

认知 Ad-hoc 网络中的快速邻居发现

张建照^{1,2} 姚富强² 赵杭生² 柳永祥²

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)¹ (总参第六十三研究所 南京 210007)²

摘要 在认知 Ad-hoc 网络中,邻居发现是 MAC 协议、拓扑管理、路由协议运行的前提,对网络性能有重要影响。针对认知 Ad-hoc 网络中节点的可用信道集异构和缺乏全网公共控制信道的特点,提出了基于可用频谱相似性的快速邻居发现算法。与现有同步邻居算法要求节点在全网可用信道集上切换以进行邻居发现的机制不同,所提算法要求节点在各自的可用信道集上切换,以一定的概率 λ 发送包含节点信息的分组。由于认知 Ad-hoc 网络全网可用信道集一般很大,而对于每个节点来说可能仅有几个可用信道,因此所提算法大大减小了邻居发现的时间开销。仿真分析表明,与现有算法相比,所提算法的时间开销至少降低了 47%。

关键词 认知 Ad-hoc 网络,邻居发现,频谱相似性,公共控制信道

中图分类号 TN915.01 **文献标识码** A

Fast Neighbor Discovery in Cognitive Radio Ad-hoc Networks

ZHANG Jian-zhao^{1,2} YAO Fu-qiang² ZHAO Hang-sheng² LIU Yong-xiang²

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)¹

(The 63rd Institute of General Staff, Nanjing 210007, China)²

Abstract In the infrastructure-less cognitive radio Ad-hoc networks(CRAHNs), neighbor discovery is the precondition of the execution of the protocols of MAC, topology management and routing, thus has great influence on the performance of the network. According to the environment of heterogeneous available channel sets and absence of common control channel in CRAHNs, a fast neighbor discovery algorithm based on the spectrum comparability(FNDSC) was proposed in this paper. Different from the existing synchronous algorithms that require users to switch on global channel set(GCS) in the network, a cognitive radio user following FNDSC switches on its respective available channel set (ACS) and transmits beacon messages with a probability λ . As GCS is generally big while the number of available channels for a specific user is probably small, the discovery process is considerably shortened. Simulation results show that the proposed algorithm reduces the discovery time by at least 47% compared with existing solutions.

Keywords Cognitive radio Ad-hoc networks, Neighbor discovery, Spectrum comparability, Common control channel

1 引言

随着无线通信技术的发展和广泛应用,频谱资源的紧缺已经成为限制无线通信应用发展的瓶颈^[1]。与此同时,美国联邦通信委员会(Federal Communication Committee)的研究表明,已分配频谱的利用率仅为 15%~85%^[2]。新业务可用频谱日益稀缺和已分配频谱利用率不高的局面共存。近年来,以认知无线电(Cognitive Radio, CR)为核心的动态频谱接入(Dynamic Spectrum Access)技术成为无线通信和网络领域研究的热点。认知无线电技术使认知用户(CR User)能够感知、识别、智能地接入空闲频段,在不干扰主用户(Primary User, PU)通信的前提下实现对频谱资源的“二次利用”,在提高频谱利用率、解决频谱稀缺问题上具有不可替代的优

势^[3,4]。认知 Ad-hoc 网络不依靠基础设施,具有自适应、自组织地根据干扰条件、节点密度、用户 Qos 需求等网络环境进行频谱协作的优势^[5],因此在军事通信、传感器网络、灾难救援、公共安全管理等方面具有广阔的应用前景,并成为认知无线网络研究的重要内容^[6-8]。

在认知 Ad-hoc 网络中,节点多跳分布式协作面临的首要任务是获得邻居节点的信息,这个过程称为邻居发现(Neighbor Discovery)。邻居发现获得的信息是 MAC 协议、路由发现、拓扑管理算法的基础,快速的邻居发现算法对于提高网络性能具有重要的意义。在认知 Ad-hoc 网络中,由于主用户的分布和频谱使用情况的差异造成网络中的节点的可用信道集(Available Channel Set, ACS)的差异;同时,由于网络的非授权频谱使用特性,全网公共控制信道很难保证^[9]。因此,基于

