

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.04.020

引用格式:张龙,白春红,许海涛,等. 分布式认知无线网络多路径路由协议研究综述[J]. 电讯技术,2016,56(4):463-470. [ZHANG Long, BAI Chunhong, XU Haitao, et al. Multi-path routing protocols for distributed cognitive radio networks: a survey [J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(4):463-470.]

分布式认知无线网络多路径路由协议研究综述*

张 龙**¹, 白春红¹, 许海涛², 卓 凡¹, 黄 伟³

(1. 河北工程大学 信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 北京科技大学 计算机与通信工程学院, 北京 100083; 3. 中国电力科学研究院 电力能效测评中心, 北京 100192)

摘 要:为了深入研究分布式认知无线网络的多路径路由问题,阐述了分布式认知无线网络基本特征以及多路径路由设计面临的问题与挑战。分布式认知无线网络多路径路由采用多路径并行传输,可有效降低传输时延、增加网络吞吐量与传输可靠性、实现网络负载均衡。根据路由优化目标不同,从吞吐量、带宽、干扰、时延、负载均衡和路由发现六方面对近年来多路径路由协议的主要研究成果进行了分类,然后逐类对多路径路由协议进行了分析和讨论,最后分别从分布式认知无线网络基本特征的适应性与多路径路由协议特征两个方面进行了比较,并展望了分布式认知无线网络多路径路由协议需进一步研究的方向。

关键词:认知无线电; 分布式网络; 多路径路由; 路由协议; 研究综述

中图分类号: TN925 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2016)04-0463-08

Multi-path Routing Protocols for Distributed Cognitive Radio Networks: a Survey

ZHANG Long¹, BAI Chunhong¹, XU Haitao², ZHUO Fan¹, HUANG Wei³

(1. School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Institute of Power and Energy Efficiency, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to further research multi-path routing problem in distributed cognitive radio networks (CRN), essential features of distributed CRN are firstly presented and the problems and major challenges in designing the multi-path routing are further introduced. The multi-path routing in distributed CRN is characterized by multi-path parallel transmission strategy, which can effectively reduce the transmission delay, increase the network throughput and transmission reliability, and also achieve the traffic load balance. From the perspective of routing optimization, the recent research results on the multi-path routing protocols in distributed CRN are broadly classified into six categories, including throughput, bandwidth, interference, delay, load balance, and routing discovery. Then the multi-path routing protocols for distributed CRN are analyzed and discussed respectively. Finally, based on the adaptation of essential features of distributed CRN and the characteristics of multi-path routing protocols, the multi-path routing protocols are compared, and the open issues for future research about multi-path routing protocols in distributed CRN are pointed out to motivate new research and development in this field.

Key words: cognitive radio; distributed networks; multi-path routing; routing protocol; research summarization

* 收稿日期:2015-12-14;修回日期:2016-03-11 Received date:2015-12-14;Revised date:2016-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61402147,61309033,61402001);河北省自然科学基金资助项目(F2013402039);河北省科学技术研究与发展计划资助项目(15214404D-1);河北省高等学校科学技术研究计划资助项目(QN20131048)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation (No. 61402147, 61309033, 61402001); The Natural Science Foundation of Hebei Province of China (F2013402039); The Research Program of Science and Technology of Hebei Province (15214404D-1); The Scientific Research Foundation of the Higher Education Institutions of Hebei Province (QN20131048)

** 通信作者: zhanglong@hebeu.edu.cn Corresponding author: zhanglong@hebeu.edu.cn

1 引言

认知无线电 (Cognitive Radio, CR)^[1] 是一种智能化动态频谱接入无线通信系统, 次用户 (Secondary User, SU) 通过对可用授权频段进行频谱感知, 在不对主用户 (Primary User, PU) 产生干扰的前提下, 采用频谱共享技术以机会方式动态接入时-频-空多维频谱空洞, 解决静态的频谱分配体制与动态的频谱利用方式之间不匹配以及可用授权频谱资源分布高度不均衡等矛盾, 从而提高频谱利用率。

