

一种基于主从机制的认知 Ad Hoc 网络可靠路由方法

赵 倩¹ 冯光升² 郑 晨²

(哈尔滨商业大学计算机与信息工程学院 哈尔滨 150028)¹

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)²

摘 要 为了解决认知 Ad Hoc 网络中节点和链接失效问题,提出一种基于主从机制的认知 Ad Hoc 网络可靠路由构造方法 MSMRC。该协议考虑了网络中主用户活动规律,引入链路可靠时长和信道可靠时长的度量来设计主路由和备份路由。当现有路由失效时,通过预先构造的备份路由快速恢复认知用户之间的通信。实验表明,MSMRC 协议能够显著降低平均路由开销,而且可以提高网络的数据包投递率和链路修复率,保证了网络端到端通信的服务质量。

关键词 认知 Ad Hoc 网络,可靠通信,路由模型

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Master and Slave Mechanism Based Route for Reliable Communications in Cognitive Radio Ad Hoc Networks

ZHAO Qian¹ FENG Guang-sheng² ZHENG Chen²

(School of Computer and Information Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)¹

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)²

Abstract To solve the node and link failures in cognitive radio Ad Hoc networks, a novel master and slave mechanism based route, named MSMRC, for reliable communication between cognitive users was presented in this paper. The route takes the primary user activity patterns into account, and both the link reliable time and channel reliable time are also introduced to design this routing mechanism. When some routes fail, the existing communications between the cognitive users can be restored quickly through pre-configured slave routes. Experiments show that the proposed MSMRC method can significantly reduce the average overhead, and improve the packet delivery ratio and link repair rate, ensuring the quality of the network end to end communication services.

Keywords Cognitive radio Ad Hoc networks, Dependable communication, Routing model

1 引言

随着无线网络技术和终端设备的快速发展,已分配的频谱资源的利用效率不高已经成为业界的共识。人们对于通信服务的高要求和高标准与频谱资源的日益匮乏产生矛盾^[1]。认知网络的提出为解决这一问题提供了可行的方案。在认知网络中,认知用户或次用户(Secondary User, SU)在不干扰主用户(Primary User, PU)通信的前提下,可通过频谱感知技术机会式地使用空闲授权信道与其它认知用户进行通信^[2]。由于主用户随时可能访问授权信道,认知用户间必须立即释放所占用的授权信道以保障主用户的通信,而认知用户的通信则中断。在保障主用户通信的前提下,如何提供认知用户的路由能力,保障端到端的服务质量是近来研究的热点和难点问题。

认知 Ad Hoc 网络(Cognitive Radio Ad Hoc Networks, CRAHNs)技术为增强认知用户的路由能力提供了一种保障手段^[3],CRAHNs 是一种将认知无线电和 Ad Hoc 网络进行有效集成的分布式网络技术,没有任何基础网络设施支撑,认

知用户之间通过 Ad Hoc 连接,使用授权和非授权频段以多跳的路由方式与其它认知用户进行通信。每个认知用户需要根据局部观察独立决策自身的选路行为。由于认知用户无法根据局部的观察结果来预测选路行为对全局网络的影响,因此需要认知用户间以合作的方式来综合评判。局部观察信息可在认知用户间进行交互,从而扩大到整个网络范围。即便如此,在每一跳信道选择上,也很难保障与主用户的行为无冲突,因此也就无从保障认知用户的通信连续性。

避开与主用户的冲突域或冲突信道是常用的提高路由可靠性的典型方法^[3-5]。文献[3]提出一种基于频谱感知技术的 SEARCH 路由协议,该协议将路由和信道选择联合考虑来避开主用户活动可能引起的冲突域,在路由协议的运行过程中及时调整新发现和被占用的频谱机会,并根据 Kalman 滤波来预测分布式环境下的节点移动性。SEARCH 的目标是最小化路由跳数。文献[4]设计了两种路由机制,一种用来确保主用户无冲突地进行通信;另一种提前避免主用户之间的冲突。文献[6]提出了适用于移动 CRAHNs 环境的混合拓扑多播路由方案 HyTopCast。该方案利用可用信道列表和信道