投稿日期:2011-03-28 返修日期:2011-05-26 本文受国家自然科学基金项目(61072077),国家科技重大专项(2010ZX03006-002-01),通信抗干扰技术国家级重点实验室基金项目(9140C0203020905)资助。

张建照(1985-),男,博士生,主要研究方向为频谱管理、认知无线网络等,E-mail:lgzjz2007@gmail.com;姚富强(1957-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为通信抗干扰、无线通信;赵杭生(1962-),男,博士后,研究员,主要研究方向为频谱管理;柳永祥(1974-),男,高级工程师,主要研究方向为频谱管理。

认知 Ad-hoc 网络的特点,设计不依靠公共信道的快速邻居发现算法,是认知 Ad-hoc 网络研究中的一个重要问题。

近几年来,认知 Ad-hoc 网络中的邻居发现问题受到越来越多的关注。文献[10]提出了认知 Ad-hoc 临时控制信道的概念,亦即使用按需发送 Hello 消息的机制进行邻居信息发现,这种机制仅适用于新入网用户的邻居信息发现。文献[11]提出了基于网络编码的抗干扰邻居发现算法,即算法的基本原理是当需要邻居信息或收到邻居的请求时,生成一个包含自身和邻居信息的线性组合的消息,在可用信道上随机跳变以发送消息,这种算法利用网络编码的优势实现多跳邻居信息获取。文献[12]提出了异步邻居发现算法,即节点在每个可用信道上侦听足够长的时间以选择出簇首进行邻居信息的统计和分发,这种算法只要求节点时钟频率一致而不需要同步即可实现邻居发现,但是时间开销比较大。文献[13]提出了基于全网可用信道集(Global Channel Set, GCS)同步切换的邻居发现协议(Frame-TDMA),即为每一个信道分配一帧,每帧中为每个节点分配一个时隙,所有节点同步地在 GCS 上切换,节点在自身可用信道对应的帧中的相应时隙广播包含可用信道信息的信息。这种算法可以保证节点获得邻居节点的信息,但当节点数目较多或 GCS 较大时时间开销太大。文献[14]针对文献[13]中为每个节点分配一个时隙造成的时间浪费,提出在每个信道对应的帧中以竞争模式发送消息进行邻居发现的算法(Frame-Compete),从而在一定程度上降低了时间开销,但当网络 GCS 较大时,时间开销仍然很大。文献[15]针对每个节点配置一个发信机和多个收信机的应用场景,提出了将节点按照其 ID 分组以加快邻居发现的同步算法。与随机模式和异步算法相比,同步邻居发现算法的时间开销更少,因而更有利于网络的快速初始化。但是现有的同步邻居发现算法都要求网络中的所有节点在全网可用信道集上同步切换。对于认知无线网络来说,全网信道集一般包括很多信道,而每个用户的可用信道集只包含少数几个可用信道。这就造成了节点在很多帧中只能保持沉默,浪费了时间,降低了邻居发现的速度。

针对以上问题,本文提出一种利用相邻节点可用频谱相似性的快速邻居发现算法(Fast Neighbor Discovery algorithm based on the Spectrum Comparability, FNDSC)。FNDSC 利用相邻节点可用频谱的相似性,使网络中的所有节点在各自可用信道集上同步切换进行信息交互,从而实现快速邻居发现。

2 系统模型和假设

2.1 认知 Ad-hoc 网络模型

本文研究分布式认知无线网络,网络建模为一个无向图 $G = \{N, E\}$, 其中 N 为顶点集合,对应认知 Ad-hoc 网络中的认知用户; E 为边集合,对应于网络中的链路。网络中每个用户被分配一个唯一的 ID $i(i \in \{1, 2, 3, \dots, N\})$, 用 CR_i 表示。与多数认知 Ad-hoc 网络中的 MAC 层和路由层文献相同^[16,17], 本文假设每个节点配置两个半双工认知无线电收发信机 I_c 和 I_d , 前者用于传输控制信息和频谱可用性信息,后者用于数据信息的收发。因为邻居发现过程之前不能进行数