根据网络控制方式, 认知无线网络 (Cognitive Radio Networks, CRN) 可分为具有基础设施的集中式 CR 网络和无基础设施支持的多跳分布式 CRN^[2]。多跳分布式 CRN 应用领域一般包括认知自组织网络 (Cognitive Radio Ad Hoc Networks, CRA-NET)、认知传感器网络 (Cognitive Radio Sensor Networks, CRSN)、认知无线 Mesh 网络 (Cognitive Wireless Mesh Networks, CWMN) 3 类网络场景。当前, 现有 CRN 研究工作主要集中在物理层、MAC 层等方面, 侧重于解决功率控制^[3]、频谱感知^[4-5]、频谱接入与共享^[6-7]、MAC 协议^[8] 以及物理/MAC 层跨层优化^[9] 等问题, 旨在实现认知环 (Cognitive Cycle)^[1-2] 的主要功能, 进一步增强 CRN 的环境适变性。与现有 CRN 研究工作主要集中在网络架构低层不同, 近年来, 研究人员已逐步开始关注网络架构中网络层或更高层, 解决多跳分布式 CRN 的路由以及高可靠传输等问题^[10-12], 代表性研究工作体现在基于全局频谱知识的路由和基于局部频谱知识的路由两方面^[11], 采用的路由策略侧重于跨层路由^[13]、网络性能指标最优化^[14] 以及路由稳定性^[15] 等方面。考虑到多跳分布式 CRN 中 SU 节点移动、节点能量消耗、节点部署密度限制、节点资源有限以及 PU 节点重新获得授权频谱资源等约束条件, 导致链路中断、路由失效, 增加路由维护代价、路由开销与传输时延, 从而降低了路由稳定性、鲁棒性以及网络可扩展性。以路径多样性为目标, 多路径路由通过构建源 SU 节点与目的 SU 节点之间多条完全非交叉路径或交叉路径, 采用多路径并行传输, 实现网络负载均衡, 有效降低了传输时延与路由失效风险, 增加了网络吞吐量与传输可靠性。综上所述, 设计有效的分布式 CRN 多路径路由协议以提高网络吞吐量、降低传输时延、均衡网络负载、增强网络连接性与可靠性成为 CRN 研究领域的关键问题之一, 具有

重要的理论意义和应用价值。

本文主要综述了近年来国内外关于分布式 CRN 多路径路由协议的研究成果。第 2 节阐述了分布式 CRN 基本特征与多路径路由设计面临的问题与挑战; 第 3 节首先对近年来分布式 CRN 多路径路由协议的主要研究成果进行总体分类, 然后逐类介绍了代表性的研究成果; 第 4 节对代表性的研究成果进行比较分析; 最后对全文进行总结并给出进一步的研究方向。

2 特征与挑战

2.1 分布式 CRN 基本特征

2.1.1 可用频谱的时变性

分布式 CRN 中 SU 节点具有环境感知与学习能力, SU 节点通过与外界环境交互信息, 自适应地改变通信参数, 若当前使用的频谱被 PU 占用, 则 SU 节点通过切换信道以及调整发射功率的方式避免对 PU 造成干扰, 造成可用频谱移动。因此, 考虑到 PU 工作状态变化与移动性的影响, SU 节点可用频谱是随机动态变化、非静态的时-频-空多维频谱机会集。

2.1.2 网络拓扑的动态性

分布式 CRN 中 SU 节点可用频谱的时变性以及 PU 工作状态的改变使得 SU 节点加入或退出 CRN 具有随机性, 导致 SU 节点之间难以保证链路连接的持续性, 使得网络拓扑具有动态性, 甚至呈现出时变及间歇的连通性与中断性, 从而产生网络拓扑的割裂性与网络孤岛, 无法保证实时的端到端路由。

2.1.3 拓扑控制的局部性

传统无线多跳网络往往通过周期性信标信息来完成全局拓扑信息收集, 然而在分布式 CRN 中, 由于时-频-空多维频谱机会集分布在很宽的频带上, 在所有可能的信道上都发送信标是不可行的。因此, SU 节点无法感知全局拓扑, 必须依靠局部协同收集拓扑信息。

2.1.4 动态路由的机会性

可用频谱的时变性与网络拓扑的动态性导致分布式 CRN 路由具有动态性, 网络拓扑的割裂性与网络孤岛存在导致 SU 节点之间往往难以保持实时节点的端到端路由, 需要借助中继 SU 节点采用多跳存储携带转发机制, 并依赖于 SU 节点移动性产生的接触 (Contact) 关系^[16] 来实现不同网络孤岛中 SU

节点之间的互连互通。

2.2 多路径路由设计挑战

2.2.1 频谱选择

考虑到可用频谱的时变性与 SU 发射功率的有限性,源 SU 节点与目的 SU 节点之间多条端到端路由由不同的信道组成,且具有多跳性。因此,在多条完全非交叉路径或交叉路径建立过程中,如何评价 PU 活动与频谱切换对多条路径稳定性、鲁棒性产生的影响具有一定挑战,故需开展多路径路由与频谱分配联合跨层优化,构造稳定鲁棒的多路径路由算法。

2.2.2 拓扑约束

网络拓扑的动态性、时变与间歇的连通性与中断性、拓扑信息的不完整性与局部性,以及共享频谱具有动态性、不连续性等约束,导致多路径路由由链路中断、路由失效的概率增加,故多路径路由选择策略除了能适应分布式 CRN 环境外,还应对网络拓扑具有动态自适应性,并快速收敛。

