文章编号:1001－893X(2010)03－0090－09

认知无线电网络链路层关键技术的研究进展*

刘 全,高 俊,关建新,郭云玮

(海军工程大学 通信工程系,武汉 430033)

摘 要:构建认知无线电网络是解决频谱资源日趋紧张问题的根本途径。为实现无干扰的伺机频谱共享,认知无线电网络的链路层不仅需要提供传统的数据传输服务,还必须支持一套与频谱非均匀特性相适应的新功能。对这些新功能所需的关键技术进行了归纳,分别从协作感知、感知机制优化、动态频谱接入、动态频谱分配、跨层设计及安全机制等 6 个方面进行了探讨,重点对这些关键技术的最新研究进展进行了总结和分析,并讨论了下一步的主要研究方向。

关键词:认知无线电网络;链路层;协作感知;感知机制;动态频谱接入;频谱分配;跨层设计

中图分类号:TN92 **文献标识码**:A doi:10.3969/j.issn.1001－893x.2010.03.020

Survey on Linker Layer Key Technologies in Cognitive Radio Networks

LIU Quan, GAO Jun, GUAN Jian-xin, GUO Yun-wei

(College of Communication Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Cognitive Radio Network (CRN) has emerged as a promising paradigm to solve the increasingly serious spectrum scarcity problem. To share the existing licensed spectrum opportunistically without interference, the linker layer of CRN, besides providing the traditional services for data transmission, is required to support an entirely new set of functionalities. A survey on the key technologies required by these functionalities is given in this paper, with focus on six aspects in particular, including cooperative sensing, sensing mechanism optimization, dynamic spectrum access, dynamic spectrum allocation, cross-layer design, security design. Based on the summaries and analysis of the latest development, directions of the future work are investigated.

Key words: cognitive radio network; linker layer; cooperative sensing; sensing mechanism; dynamic spectrum access; spectrum allocation; cross-layer design

1 引 言

认知无线电网络(Cognitive Radio Networks, CRN)是一种基于主－次分层接入共享模型[1]的智能无线动态通信系统,为解决如何在有限的频谱资源条件下提高频谱利用率这一无线通信难题开辟了一条新的途径,但是它真正走向应用尚有许多关键问题未得到有效解决。图 1 为当前在业界得到广泛赞同的一种 CRN 典型功能分层模型[2],目前的研究主要集中在物理层和链路层,尤其在物理层上取得了很大进展,而链路层作为实现动态频谱共享的最关键一层,已经成为当前各国学者对 CRN 研究

* **收稿日期**:2010－01－18;**修回日期**:2010－03－03
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2009AAJ208, 2009AAJ116)
Foundation Item: The National High-tech Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2009AAJ208, 2009AAJ116)

的最热门方向，因为链路层不仅要提供传统的媒体接入控制和健壮的数据传输等服务，还必须适应CRN 中频谱及用户的非均匀分布特性而支持一套全新的功能，实现无干扰的伺机接入频谱共享。如图 1 所示，这些新的功能需要协作感知、感知机制优化、动态频谱接入、动态频谱分配、跨层设计、安全机制等关键技术的支持[1-3]。本文将分别对这些关键技术的最新研究进展情况进行总结和分析，在此基础上明确提出下一步的主要研究方向。

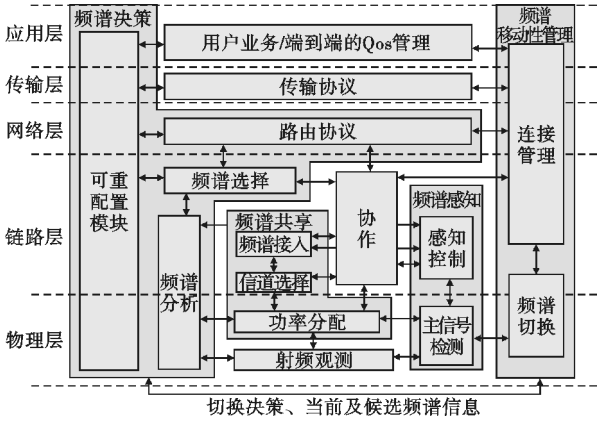

图 1 认知网络的功能分层模型

Fig. 1 Funcionality framework for CRN

2 协作感知技术

频谱感知分为物理层感知和 MAC 层感知两层[4]。物理层感知主要涉及各种感知算法，大多移植自信号检测理论，如能量检测、匹配滤波检测、循环特征检测等[1]；而 MAC 层主要是用于控制物理层频谱感知算法的执行，并完成不同次用户的感知协作，以提高感知的可靠性和效率。目前，国内外对MAC 层感知技术的研究主要集中在协作感知和感知机制优化两个方面，本节将讨论协作感知技术。

协作感知技术作为物理层感知算法的补充，主要用于改善阴影及衰落信道环境中的隐藏终端问题[1,5]和噪声不确定性问题[6]，提高协同增益和减小系统开销是研究的主要目标，先进的协作感知策略以及信息融合算法是解决这两个问题的重要环节。

2.1 协作感知策略研究

现有文献中采用的协作感知方案主要有 3 类。

(1)集中式协作感知

这种协作策略的原理最为简单，各个节点分别感知，然后由中心基站完成数据融合。Cabric 等人最早于 2004 年开始介入这方面的研究，重点分析了协作参数的选取以及阴影相关性对协作性能的影响[6]。随后，Ghasemi 重点分析了 Rayleigh 等衰落信道环境下，基于不同融合准则的集中式协作方式的协作性能[5,7]，并首次探讨了融合开销与协作性能的权衡问题[5]。现有文献大部分都采用这种协作方式，重点研究其中的数据融合算法，但是对于其中关键的控制信道问题涉及不多。