本文受国家自然科学基金资助项目(61402138),黑龙江省自然科学基金项目(E201452, F2014026),黑龙江省高校青年学术骨干项目(1254G030),哈尔滨商业大学博士科研启动项目(92508762)资助。

赵 倩(1980—),女,博士,讲师,主要研究方向为 Ad hoc 网络、无线网络可信性, E-mail: zhaoqian@hrbeu.edu.cn;冯光升(1980—),男,博士,讲师,主要研究方向为认知网络、信息安全;郑 晨(1988—),女,硕士生,主要研究方向为认知网络。

状态信息来构造稳定的多播树,以及基于 mesh 拓扑的多播路由恢复方案。文献[7]提出了一个基于强化学习的路由方案 CRQ,该方案基于频谱感知,在考虑信道可用性、信道质量、干扰行为等具有不可预测性和动态性特征的基础上,寻找最小代价路由。文献[8]考虑到多跳认知网络中移动性将导致连续的数据丢失和服务中断,且由于主用户或者认知用户的移动性,认知用户间的多跳通信需要及时调整以避免对主用户的通信干扰,据此提出了基于移动感知的认知路由 MCR,该方案首先通过检测每个节点违反冲突域的危险等级,然后基于 Markov 预测手段来选择最为可靠的路径,最后进行数据交付。文献[9]对 CRAHNs 的路由协议研究情况进行了总结分析,指出了 CRAHNs 所面临的路由挑战。

然而,在现有的路由机制中,CRAHNs 的认知用户的路由与主用户的通信冲突是不可完全避免的。因此,本文通过充分考虑主用户的活动规律,引入链路可靠时长和信道可靠时长来衡量通信的可持续性,进而设计了一种基于主从机制的路由方法来保障认知用户的端到端通信能力。本文的重点是主路由和备份路由的构建,而信道感知、信道切换属于另外一项研究内容,在本文中不予讨论。

2 模型建立

经典的 CRAHNs 场景如图 1 所示。

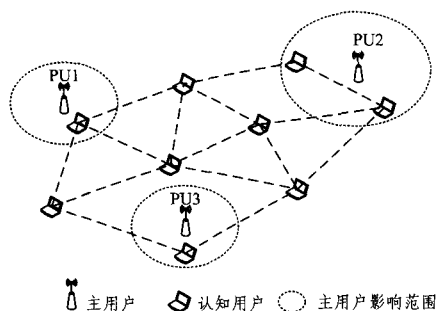


图1 经典 CRAHNs 场景

其中,主用户和认知用户共存于同一个区域中,两个认知用户之间的通信是通过其它认知用户作为中继、以多跳方式完成。采用典型的“ON-OFF”机制来表示主用户的活动,“ON”状态表示授权信道正在被主用户使用,“OFF”状态授权信道未被主用户使用。该模型中,假设 K 表示授权信道的集合, $T_{ON}^{(k)}$ ($k \in K$) 表示主用户使用信道的持续时长,服从参数为 λ_k 的指数分布。同理, $T_{OFF}^{(k)}$ 表示主用户未使用授权信道,服从参数为 μ_k 的指数分布。因此,“ON”和“OFF”状态持续时间的期望值分别为 $1/\lambda_k$ 和 $1/\mu_k$ 。

2.1 多径路由机制

本文提出一种基于备份的多径路由机制,也就是从路由机制。当没有链路和节点失效时,采用多径路由中的主路由进行通信,而当节点或者链路发生失效时,则采用备份路径进行通信。如果认知用户的通信过程发生中断,如何快速切换到备份路径是本文的重点内容。根据 Ad Hoc 网络的按需路由形成机制,一旦路由请求 RREQ(Route Request)分组到达目的节点,则可得到所有路径。通信的连续性是影响认知用户端到端通信的主要因素,因此,本文将路由可靠时长(Route Reliable Time, RRT)作为衡量主路径和备份路径的主要指标。认知用户通过两两信息交互可获得全网主用户的活动规律,对源节点来说,也就是能够获得从源节点到目的节点所有

