点 C 根据 2 跳信息在它的信道使用表中选择一个更加合适的信道,这完全覆盖了节点 B 的干扰范围。因此,节点 C 所选择的信道对于这两个节点来说更加合适。

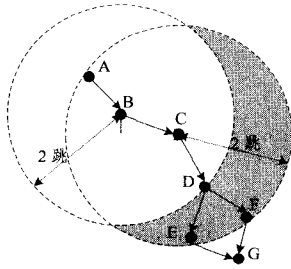


图 3 发生信道冲突

### 3 性能评估

#### 3.1 仿真环境

本文假设以下场景:一个认知无线 Mesh 网络由两个主用户和 WMN 网络组成。WMN 由一个因特网网关(IGW)和一定数量的通过多跳路径连接到 IGW 的 mesh 路由器(MRs)组成。所有的节点都是静态的。本文使用两个评估参数:平均吞吐量和端到端的平均时延。具体的网络环境如表 1 所列。所有结果都是 50 次仿真求平均的结果。

表 1 仿真参数表

范围	1000m×1000m
节点数量	1 个 IGW, 200 个 MRs
节点覆盖范围	100m
UDP 数据流数	6
信道容量	1Mbps
信道切换时延	100us
路由协议	改进的 AODV

仿真中引入两种典型策略进行对比:一种是基于干扰的信道分配策略,另一种是基于链接的信道分配策略。

#### 3.2 仿真结果与性能分析

图 4 为 CogWMN 应用 JMPRCA 算法与基于干扰和基于链接算法时的平均吞吐量性能对比。图 5 为 CogWMN 应用 3 种算法的平均端到端时延对比。从图 4、图 5 可以看出,本文提出的算法在网络平均吞吐量、时延方面明显优于基于干扰、基于链接的信道分配算法。在基于干扰的算法中,仅仅考虑了干扰问题。在基于链接的方法中,节点总是从可用信道中随机地选择一个信道作为自己的操作信道。而在新算法

中,根据所选择的路径情况设置交叉节点的中继功能,以主用户曾经占用这个信道的最少次数作为选择信道的衡量标准,并对网络中有可能发生的信道冲突给出了解决方案,因而能够增加网络的吞吐量,减少网络平均端到端时延。

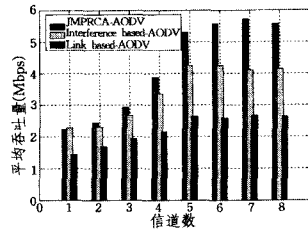


图 4 3 种算法平均吞吐量对比

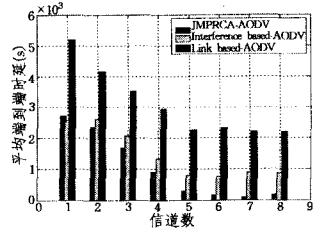


图 5 3 种算法平均端到端时延对比

图 6、图 7 分别是对所提出的 JMPRCA 策略在不同路径数下的平均吞吐量、平均端到端时延性能进行的仿真。可以看出,多路径情况下的平均吞吐量明显优于单路径情况,在多跳 CogWMN 中,更换路径的主要原因是主用户回到主信道上,因可用信道变化使拓扑结构改变,或者网络拥塞等,导致次用户的传输路径不可用。虽然在信道数比较少的情况下,使用 6 条路径时延较大,但随着信道数的逐渐增加,平均端到端时延明显减小,与单路径的时延差也明显减少。

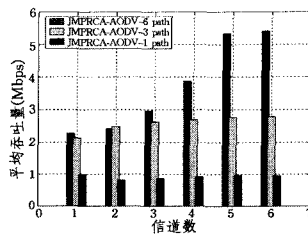


图 6 不同路径数下的平均吞吐

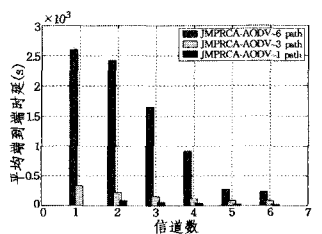


图 7 不同路径数下的平均端到端时延对比

#### 结束语

认知无线 Mesh 网络中的主用户可以自主切换信道,从而对网络拓扑结构以及路由产生影响。本文针对上述问题提出了一种新的联合多路径路由和信道分配方案,该方案结合 AODV 的基本流程,同时对所选路径中的交叉节点赋予中继功能,能够有效降低分组的端到端延迟,然后次用户从主用户曾经占用的这些信道中选择占用频繁次数最少的一个作为当前操作信道,最后给出一种解决信道冲突的方案。仿真结果显示,相较于基于干扰、基于链接的信道分配算法,本文所提出的算法能使整个网络具有更高的平均吞吐量以及更小的时延特性。

#### 参考文献

- [1] Yang Xiao-niu. Software radio, cognitive radio and ultimate radio—A prospect of wireless communication [J]. Journal of CAEIT, 2008, 3(1): 1-7
- [2] 章国安, 顾金媛, 曹磊. 认知无线 Mesh 网络中基于干扰模型的信道分配策略[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1914-1917
- [3] Thomas R W, DaSilva L A, MacKenzie A B. Cognitive Networks [C]//Proceedings of IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, USA: IEEE, 2005: 352-360
- [4] Raniwala A, Gopalan K, Chiu T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh

networks [C]//Proc. of ACM Mobile Computing and Communications Review(MCCR). Canada,2004;50-65

[5] Bononi L, Di Felice M, Molinaro A, et al. Joint Channel Assignment and Multi-Path Routing for Multi-Radio Wireless Mesh Networks [C]//Proc. of 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Montreal, June 2009;476-481

[6] Kopparty S, Krishnamurthy S V, Faloutsos M, et al. Split TCP for mobile Ad hoc networks [C]//Proc. IEEE GLOBECOM. Taipei, Taiwan, Nov. 2002, 1;138-142

[7] 程庚, 李响照, 刘威, 等. 认知无线网络路由及频谱分配联合策略研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(3): 695-698

[8] Javadi F, Jamalipour A. Multi-Path Routing for a Cognitive Wireless Mesh Network[C]//Radio and Wireless Symposium.