据信息交互,本文假设 I_d 在邻居发现算法中可以被“借用”作为收信机。假定所有节点的通信距离相同,并由外部授时或同步算法已实现全网同步。

网络中的频谱被分为一个正交信道集(即 GCS) $M = \{1, 2, \dots, M\}$, 假定所有信道的性质相同。主用户网络工作在与认知 Ad-hoc 网络相同的地理区域内,每个主用户以 ON/OFF 模式使用某个信道。认知用户可在不干扰主用户的前提下以 overlay 的模式使用信道,认知用户 CR_i 通过独立或者合作检测获得可用信道集 $C_i = \{i_1, i_2, \dots, i_k\} (C_i \subseteq M)$, 每个信道在 C_i 中的位置按照它在 M 中的编号顺序排列。网络中不存在预置的公共控制信道(Common Control Channel), 节点只能通过可用信道交互信息。假定网络频谱环境变化相对缓慢,在邻居发现算法执行过程中可用信道集不发生变化。

图 1 给出了一个认知 Ad-hoc 网络场景示意图,其中主用户的 ID 也指示其占用的信道,虚线代表主用户干扰范围,在主用户干扰范围以外的认知节点可以使用相应信道。由图 1 可见,网络中认知用户的可用信道集受到主用户位置和信道占用情况的制约,具有异构特性。

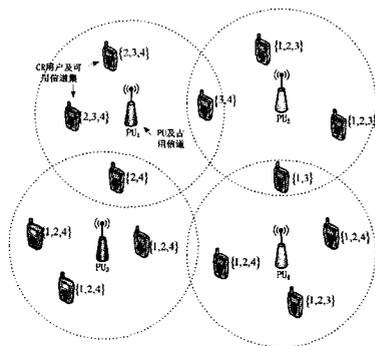


图 1 认知 Ad-hoc 网络示意图

2.2 邻居发现问题

与传统无线网络不同,认知无线网络中的相邻节点 CR_i 和 CR_j 直接通信的条件除了在通信范围之内,还要求有公共可用信道,即需要满足:

$$C_i \cap C_j \neq \emptyset \quad (1)$$

$$l_{ij} \leq L \quad (2)$$

式中, l_{ij} 是两个节点之间的距离。邻居发现算法的目的是获得所有满足式(1)、式(2)的信息,即收到所有邻居的消息。由于网络中不存在预置公共控制信道,节点之间只能通过公共可用信道交互消息以实现邻居发现。

3 算法描述与性能分析

3.1 FNDSC 算法基本思想

FNDSC 算法的基本思想是利用认知 Ad-hoc 网络中相邻节点的可用频谱相似性缩短邻居发现算法的时间。以图 1 中的典型场景为例,虽然由于主用户占用信道的不同造成网络中不同位置节点的可用信道集异构,但是相邻节点之间的可用信道集相似性很高。基于这种相似性,FNDSC 算法使网络中的节点将时间等分到每一个信道上,在每个信道上以概率 λ 发送消息,从而实现快速的邻居发现。

3.2 算法描述

算法通过网络中的节点发送 beacon 消息来实现邻居发

现, beacon 消息中包含节点的 ID、可用信道集等信息, 并可根据上层协议的要求加入其它信息。

FNDSFC 算法是同步算法, 网络中的所有节点在获得可用信道信息之后, 同时开始执行算法。算法的运行时间为 T , T 由 K 个等长的帧组成, 同时 T 被等分为 T/t_b 个时隙, 其中 t_b 为广播一个 beacon 消息需要的时间, 大小由具体的物理层参数决定。 T 、 K 和 t_b 是全局参数。对于节点 CR_i , FNDSFC 算法由它的两个收发信机 I_c^i 和 I_d^i 合作实现, 具体描述如下:

(1) I_c^i

I_c^i 作为收发信机轮流在所有可用信道上收发 beacon 消息。每个帧被平均分为 $|C_i|$ 个时间片(period), 在第 k 个时间片, I_c^i 切换到第 k 个可用信道。在该时间片上的每个时隙, I_c^i 以概率 λ 发送一个 beacon 消息, 以概率 $1-\lambda$ 侦听邻居节点发送的 beacon 消息。该操作在每个帧重复进行以提高发现概率。

(2) I_d^i

I_d^i 在邻居发现过程中作为一个侦听接收机, 依次切换到不同的可用信道上接收邻居节点发送的 beacon 消息。在第 k 帧中 I_d^i 侦听信道 $i_k = (k-1) \pmod{K} + 1$, 在此期间, 若 I_c^i 也切换到 i_k , 则 I_d^i 停止工作。

为了更加清楚地说明算法原理, 图 2 给出了当 $C_i = \{i_1, i_2, i_3, i_4\}$, 参数 $K=3$ 时节点 CR_i 执行 FNDSFC 算法的示意图。 CR_i 将 T 等分为 3 帧, 每帧分为 4 个时间片, 在每个时间片中的每个时隙, I_c^i 以概率 λ 发送 beacon。 I_d^i 依次侦听 C_i 中的前 3 个信道, 并在 I_c^i 切换到同一信道期间保持静默(图 2 中的 idle 期)。

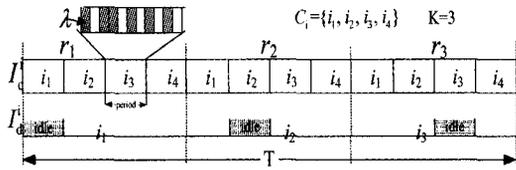


图 2 FNDSFC 算法示意图

3.3 算法分析

I_c^i 或 I_d^i 收到一个发自(满足条件(1)、(2)的)邻居 CR_j 的 beacon, 则认为 CR_i 成功发现了 CR_j 。

用 $n_1(c)$ 表示 I_c^i 和 I_c^j 同时处于同一个公共信道 $c(c \in C_i \cap C_j)$ 上的时隙个数, 则 I_c^i 在信道 c 上至少成功收到一个 I_c^j 发送的 beacon 消息的概率为:

$$p_1(c) = 1 - \prod_{l=1}^{n_1(c)} (1 - \lambda(1 - \lambda)^{m_l}) \quad (3)$$

式中, m_l 表示时隙 l 同时切换到信道 c 的 CR_i 的邻居个数。

用 $n_2(c)$ 表示 I_d^i 和 I_d^j 同时处于信道 c 并且 I_d^i 处于侦听状态的时隙个数, 则 I_d^i 在信道 c 上至少成功收到一个 CR_j 的 beacon 消息的概率为:

$$p_2(c) = 1 - \prod_{q=1}^{n_2(c)} (1 - \lambda(1 - \lambda)^{m_q}) \quad (4)$$

式中, m_q 表示时隙 q 同时处于信道 c 上的 CR_i 的邻居个数。

由于 I_c^i 和 I_d^i 不同时工作, 事件 I_c^i 发现 CR_j 和事件 I_d^i 发现 CR_j 互斥; 同时, CR_i 在不同信道上收听到 CR_j 的消息的概率相互独立, 故 CR_i 发现 CR_j 的概率为:

$$p_{i,j} = \min\left\{ \sum_{c \in C_i \cap C_j} \left[2 - \prod_{l=1}^{n_1(c)} (1 - \lambda(1 - \lambda)^{m_l}) - \prod_{q=1}^{n_2(c)} (1 - \lambda(1 - \lambda)^{m_q}) \right], 1 \right\} \quad (5)$$

式中, $n_1(c)$ 和 $n_2(c)$ 由邻居节点之间的可用信道集相似度以及 T 、 K 共同决定, m_l 和 m_q 主要由网络中的节点密度决定。在认知 Ad-hoc 网络中, 相邻节点的可用信道集相似度很高(甚至相同), 这就使得 FNDSFC 算法可以在更少的时间内实现完全邻居发现。下一节将通过仿真验证算法的性能。