路径的 RRT 期望值。因此,可将期望值 RRT 最大的路径作为主路径,而其它路径作为备份路径。例如,在从源节点 R_s 到目的节点 R_d 的路径发现中,获得 n 条路径,用 $R_1, R_2, \dots, R_n$ 表示,用集合 C 表示路径 R_i 上的所有授权信道,则 $C_j \in C$ 代表 C_i 的第 j 个授权信道。因此,路径 R_i 的 RRT 可计算如下:

$$RRT_i = \sum_{C_j \in C} 1/\mu_{C_j}$$

据此,可计算出每个路径的 RRT 值,选取具有最大 RRT 值的路径作为主路径。

这两种路径均存在于源节点中。为了保障备份路径的产生,本文采用混合式的路径发现机制,在路由发现过程中,对以下 3 类路径均作为可用路径予以保存:

(1)链路和节点都不相交的多径路由。这种情况中,多径路由除了源节点和目的节点,任意普通节点都不会发生相交,如图 2 中的 SBED、SACD 路径。

(2)链路不相交的多径路由。这种情况中,多径路由没有相交的链路,但可能有相交的节点。如图 2 中的 SACD 和 SBCED 路径。不相交的多径路由容错性好,但不易寻找。

(3)链路相交的多径路由。这种情况中,多径路由既可以存在相交的路径,也可以存在相交的节点,如图 2 的 SACD 和 SBACED 路径。与其它两种多径路由进行比较,这种路由容易寻找,但容错能力较差。

基于各种多径路由的特点,采用 3 种路由混合的多径路由方式,不但可以扩大路径搜寻范围,同时能保证备份路径的产生。

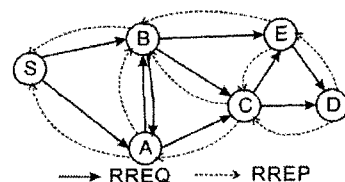


图2 多径路由分类举例

2.2 备份路由计算方法

在数据传输的过程中,备份路由可能随时间发生变化,因此不易采用与主路径相同的估计方法。本文在计算备份路径时,兼顾了信道的时变性特征,估计结果更为接近实际情况。由于授权信道未被主用户占用的情况服从参数为 μ_k 的指数分布,因此信道可被认知用户有机会使用的持续时间的期望值为 $1/\mu_k$ 。考虑到信道的时变性特征,信道可靠时长(Channel Reliable Time, CRT)的表示如式(1)所示:

$$CRT_j^{(k)} = 1/\mu_k + D_{CRT}(t) \quad (1)$$

其中, $CRT_j^{(k)}$ 表示第 j 个链路的第 k 个可用信道的可靠时长, $D_{CRT}(t)$ 表示到当前 t 时刻信道可用时间的波动情况,可根据统计方差来计算。在初始情况下,可令这种统计方差为零,而随着迭代次数的增长, $D_{CRT}(t)$ 将不断发生变化,并以此来修正 $CRT_j^{(k)}$ 值。基于到达的 RREQ 数据包可以计算出链路的可靠时长(Link Reliable Time, LRT),同时可确定主路径。第 j 个链路的 LRT 的计算方法如式(2)所示:

$$LRT_j = \frac{1}{num_j} \cdot \sum_{0 < k \leq num_j} CRT_j^{(k)} \quad (2)$$

其中, num_j 表示第 j 个链路的有效信道总数。假设主路径失效,则需要根据主路径和其它路径的相关性,寻找一条备用路径,以保证通信的正常进行。 n_i 表示路径 i 与主路径之间的节点相交程度。其计算方法如式(3)所示:

$$n_i = 1 - \frac{N_c^{(i)}}{N_p} \quad (3)$$

其中, $N_c^{(i)}$ 表示路径 i 与主路径相交的节点个数, N_p 表示主路径中的节点个数。同理可用 l_i 表示路径 i 和主路径的链路相交程度, 其计算方法如式(4)所示:

$$l_i = 1 - \frac{L_c^{(i)}}{L_p} \quad (4)$$

其中, $L_c^{(i)}$ 表示路径 i 与主路径的相交链路数, L_p 表示主路径的链路总数, 如从源节点到目标节点的主路径的总跳数。从所有可能的路径中选择一条备用路径时, 需要根据模型中的混合路径机制进行, 同时要考虑 n_i 和 l_i , 如式(5)所示:

$$\alpha_i = \phi \cdot n_i + (1 - \phi) \cdot l_i, 0 \leq \phi \leq 1 \quad (5)$$