2.2.3 接触调度

接触关系表示分布式 CRN 中相邻 SU 节点之间的通信机会,可调度接触表示通过对先验可行接触进行数理统计而获得的通信机会集。因此,揭示不同网络孤岛中 SU 节点之间的可调度接触关系,并有效地对接触可预测进行建模是提高多路径路由由有效性需要考虑的核心问题之一。

2.2.4 负载分配

源 SU 节点与目的 SU 节点之间借助多条完全非交叉路径或交叉路径实现数据包多路径并行传输,考虑到 SU 节点在面对不可再生的可用频谱资源时,可能会表现出自私性。因此,量化单路径负载流量分配粒度以及在多路径上合理公平调度数据包负载流量对于提高网络资源利用率、均衡网络负载具有重要意义。

3 研究现状与分析

3.1 文献综述

近年来分布式 CRN 多路径路由方面的研究越来越受到国内外研究者的重视,图 1 给出了近年来分布式 CRN 多路径路由协议的文献综述。如图 1 所示,根据路由优化目标的不同,分布式 CRN 多路径路由由研究的主要成果可分为吞吐量、带宽、干扰、时延、负载均衡和路由发现 6 种类型。

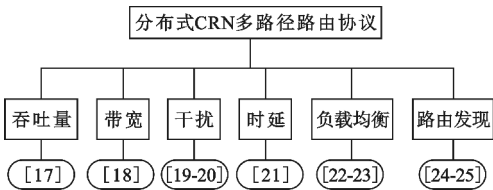


图 1 CRN 多路径路由协议文献综述
Fig. 1 Literature review on CRN multi-path routing protocols

3.2 基于吞吐量的方法

以交叉路径为多路径构造目标,文献[17]提出一种 CWMN 中联合多路径路由与信道分配策略。在按需路由的基础上,该策略根据所选路径情况设置交叉节点的中继能力,为选择有效信道,以 PU 占用每个信道的最少次数作为度量指标。第 i 个 SU 节点感知到信道 c 被 PU 占用的次数 $C_i(c)$ 可统计表示如下:

$$C_i(c) = \sum W_i(c, A_i, S_{pu}). \tag{1}$$

式中: A_i 表示第 i 个 SU 节点的可用信道列表; S_{pu} 表示 PU 占用过的信道集合。如果 $c \in A_i$ 且 $c \in S_{pu}$, 则 $W_i(c, A_i, S_{pu}) = 1$; 否则, $W_i(c, A_i, S_{pu}) = 0$ 。文献[17]选择被 PU 占用次数较少的信道作为当前使用信道,提高了 SU 接入信道的机率,减少了信道切换次数,增加了端到端的吞吐量。

3.3 基于带宽的方法

考虑到 PU 出现概率、链路选择可用信道的状况以及受约束的传输带宽,文献[18]提出了一种 CRANET 中 QoS 多路径路由协议。该协议通过统计 PU 占用频带的状况以预测信道被 PU 占用的概率,结合频谱移动概率与所有可用信道的容量来计算预期带宽。第 i 个 SU 节点与第 j 个 SU 节点之间的链路总预期带宽 $B_{(i,j)}$ 表示如下:

$$B_{(i,j)} = P_u(m_{n(i,j)}, t_{req}) \times R_{n(i,j)}. \tag{2}$$

式中: $R_{n(i,j)}$ 表示第 i 个 SU 节点与第 j 个 SU 节点之间链路 $L_{(i,j)}$ 的传输速率; $P_u(m_{n(i,j)}, t_{req})$ 表示信道 $CH_n(i,j)$ 在时间 t_{req} 内未被占用的概率。在多路径路由发现阶段,目的 SU 节点可得到所有路径的相关信息,并根据式(2)计算出总的预期带宽,选择带宽较大的多条路径用于并行传输。

3.4 基于干扰的方法

文献[19]提出了邻近路径(Route Closeness)概念,提出一种 CRN 中基于邻近路径约束的多路径路由策略,通过定义 PU 影响区域(PU's Effective Re-

gion, PuER)、邻近链路以及邻近路径等,进一步给出邻近路径约束的多路径路由的概念。其中,邻近路径 R_1 、 R_2 表示如下:

$$C(R_1,R_2)=\sum_{\forall L_p\in R_1}\sum_{\forall L_q\in R_2}C(L_p,L_q)。(3)$$

式中: L_p 、 L_q 表示两条邻近链路; $C(L_p,L_q)$ 表示两条邻近链路 p 、 q 被 PU 干扰到区域的交叉部分。则 $C(L_p,L_q)$ 可进一步表示如下:

$$C(L_p,L_q)=\text{Area}(P(L_p)\cap P(L_q))。 (4)$$

式中: $P(L_p)$ 表示 PU 对链路 L_p 造成影响的区域。为形象化邻近路径定义,图 2 给出了 PU 影响区域、邻近链路以及两条邻近路径的例子。其中:图 2(b) 中阴影部分表示 PU 同时影响到了邻近的两条链路 L_1 、 L_2 ;图 2(c) 中阴影部分表示 PU 同时影响到了邻近的两条路径 R_1 、 R_2 ,其他区域表示 PU 没有造成影响或是没有同时影响到两条链路或是两条路径。该文献引进了邻近路径约束的路由选择机制,采用该机制选择的多条路径不会同时受到 PU 的影响,从而提高了传输路径的稳定度,增加了端到端的吞吐量。

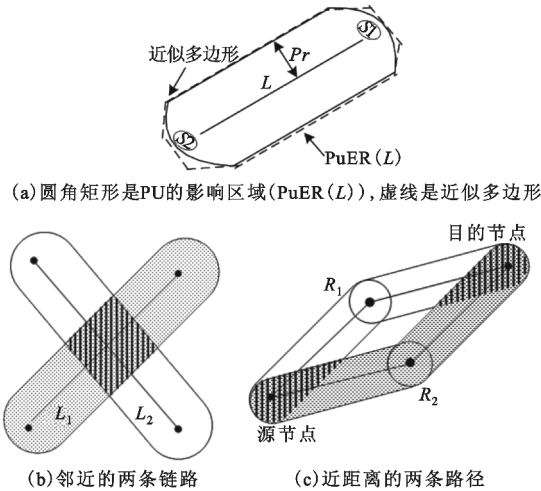


图 2 邻近路径的定义
Fig. 2 Definition of route closeness

文献[20]针对 PU 干扰所造成的路径不稳定性问题,提出了一种 CRANET 中基于连通性的竞技场 (Gymkhana) 协议,并提出拉普拉斯图谱数学模型 (Laplacian Spectrum of Graph) 来模拟和评估多路径路由的连通性。该数学模型通过考虑 PU 的行为、信道切换的损耗以及路径的总跳数,利用拉普拉斯矩阵计算多路径路由连通性。为保证路径的稳定

性,使用分布式竞技场 (Gymkhana) 协议收集源 SU 节点与目的 SU 节点之间备份路径的关键参数,包括参与转发的 SU 节点标识符列表 $l_k^n=\{ID_k^n\}$ 与影响向量列表 l_k^b 。其中: k 表示路径 k ; $ID_k^n=S$ (源 SU 节点); $ID_k^n=D$ (目的 SU 节点)。图 3 给出了一个分布式竞技场协议的例子。依图 3 所示,列表 l^a 根据 S 节点标识符进行初始化, l^b 根据影响向量 I^s 进行初始化。每个接收到路由请求报文 RREQ 的 SU 节点检查其 ID 是否已包含在 l^a 中,如果包含则丢弃 RREQ;否则将其 ID 和影响向量 I 分别加入到 l^a 和 l^b 中,并进行转发。

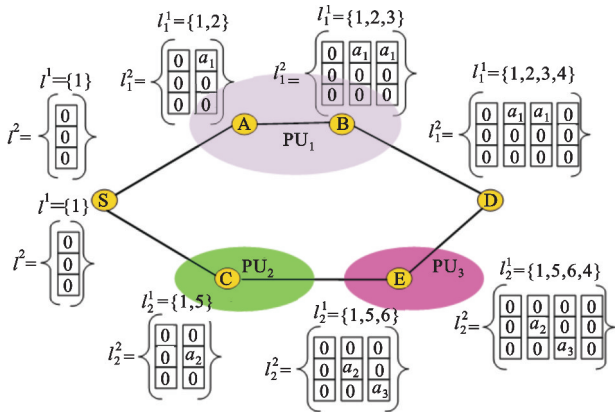


图 3 竞技场协议例子
Fig. 3 Example of Gymkhana protocol

3.5 基于时延的方法

为保证认知 M2M 网络 (Cognitive Machine-to-Machine Networks, CM2MN) 端到端传输的可靠性,基于协作中继框架,文献[21]提出一种 CM2MN 中网络编码多路径路由的统计 QoS 管理机制,实现数据传输阶段虚拟网络的多输入和多输出操作,其网络模型如图 4 所示。其中:CM2MN 与 SU 系统、PU 系统共存;CM2MN 包括一个认知机器源节点 (Cognitive Machine Source, CMS) 和一个认知机器目的节点 (Cognitive Machine Destination, CMD),若干个参与 CMS 和 CMD 之间的合作转发的认知机器节点 (Cognitive Machine, CM)。基于图 4 给出的网络模型,文献[21]提出一种概率网络编码路由算法,该算法将机会链路模拟为 M/M/1/∞/FCFS 排队系统,将错误控制和统计的服务质量 (Quality of Service, QoS) 管理机制相结合,实现端到端的可靠传输,从而减小端到端的时延。