4 仿真分析

4.1 仿真场景和参数设置

仿真区域为一个 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的平面区域, 认知用户的位置在区域内随机产生。网络中的信道总数 $|M| = 20$, 在认知 Ad-hoc 网络工作的相同区域内随机分布着 100 个主用户, 每个主用户随机占用一个信道, 其干扰半径为 15m。认知用户可以在主用户干扰范围之外使用相应的信道, 其通信距离为 10m。

仿真中将时隙长度 t_b 归一化为 1, 即 $t_b = 1$; 参数 K 统一取值为 $K=3$ 。仿真结果是 20 个随机产生的网络拓扑运行算法所得结果的平均值。

4.2 发送概率 λ 对发现时间的影响

首先考察发送概率 λ 对 FNDSFC 算法完成邻居发现所需时间的影响。图 3 给出了在不同 λ 取值的情况下, 网络中所有节点成功发现所有邻居所需时间随认知节点数目的变化曲线。由图可见, 发现时间随着网络中节点密度的增加而不断提高, 而 λ 取值越大, 时间提高的速度越快。这是因为当节点密度提高时, beacon 消息碰撞的概率越大, 需要的发现时间就越多。

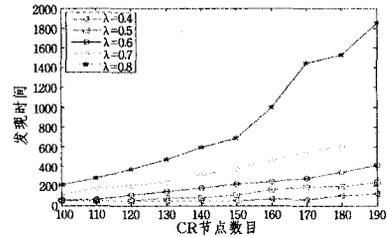


图 3 λ 对发现时间的影响

4.3 与现有邻居发现算法的比较

此处, 我们设置 $\lambda = 0.5$, 比较在不同节点密度的情况下 FNDSFC 算法与文献[13]中的 Frame-TDMA 算法和文献[14]中的 Frame-Compete 算法的发现时间。

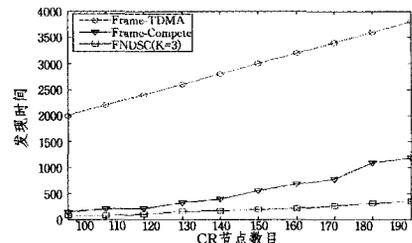


图 4 与现有算法的比较

图 4 给出了 3 种算法的发现时间随认知节点数目变化的曲线。由图可见, 3 种算法的发现时间均随节点数目增加而

增长;Frame-TDMA 算法的发现时间随网络中节点数目的增加线性增长,这是因为它在每个信道的帧中为每个节点配置一个时隙;Frame-Compete 算法和 FDNSC 算法时间开销比 Frame-TDMA 算法少得多,这是因为认知 Ad-hoc 网络中节点的通信距离有限,节点之间可以在不碰撞或较少碰撞的情况下同时发送消息而不需要为每个节点分配一个独占时隙;FDNSC 算法的时间开销分别是 Frame-TDMA 和 Frame-Compete 算法的 28%~53%和 4%~9%,这是因为 FDNSC 充分利用了相邻节点的可用信道集的相似性,节点不需要在 GCS 上切换,而只需要在各自可用信道集上进行 beacon 消息的交互,这减少了不必要的时间浪费,大大降低了邻居发现过程的时间开销。

结束语 邻居发现是认知 Ad-hoc 网分布式多跳协作面临的首要问题。本文针对认知 Ad-hoc 网络中的可用信道集异构和没有全网公共控制信道的环境,利用相邻节点可用信道集的相似性,提出了一种快速邻居发现算法。仿真表明,提出的算法与现有算法相比,发现时间至少减少了 47%。算法较好地解决了网络初始化阶段的全网同步发现问题,但对于在网络运行过程中新入网节点的邻居发现,还需要进一步研究。

参 考 文 献

[1] 郭彩丽,冯春燕,曾志民,等. 认知无线网络技术及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010:1-9

[2] FCC ET Docket No 03-222, Notice of Proposed Rule Making and Order[OL]. December 2003

[3] Akyildiz I F, Lee W-Y. NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access /Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey [J]. Computer Networks, 2006, 50: 2127-2159