其中, α_i 是路径 i 和主路径的不相交程度, ϕ 是网络环境的权重参数, 用于调节网络中节点失效与链路失效的比重, 如果节点经常失效, 权重 ϕ 可以取得相对较大一些, 否则, ϕ 值可以设置得较小一些。备份路径中应将 RRT 考虑在内, 设计参数 β , 计算如式(6)所示。

$$\beta = \frac{RRT_i}{RRT_i + RRT_{pri}} \quad (6)$$

其中, RRT_i 和 RRT_{pri} 分别表示路径 i 和主路径的可靠时长。因此, η_i 的大小将决定了备份路径 i 被选中的程度, 计算如式(7)所示:

$$\eta_i = \alpha_i \cdot \beta_i = [\phi \cdot n_i + (1 - \phi) \cdot l_i] \cdot \beta_i \quad (7)$$

3 MSMRC 路由协议

MSMRC 路由规则是在 AODV 协议基础上, 在路由控制分组中加入信道信息, 选择最优路径和备份路径。与传统 AODV 协议一样, 所提出的路由协议由 3 部分组成: 路由发现、路由应答和路由维护。

3.1 路由发现

在 CRAHNS 中, 主用户对信道的占用是导致认知用户链路失败的一个主要原因。因此, 在协议设计中应充分考虑主用户的活动因素。在 MSMRC 中, 要维护两种路由表: 主路由表和备份路由表, 由路由标记对这两种路由表进行区分。路由表中应包含以下项目: 源节点、目的节点、可用信道集合、可用信道集合中各信道的 CRT 值、固定信道、下一跳节点、下一跳节点可用信道集合及其 CRT 值、下一跳节点的固定信道、生存时间值和路由标记。

在路由发现阶段使用按需路由方式。当源节点与目标节点进行通信时, 路由表示没有任何可达路径, 源节点将会给自己的邻居节点广播 RREQ 数据包。一旦它的邻居接收到 RREQ 数据包, 将会触发下列 4 种情况中的一种。

Case 1: 检查跳数, 如果跳数大于预先设定的最大值, 则这个数据包将被立即抛弃。

Case 2: 检查当前节点的可用信道集, 如果它和上一跳可用信道集没有任何交集, 这个 RREQ 数据包将被抛弃。也就是说这两个节点不能相互通信。

Case 3: 检查当前节点 IP 地址是否在中继节点 IP 地址中。如果有, 则说明 RREQ 数据包之前已经到达过当前节点, 也就是说该节点之前转发过此 RREQ 数据包。此时应将此数据包丢弃, 以免产生环路。

Case 4: 检查接收到的 RREQ 数据包当前节点是否是目的节点。如果是目的节点, 就根据 RREQ 中携带的信息来确定主路径和备份路径; 然后产生路径应答数据包, 通过路由反

向传递回去。否则, 现有节点应该是中继节点, 将与本节点的相关信息加入到数据包中; 然后转发该 RREQ 数据包直到到达目的节点。

3.2 路由应答

在路径发现阶段, 目的节点可能会从同一源节点处收到多个 RREQ 数据包。因此, 目的节点不能对收到的每个 RREQ 数据包进行应答。在目的节点, 当接收首个 RREQ 数据包后即开启一个计时器。当计时器时间结束, 目的节点则不再接收从同一源节点发送的 RREQ 数据包。在此基础上, 可分别计算出主路径和备份路径, 进而构造出路由应答分组 RREP 数据对当前的路由请求进行响应。RREP 数据包包括源地址、目标地址、中继节点的固定信道可用信道集合及其 CRT 值, 因而建立起从源节点到目标节点的主路径和备份路径。另外, 考虑到认知用户中的动态信道参数, 可得到其可用信道集合, 路径信息可定期地进行更新。