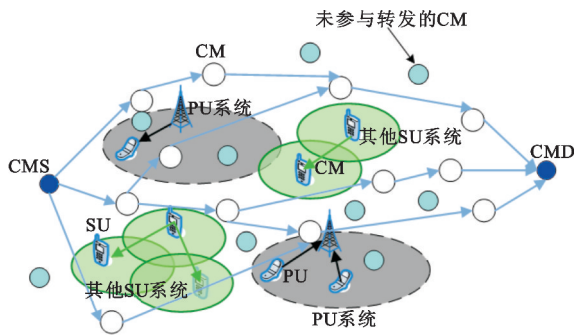


图 4 CM2MN 网络模型
Fig. 4 Network model of CM2MN

3.6 基于负载均衡的方法

为找到稳定性强的多路径路由来均衡网络负载,文献[22]提出了一种 CRANET 中基于非合作微分博弈的多路径路由流量分配策略。该策略将路径看作局中人,各条路径的目的 SU 节点根据得到源 SU 节点发送数据包总数向转发路径进行支付,各条路径则根据传输数据的带宽 $2v_i/\ln(1+S/N)$ 支付费用 $[2v_i c/\ln(1+S/N)]v_i$ 。其中: v_i 表示第 i 条路径的转发速率; c 表示单位定价; S/N 表示信噪比。除此之外,每条路径还需支付额外的费用,包括为提高路径的稳定性而采用信道编码的费用以及感知突然出现的 PU 的费用。文献[22]采用微分博弈构建的第 i 个局中人的支付函数 U_i 表示如下:

$$U_i = \int_0^\infty \left\{ P(s)v_i - \frac{2v_i c}{\ln\left(1 + \frac{S}{N}\right)}v_i - dp_i v_i \right\} e^{-rs} ds \quad (5)$$

式中: r 表示贴现率; $P(s)$ 表示在时刻 s 单位信息收益; $dp_i v_i$ 表示第 i 条路径的额外费用。根据式(5),求解微分方程,文献[22]获得了反馈纳什均衡解,并证明了反馈纳什均衡解即为最佳流量分配解。

基于路径的稳定性,文献[22]利用非合作的微分博弈模型,解决了多路径路由流量均衡分配问题,但文献未考虑关于目的 SU 节点支付费用优化问题。当目的 SU 节点接收到错误的数据包时,可以考虑无需支付或是折价支付。

文献[23]将减少端到端的时延问题转化为最佳流量分配问题,提出了一种 CRANET 中基于排队论的多路径路由最佳流量分配算法。该算法将 PU 在 OFDM 子信道上的工作模式看作是独立的 ON-OFF 过程,构建路径集合 P ,通过考虑第 $p \in P$ 条路径上第 i 跳子信道的空闲概率 ρ_{pi} 、第 i 个 SU 节点的

到达率 λ_i 与转发速率 u_i ,构建最佳流量分配问题,通过利用拉格朗日公式以及基于梯度的搜索方法找到最佳流量分配策略 $\lambda^* = (\lambda_1^*, \dots, \lambda_p^*, \dots, \lambda_{|P|}^*)$,即

$$\begin{cases} \lambda^* = \operatorname{argmin} \max_{p \in P} \sum_{i=1}^{k_p} \frac{1}{\rho_{pi} u_{pi} - \lambda_p} \\ \sum_{p \in P} \lambda_p \geq \lambda \end{cases} \quad (6)$$

3.7 基于路由发现的方法

文献[24]解决了 CRANET 中路由发现以及可用资源在多路径上的调度问题。源 SU 节点与目的 SU 节点之间路由发现如图 5 所示。文献[24]将源 SU 节点和目的 SU 节点分别看作正负电荷,两电荷之间的电场线与源 SU 节点之间的角度不超过阈值的看作是备用多路径路由,即 $|\theta| \leq \theta_{th}$,下一跳第 j 个 SU 节点的选取要符合以下几点:第 j 个 SU 节点在通信范围内,且没被占用;第 j 个 SU 节点要尽量靠近虚拟的电场线, $\Delta\theta = \theta_m - \theta_j$, $\Delta\theta$ 越小越好;第 j 个 SU 节点必须更加靠近目的 SU 节点, $\Delta d = \|X_j - X_D\|$, Δd 应尽量小。用权重 γ 衡量 $\Delta\theta$ 与 Δd 两个指标,选取符合条件的多条路径。该文献解决了 CRANET 中路由发现问题,利用正负电荷之间的电场线找到了源目的节点之间的多条路径,这种学科交叉解决问题的方式值得借鉴,但在文献中作者未考虑交叉路径之间的干扰问题,可以只选取完全未交叉的多路径路由进行并行传输。