[4] 宋化,林小拉. 一种新型面向频谱高利用率的认知 MAC 协议[J]. 计算机科学, 2010, 37(7): 97-101

[5] Akyildiz I F, Lee W-Y, Chowdhury K R. Spectrum management in cognitive radio Ad-hoc networks[J]. IEEE Network, 2009, 23(4): 6-12

[6] XG Working Group. The XG Vision RFCs [OL]. <http://www.ir.bbn.com/projects/xmac/rfc/rfc-vision.pdf>

[7] End-to-End Reconfigurability, E2R_WP5_D5. 3_050727 [OL]. http://e2r.motlabs.com/Deliverable/E2R_WP5_D5_3_050727.pdf

[8] Zhao Jun, Zheng Hai-tao, Yang Guang-hua. Distributed Coordination in Dynamic Spectrum Allocation Networks[C]// IEEE International Conference on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. 2005: 259-268

[9] Komali R S, Thomas R W, Dasilva L A, et al. The Price of Ignorance-Distributed Topology Control in Cognitive Networks [J]. IEEE Transactions on wireless communications, 2010, 9(4): 1434-1445

[10] Damjanovic Z. Cognitive Radio Access Discovery Strategies[C]// IEEE International Conference on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, CNSDSP 2008. Graz, July 2008: 251-255

[11] Asterjadhi A, Zorzi M. JENNA: A Jamming Evasive Network-coding Neighbor-discovery Algorithm for Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Wireless Communications Magazine, 2010, 7(4): 24-32

[12] Liyana Arachchige C, Venkatesan S, Mittal N. Asynchronous Neighbor Discovery Algorithm for Cognitive Radio Networks [R]. UTDACS-24-08. University of Texas at Dallas, August 2008

[13] Krishnamurthy S, Thoppian M, Kuppa S, et al. Time-efficient Distributed Layer-2 Auto-configuration for Cognitive Radio Networks[J]. Computer Networks, 2008, 52(4): 831-849

[14] Lazos L, Liu Si-si, Krunz M. Spectrum Opportunity Based Control Channel Assignment in Cognitive Radio Networks[C]// IEEE Secon 2009 Proceedings. Rome, Italy, 2009: 1-9

[15] Krishnamurthy S, Mittal N, Chandrasekaran R, et al. Neighbor Discovery in Multi-receiver Cognitive Radio Networks[J]. International Journal of Computers & Applications, 2009, 31(1): 50-57

[16] Cormio C, Chowdhury K R. A Survey on MAC Protocols for Cognitive Radio Networks[J]. Ad-hoc Networks, 2009, 7(7): 1315-1329

[17] Cesana M, Cuomo F, Ekici E. Routing in Cognitive Radio Networks: Challenges and Solutions[J]. Ad-hoc Networks, 2010

(上接第 28 页)

[6] Hossmann T, Legendre F, Spyropoulos T. From contacts to graphs: pitfalls in using complex network analysis for DTN routing[C]//Proc of INFOCOM '09. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 1-6

[7] 李陟,刘凤玉,张宏. 一种应用于社交网络中的时延容忍路由协议[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(12): 4732-4734

[8] 李陟,查玄阔,刘凤玉,等. 公交时延容忍网络中基于索引的多级分组路由算法[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(3): 407-414

[9] Ahmed S, Kanhere S S. Cluster-based Forwarding in Delay Tolerant Public Transport Networks[C]//Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks, 2007: 625-634

[10] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks [R]. CS-2000-06. Durham, NC: Department of

Computer Science, Duke University, 2000

[11] Lindgren, Doria A, Schelèn O. Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks[J]. Mobile Computing and Communications Review, 2003, 7(3): 19-20

[12] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Spray and Wait: An Efficient Routing Scheme for Intermittently Connected Mobile Networks[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2005 Workshop on Delay Tolerant Networks. Philadelphia, PA, USA, August 2005: 22-26

[13] Keränen A, Ott J, Kärkkäinen T. The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools'09). New York, NY, USA, 2009