3.3 路由保持和重建

在 CRAHNS 中, 由于主用户活动的随机性可能会导致一些节点、链路失效, 或是链路质量的急剧下降, 从而无法保证高可靠和稳定的数据通信。因此, 通信路径的保持和重构是保证数据通信质量的关键。当一条路由中的路径失效, 相关节点应采取以下 4 步行动以确保通信的继续。

Step 1 检查失效信道是否是被主用户占用。如果是被主用户占用, 则认知用户的通信将被挂起, 重启计时器并等待信道被释放, 然后进入 Step 2; 否则, 说明链路的失效与主用户的到来无关, 直接进入 Step 4。

Step 2 如果主用户在计时器结束前释放信道, 则认知用户将利用空闲信道重新进行通信; 否则, 因挂起时间到达最大避让时间 T_m 而转入 Step 3。

Step 3 选择其它信道进行通信。首先, 检查下一跳的固定信道是否在当前节点的可用信道集合中。如果在, 则调整当前数据转发接口到下一跳固定信道; 否则, 在当前节点和下一跳节点的可用信道集合的交集中, 选择具有最大 CRT 值的信道 k 作为数据转发信道。如果交集为空, 则直接转入 Step 4。

Step 4 退回到源节点后, 从备份路由中重新发出数据包。极端情况下, 如果备份路由也失效, 这个源节点必须重新传播 RREQ 数据包, 并重建一条可用的主路由和备用路由。

4 仿真分析和比较

为了证明 MSMRC 协议的性能, 采用网络仿真工具 NS2 来设计实验, 并与 JSORP^[10] 和 SEARCH^[3] 进行比较。实验场景: 在 $1000 \times 1000\text{m}^2$ 的正方形区域随机放置 50 个认知用户节点, 设置 35 条授权信道; 授权信道被主用户的占用模式服从参数 λ 和 μ 的指数分布, 其中 λ 和 μ 从 $[0.5, 1.0]$ 中均匀随机产生。最大相交退避时间 T_m 设置为 1.4s 。认知用户间的最大连接数设置为 35。参数 φ 为 0.6, 模拟过程持续 300s。主用户分别为 5、10、15、20、25、30、35。认知节点最大移动速度分别取 1m/s 、 4m/s 、 8m/s 、 12m/s 、 16m/s 、 18m/s 、 21m/s 。

当主用户的数量在 $5 \sim 35$ 之间变化时, JSORP、SEARCH 和 MSMRC 3 种路由策略的数据包投递率如图 3 所示。随着主用户数目的增加, JSORP 和 SEARCH 投递率急剧降低, 而 MSMRC 的投递率降低得较为缓慢。所提出的

MSMRC 协议利用主用户的活动规律来设计可靠链路时长,充分考虑了主用户的活动因素可能对链路中断和节点失效造成的影响。

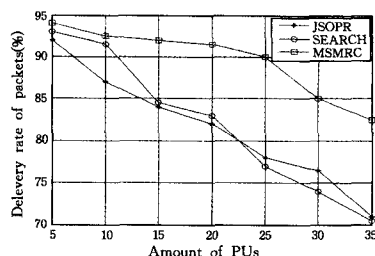


图3 不同主用户数下的认知用户数据包投递率

不同主用户数量下的3种路由开销情况如图4所示。此处的路由开销以链路和节点失效时所需的路由重构分组数来表示。随着主用户数量的增加,平均路由开销都呈现上升趋势。相较于其它两种协议,MSMRC协议的性能稍好一些,说明当通信连接事件频繁发生时,预先构造备份路由比传输过程中临时构造路由能够减轻网络负载和路由开销。

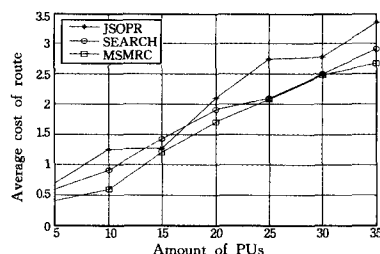


图4 不同主用户数下的平均路由开销

链路修复成功率如图5所示。随着主用户的不断增加,由于采用了主路由和备份路由机制,MSMRC协议具有较好的链路保持。而JSOPR协议对主用户活动没有应对策略,SEARCH协议不能提供可靠的路由修复机制,因此链路修复能力相对较差。