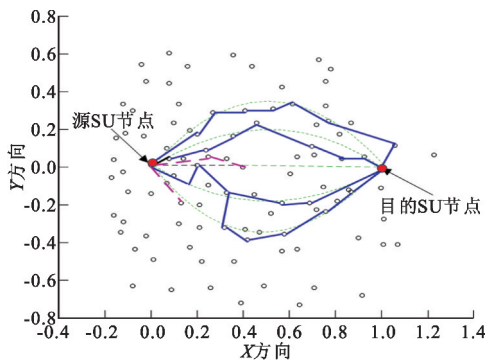


图 5 源 SU 节点(0,0)与目的 SU 节点(1,0)之间的路由发现

Fig. 5 Route discovery of source SU at (0,0) and destination SU at (1,1)

文献[25]提出了一种 CRANET 中多路径路由发现算法。该算法应用图论的代数连通度,通过减少多路径路由的条数,进而减少源 SU 节点与目的 SU 节点之间路由请求消息的次数。文献[25]将竞

技场 (Gymkhana) 操作扩展到一般的 SU 节点上,如图 6 所示,结合当地节点转发 (Forwarding based on Local Node, FLN),在目的 SU 节点和一般 SU 节点上运用虚拟的代数连通度知识,FLN 计算源 SU 节点和邻居 SU 节点间的效用函数值,并丢弃效用函数值小的路由请求。如果知道影响邻居节点的 PU 活动因子,基于邻居 SU 节点的转发 (Forwarding based on Neighbor Node, FNN) 模式就会启动,决定哪些路由请求可以被转发,哪些要被丢弃,最终减少多路径路由的条数。

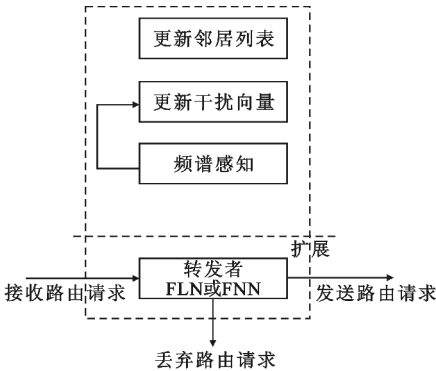


图 6 在一般 SU 节点上的竞技场扩展操作
Fig. 6 Extended Gymkhana operation at a general SU

4 比较与分析

通过从吞吐量、带宽、干扰、时延、负载均衡和路由发现 6 种方法对分布式 CRN 多路径路由协议进

行归纳和分析,各类多路径路由协议都有相应的研究背景和应用条件,很难定性地给出哪种协议更优越。为了对近年来分布式 CRN 多路径路由协议的主要研究成果给出横向比较,如表 1 所示。现有关于多路径路由协议的研究成果都将分布式 CRN 基本特征考虑在内,具有一定适应性,但文献[21]对分布式 CRN 基本特征的适应性不足。表 2 给出了多路径路由协议特征比较结果,其中,时延、吞吐量、负载均衡、可扩展性、QoS 支持、稳定性 6 个目标作为比较对象。由表 2 可知现有关于多路径路由协议的研究成果主要以单个目标或少数几个目标作为其优化对象,难以实现多个目标的优化。

表 1 分布式 CRN 基本特征适应性比较
Tab. 1 Adaptation comparison of the essential features of distributed CRN

协议	时变可用频谱	动态网络拓扑	局部拓扑控制	机会动态路由
文献[17]	✓	✓	—	—
文献[18]	✓	—	—	✓
文献[19]	✓	—	✓	✓
文献[20]	✓	—	—	✓
文献[21]	—	—	✓	✓
文献[22]	—	—	—	—
文献[23]	✓	—	—	—
文献[24]	✓	✓	✓	✓
文献[25]	✓	✓	—	—

表 2 多路径路由协议特征比较
Tab. 2 Characteristics comparison among multi-path routing protocols