New Orleans, LA, USA, Jan. 2009; 232-235

[9] Brik V, Rozner E, Banarjee S, et al. DSAP: a protocol for coordinated spectrum access [C] // Proc. of IEEE DySPAN. USA, 2005;611-614

[10] Cao L, Zheng H. Distributed spectrum allocation via local bargaining[C]//Proc. of the Second Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. China, 2005; 475-486

[11] Zhao J, Zheng H, Yang G. Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks [C] // Proc. of IEEE DySPAN. USA, 2005;259-268

[12] Gong Michelle X, Midkiff Scott F, Mao Shiwen. Design principles for distributed channel assignment in wireless Ad hoc networks[C]//Proc. of IEEE ICC. Seoul, 2005; 3401-3406

(上接第 23 页)

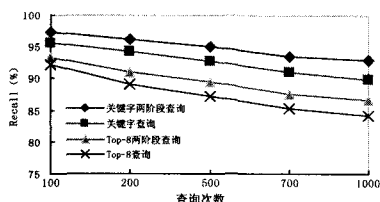


图 5 查全率对比

除了查询响应时间和查全率之外,我们还通过实验得到了  $\alpha$  的最佳取值。依据式(1),  $\alpha$  越小,表明二级查询所占比重越大,因而相似性查询得到的查询结果数目就越多,这些结果与给定查询请求相关的可能性就越大,所以带来查全率的提升;但是如果  $\alpha$  太小,会导致一级查询对相关度的影响小于二级相似性查询,造成查询结果集中中相似性结果增多,影响了查询相关度的判断。表 1 反映了  $\alpha$  的取值对查全率的影响。实验结果表明,当  $\alpha$  小于 0.75 或者大于 0.9 时,两阶段查询的查全率显著下降。本文选择 0.9 作为最优的  $\alpha$  值,用于计算加权相关度。前面的实验结果均在  $\alpha=0.9$  的实验条件下得出。

表 1  $\alpha$  参数对两阶段查全率的影响

$\alpha$ 参数大小	Top-8 两阶段查询	关键字两阶段查询
0.50	78.4%	82.3%
0.75	88.1%	90.5%
0.90	93.6%	96.4%
0.95	90.7%	92.2%

**结束语** 本文在描述内容感知存储系统整体架构的基础上,针对存储系统自身的特点,提出了两阶段检索策略。本策略将上层语义检索与底层块相似性检索结合起来,通过两者相关度的加权平均来对最终的查询结果排序。由于同时考虑了各类相关性,查询的结果集合可以最大程度地满足查全率的要求。最终的实验结果表明,在带来少量查询开销的前提下,本策略减少了各类失效问题的发生,使查全率有了较大提升。

### 参考文献

[1] Blanco R, Barreiro A. Probabilistic static pruning of inverted files[J]. ACM Transactions on Information Systems, 2010, 28(1);1-33

[2] Mitra S, Winslett M, Hsu W W. Query-based partitioning of documents and indexes for information lifecycle management [C]//Proceedings of ACM SIGMOD on Management of Data. 2008;623-636

[3] Hua Yu, Jiang Hong, Zhu Yifeng, et al. SmartStore: a new metadata organization paradigm with semantic-awareness for next-generation file systems [C]//Proceedings of the Conference on High Performance Computing Networking, Storage and Analysis. 2009;1-12

[4] Leung A, Miller E L. Scalable Full-text Search for Petascale File Systems[C]// Proceedings of the 2008 Petascale Data Storage Workshop. 2008

[5] Raghuvver A, Jindal M, et al. Towards efficient search on unstructured data: an intelligent-storage approach [C] // Proceedings of the Sixteenth ACM Conference on CIKM. 2007;951-954

[6] Factor M, Dalit Naor, Simona R, et al. Preservation DataStores: new storage paradigm for preservation environments[C]//Proceedings of IEEE Conference on MSST. 2008;3-15

[7] You L L, Pollack K T, Long D D E. Deep Store: An archival storage system architecture[C]//21st International Conference on Data Engineering. 2005; 804-815

[8] Leung A W, Shao Minglong, Bisson T, et al. Spyglass: fast, scalable metadata search for large-scale storage systems[C] // Proceedings of the 7th conference on FAST. 2009;153-166

[9] Lester N, Zobel J, Williams H E. In-place versus re-build versus re-merge: Index maintenance strategies for text retrieval systems [C]//Proc. of the Australasian Computer Science Conference. 2004;15-22

[10] Zhou Jingli, Liu Ke, Qin Leihua, et al. Block-Ranking: Content similarity retrieval based on data partition in network storage environment [J]. International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 2010, 4(3): 85-94

[11] Saito T L, Morishita S. Relational-style XML query [C]//Proceedings of ACM SIGMOD on Management of data. 2008; 303-314

[12] Trec[EB/OL]. <http://trec.nist.gov>. 2009

[13] 郭瑞杰, 程学旗, 许洪波, 等. FirteX—高性能全文索引和检索平台[C]//内容计算的研究与应用前沿, 第九届全国计算语言学学术会议论文集. 2007

[14] Lucene[EB/OL]. <http://lucene.apache.org>, 2009