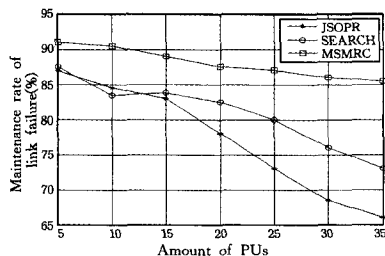


图5 PU数目与链路修复成功率之间的关系

结束语 本文提出一种适用于 CRAHNs 的可靠路由协议 MSMRC。该协议与传统路由相比,在路由发现和保持方面显著提升路由可靠性的同时,也能将数据包交付率保持在一个较高的水平上。MSMRC 的路由开销也处在一定可接受的范围内。但是,由于 MSMRC 在构造主路由和备份路由时,需要中继节点的合作而产生一定的节点计算开销和能量消耗。因此,在未来的研究中将重点分析这类因素对链路中断的影响程度,从而设计出更符合实际要求的路由策略。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Lee W-Y, Chowdhury K R. CRAHNs: Cognitive radio Ad Hoc networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(5): 810-836
- [2] 冯光升, 郑晨, 王慧强, 等. 认知无线网络的认知能力保障方法研究综述[J]. *计算机科学*, 2014, 41(5): 8-13, 19
- [3] Chowdhury K R, Felice M D. Search: A routing protocol for mobile cognitive radio Ad-Hoc networks[J]. *Computer Communications*, 2009, 32(18): 1983-1997
- [4] Chowdhury K R, Akyildiz I F. CRP: A routing protocol for cognitive radio ad hoc networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(4): 794-804
- [5] Wang Jyu-wei, Adriman R. Analysis of Cognitive Radio Networks with Imperfect Sensing and Backup Channels[C]// *Proceedings of Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS)*. 2013: 626-631
- [6] Shin D, Kim J, Ko Y-B. A hybrid topology based multicast routing for cognitive radio ad hoc networks[C]// *Proceedings of Computing, Communication and Networking Technologies (IC-CCNT)*, 2014. 2014: 1-5
- [7] Al-Rawi H A A, Yau K L A, Mohamad H, et al. A reinforcement learning-based routing scheme for cognitive radio ad hoc networks[C]// *Proceedings of Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*. 2014: 1-8
- [8] Lee J-J, Lim J. Cognitive routing for multi-hop mobile cognitive radio ad hoc networks[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2014, 16(2): 155-161
- [9] Samar A, Mustafa E. Metric-based taxonomy of routing protocols for cognitive radio ad hoc networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2014, 40(7): 151-163
- [10] Cheng Geng, Liu Wei, Li Yun-zhao, et al. Joint on-demand routing and spectrum assignment in cognitive radio networks[C]// *Proceedings of Communications*. 2007: 6499-6503

(上接第 272 页)

- [16] Santini M. Automatic Genre Identification: Towards a Flexible Classification Scheme[C]// *Proceedings of Future Directions in Information Access, BCS IRSG Symposium*, 2007
- [17] Santini M. Cross-Testing a Genre Classification Model for the Web[J]. *Text, Speech and Language Technology*, 2011, 42(3): 87-128
- [18] Vidulin V, Luštrek M, Gams M. Using Genres to Improve Search Engines[C]// *Proceedings of the International Workshop "Towards Genre-Enabled Search Engines: The Impact of NLP"*. Borovets, Bulgaria, September, 2007
- [19] Rosso M A. User-Based Identification of Web Genre[J]. *Journal*

of the American Society for Information Science and Technology, 2008, 59(7): 1053-1072

- [20] Barbedo J G A, Lopes A. Automatic Genre Classification of Musical Signals[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007(1): 1-12
- [21] Fairclough N. *Discourse, Social Change*[M]. Cambridge: Polity Press, 1992
- [22] 辛斌. 语篇互文性的语用分析[J]. *外语研究*, 2000(3): 14-16
- [23] 姜怡, 姜欣, 方森. 基于互文性度量的文本翻译索引[J]. *计算机工程与设计*, 2010, 31(15): 3490-3493
- [24] 朱立元. *现代西方美学史*[M]. 上海: 上海文艺出版社, 1993