协议	度量标准	时延	吞吐量	负载均衡	可扩展性	QoS 支持	稳定性
文献[17]	PU 占用信道次数	降低	增加	无度量	无度量	无度量	增强
文献[18]	带宽	降低	吞吐量随节点数目的增加而增加	无度量	无度量	是	无度量
文献[19]	时延	降低	无度量	无度量	强	无度量	无度量
文献[20]	时延	降低	无度量	无度量	无度量	是	无度量
文献[21]	流量分配	降低	无度量	负载均衡	强	无度量	增强
文献[22]	流量分配	无度量	无度量	基于路径稳定性分配流量	强	无度量	无度量
文献[23]	流量分配	随信道可用率的增加而降低	无度量	根据频谱可用性以及每一跳传输速率分配流量	无度量	是	无度量
文献[24]	时延	降低	无度量	无度量	强	无度量	增强
文献[25]	路径连通性	无度量	无度量	无度量	无度量	无度量	增强

5 结束语

分布式 CRN 多路径路由协议瞄准路径多样性,构建源 SU 节点与目的 SU 节点之间多条完全非交叉路径或交叉路径,实现数据包多路径并行传输,相对于单播路由,多路径路由可有效降低传输时延,提高网络吞吐量,增强网络连接性与可靠性,实现网络负载均衡。本文在阐述分布式 CRN 基本特征与多路径路由设计面临的问题与挑战的基础上,对近年来分布式 CRN 多路径路由协议的主要研究成果从吞吐量、带宽、干扰、时延、负载均衡和路由发现 6 个方面逐类进行了分析和讨论,通过对各类多路径路由协议的比较与分析,并结合作者已开展的研究工作,本文认为分布式 CRN 多路径路由协议在以下几个方面还有待进一步深入研究:

(1) 从 CR 应用目标考虑,提高频谱利用率是多路径路由设计的基本要求;

(2) 针对 PU 活动的影响,多路径路由协议应考虑 SU 节点与 PU 共存问题,设计多路径路由与频谱分配联合跨层优化框架,解决 SU 节点频谱切换对多路径并行传输时延带来的影响;

(3) 针对网络拓扑约束,多路径路由协议应对网络拓扑具有动态自适应性,实现网络拓扑控制与频谱分配建模联合优化;

(4) 针对网络拓扑的割裂性与网络孤岛存在,建立可调度接触的预测模型,创建接触调度度量尺度,揭示接触调度关系与接触可预测机理;

(5) 针对 SU 节点接入的随机性、频谱接入的动态性以及 SU 节点较强的接入自私性和转发自私性等特征,表征单路径负载流量分配粒度,采用随机动态优化数学工具建立转发 SU 节点多目标约束下流量分配效用函数,使得在利用多路径传输实现负载均衡的同时,优化多个目标,兼顾负载均衡和多目标优化。

参考文献:

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] AKYILDIZ I F, LEE W Y, CHOWDHURY K R. CRAHNS: cognitive radio ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(5): 810-836.
- [3] GONG S, WANG P, LIU Y, et al. Robust power control with distribution uncertainty in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(11): 2397-2408.

- [4] XUE D, EKICI E, VURAN M C. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks using multidimensional correlations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(4): 1832-1843.
- [5] 王苗苗,李世银,肖淑艳,等. 基于改进 D-S 证据理论的认知无线电频谱感知算法[J]. 电讯技术, 2012, 52(8): 1303-1307.
WANG Miaomiao, LI Shiyin, XIAO Shuyan, et al. Spectrum sensing algorithm in cognitive radio networks based on the improved D-S evidence theory[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(8): 1303-1307. (in Chinese)
- [6] ZHANG N, LIANG H, CHENG N, et al. Dynamic spectrum access in multi-channel cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(11): 2053-2064.
- [7] YI C, CAI J. Two-stage spectrum sharing with combinatorial auction and Stackelberg game in recall-based cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(11): 3740-3752.
- [8] TIMMERS M, POLLIN S, DEJONGHE A, et al. A distributed multichannel MAC protocol for multihop cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(1): 446-459.
- [9] ZHANG S, ZHAO H, WANG S, et al. A cross-layer rethink on the sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(7): 1226-1229.
- [10] YOUSSEF M, IBRAHIM M, ABDELATIF M, et al. Routing metrics of cognitive radio networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1): 92-109.
- [11] CESANA M, CUOMO F, EKICI E. Routing in cognitive radio networks: challenges and solutions[J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(3): 228-248.
- [12] 滑楠,曹志刚. 认知无线网络路由研究综述[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 910-918.
HUA Nan, CAO Zhigang. Routing research of cognitive radio networks: a survey[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 910-918. (in Chinese)
- [13] SHI Y, HOU Y T, ZHOU H, et al. Distributed cross-layer optimization for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(8): 4058-4069.
- [14] DING L, MELODIA T, BATALAMA S N, et al. Cross-layer routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1969-1979.
- [15] ZHU G M, AKYILDIZ I F, KUO G S. STOD-RP: a spectrum-tree based on-demand routing protocol for multi-hop cognitive radio networks[C]//Proceedings of

- IEEE GLOBECOM 2008. New Orleans, USA: IEEE, 2008:1-5.
- [16] ZHANG L, ZHOU X, GUO J. Noncooperative dynamic routing with bandwidth constraint in intermittently connected deep space information networks under scheduled contacts[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 68(4):1255-1285.
- [17] 顾金媛, 章国安, 包志华. 认知无线 Mesh 网络联合多路径路由和信道分配策略[J]. 计算机科学, 2011, 38(5):45-48.
GU Jinyuan, ZHANG Guoan, BAO Zhihua. Joint multipath routing and channel allocation strategy in cognitive wireless mesh networks[J]. Computer Science, 2011, 38(5):45-48. (in Chinese)
- [18] JUANG T Y, CHEN Y S, HSU C L. An efficient multi-path routing scheme for cognitive ad hoc networks[C]//Proceedings of 7th 2011 IEEE International Conference on Ubi-Media Computing. Ulaanbaatar, Mongolia: IEEE, 2014:231-237.
- [19] BELTAGY I, YOUSSEF M, EL-DERINI M. A new routing metric and protocol for multipath routing in cognitive networks [C]//Proceedings of 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Cancun, Mexico: IEEE, 2011:974-979.
- [20] ABBAGNALE A, CUOMO F. Gymkhana: a connectivity-based routing scheme for cognitive radio ad hoc networks[C]//Proceedings of INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops. San Diego, USA: IEEE, 2010:1-5.
- [21] LIN S C, CHEN K C. Statistical QoS control of network coded multi-path routing in large cognitive machine-to-machine networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2015(99):1.
- [22] LIN L, JI T. Stable-aware traffic assignment for multi-path routing in cognitive radio ad hoc networks[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. Beijing: IEEE, 2011:511-514.
- [23] LI G, ZHONG X F, ZOU S H. Traffic assignment algorithm for multi-path routing in cognitive radio ad hoc networks [C]//Proceedings of 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Shanghai: IEEE, 2013:1168-1173.
- [24] QI C, ERIC C T. Efficient routing and scheduling in ad-hoc cognitive radio networks[C]//Proceedings of 2014 National Wireless Research Collaboration Symposium. Idaho Falls, USA: IEEE, 2014:37-42.
- [25] GULER E, SADREDDINI Z, CAVDAR T. Multi-path route discovery algorithm for cognitive radio ad hoc net-

works using algebraic connectivity[C]//Proceedings of 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Prague, Czech Republic: IEEE, 2015:54-59.

作者简介:



张 龙(1983—),男,河北邯郸人,2012年于北京科技大学获工学博士学位,现为河北工程大学信息与电气工程学院讲师、硕士生导师,主要研究方向为认知无线电、车联网、空间通信、无线网络资源优化调度等;

ZHANG Long was born in Handan, Hebei Province, in 1983. He received the Ph. D. degree from University of Science and Technology Beijing in 2012. He is now a lecturer and also the instructor of graduate students. His research concerns cognitive radio, internet of vehicles, space communications, and resource allocation in wireless networks.

Email: zhanglong@hebeu. edu. cn

白春红(1989—),女,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向为认知无线电、延迟容忍网络、多路径路由等;

BAI Chunhong was born in Hengshui, Hebei Province, in 1989. She is now a graduate student. Her research concerns cognitive radio, delay tolerant networks and multi-path routing.

Email: chunhong. bai@ yahoo. com

许海涛(1984—),男,山东东营人,2014年于北京科技大学获工学博士学位,现为北京科技大学计算机与通信工程学院讲师,主要研究方向为下一代网络、博弈论、认知无线电等;

XU Haitao was born in Dongying, Shandong Province, in 1984. He received the Ph. D. degree from University of Science and Technology Beijing in 2014. He is now a lecturer. His research concerns next generation networks, game theory, and cognitive radio.

Email: xuhaitao@ustb. edu. cn

卓 凡(1990—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为认知无线电、路由跨层优化等;

ZHUO Fan was born in Xuzhou, Jiangsu Province, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns cognitive radio and cross-layer optimization in routing.

Email: fan. zhuo@ hotmail. com

黄 伟(1980—),男,河南林州人,2010年于北京科技大学获工学硕士学位,现为工程师,主要研究方向为下一代网络、智能控制、移动计算等。

HUANG Wei was born in Linzhou, Henan Province, in 1980. He received the M. S. degree from University of Science and Technology Beijing in 2010. He is now an engineer. His research concerns next generation networks, intelligent control, and mobile computing.

Email: huangwei2@epri. sgcc. com. cn