(2)基于中继转发的分布式协作感知

最早是由 G. Ganesan 等人在 2007 年提出的[8]，其主要思想是网络中的各次用户以 TDMA 方式分别进行通信，一旦某个次用户检测到主用户发射机信号，则它在下个时隙发送本身信号同时转发收到的主信号以通知邻近的其它次用户，然后再退出该频段。这种方法在获得协作增益的同时简化了 CRN 的网络结构，但转发信号需要占用较多带宽，不利于频谱效率的提高。

(3)基于分簇的分布式协作感知

主要思想来源于现有 Ad Hoc 网络的分簇算法，将分散的节点按一定规则分簇后，通常采用两级感知，簇内采用以簇头为中心的集中式协作感知，簇头之间利用通用控制信道交互或者也可通过更高一层的中心点进行数据融合[9]。在 Ad Hoc 网络中主要侧重于通过分簇提高能量有效性；但 CRN 中主要侧重于通过分簇提高协作检测性能，目前专门针对 CRN 的分簇算法比较少，典型的如文献[9-10]。在 CRN 的动态频谱环境下，综合考虑频谱可用性、节点移动性、信道的占用规律，对现有分簇算法进行优化，从而有效管理用户，最终提高检测效率和精度，是下一步需要重点解决的问题。

2.2 信息融合算法研究

现有的大多数协作感知方案都需要进行信息融合，目前这方面的文献很多，其算法大都是从现有的信息融合理论中移植过来的，归纳起来，大体可分为 3 类，如表 1 所示。

上述融合算法中，数据融合与传统的多天线空间分集技术概念类似，最大限度地保留了各检测节点的信息，因此可靠性最高，但是所需的控制信道带宽、协作开销非常大，实用性很有限。决策硬融合算法实现最为简单，是协作开销最小、带宽最为节省的算法，但是协作增益十分有限，在信道环境不均匀或者存在恶意节点的情况下容易造成协作性能急剧恶化，例如，当网络中存在恶意攻击导致某些节点始终

表 1　典型的信息融合算法分类

Table 1 Summary of typical information fusion algorithms

类别	基本原理	典型算法
数据融合	本地节点直接将原始或压缩过的检测数据发送给中心节点进行加权融合。	①经典的分集方案:EGC、MRC、SC、SSC[11,12]; ②等效似然比检测的最优数据融合 LRT-OC[12]; ③基于最大偏转系数的加权数据融合 DC[13]; ④基于贝叶斯最小冒险的加权数据融合 Risk[13]。
决策硬融合	各节点以 1 bit 形式(1 或 0)作出本地决策送入融合中心,并被同等对待进行融合处理。	①AND,OR,K/N 3 种硬融合准则[5,7]; ②基于双门限检测的 n-ratio Logic 融合[14]。
决策软融合	本地节点做出 1 个或几个比特形式的决策后,中心节点采用加权求和或者其它规则对这些信息进行融合。	①基于 Chair-Varshney 准则的决策加权融合[15]; ②动态决策加权融合[16]; ③2 bit 量化决策加权软融合算法[17]; ④基于模糊综合评估的决策软融合[18]; ⑤基于 D-S 证据理论的融合算法[19]。

上报“1”,则 OR 融合将失效,误认为频谱始终被占用而浪费了大量频谱机会。虽然文献[14]提出了基于双门限能量检测的“n-ratio”硬融合算法可有效缓解这一安全问题,但是可能出现 fail sensing 的情况,即当所有次用户的检测结果都处于两个检测门限之间的不确定态时,将没有决策上报,导致协作感知失效。相比之下,决策软融合是比较理想的一类算法,大多数都考虑了实际中不同信道条件下各节点的检测结果的可信度并不一样,而且能够在协作增益和协作开销之间取得合理折衷。但是现有的这类算法中大部分都需要检测节点和授权用户的先验信息,例如检测节点的信噪比、检测概率和虚警概率等[15],而在实际应用中,这些先验信息又是很难得到的。针对此问题,文献[19]引入了 Dempster-Shafer′s(D-S)证据理论进行融合,无需知道各种先验信息,仅依靠节点本身的检测结果提取证据上报,然后依据一定的计算规则得到总体检测可信度再作出最终判决;Jun Ma 等人也提出了一种 2 bit 量化决策加权软融合算法,各次用户以 3 个判决门限将整个观测能量分为 4 个区域,对应不同的加权系数,每次检测结果以 2 bit 形式表示,融合中心将所有决策加权求和后进行判决,能够获得与数据融合相近的协作性能[17]。

基于以上分析,下一步的研究应侧重在第三类算法上,除了对基于证据理论和多比特量化的决策融合算法进行改进外,还可引入动态加权的方法[16],并综合考虑信道占用规律、不同节点的感知时延差以及本地检测与融合之间的时延差,使协作感知方案更趋于实用。

3　感知机制优化

感知机制的优化也称作频谱感知控制,最早是由 Ghasemi[20] 和 Hyoil Kim[4] 等人提出来的,主要关注感知模式和感知参数的选取及其优化[4,6,20-25]。

在次用户伺机接入过程中,感知过程可以分为两种场景,首先要搜索各个信道寻找可用频谱,即信道搜索场景;然后从可用频谱中选择所需频段进行传输,为避免对重新出现的主用户造成干扰,需周期性地监视主用户信号是否出现,这种场景称为信道监测。

按照次用户检测时机的不同,频谱感知又可分为主动感知模式(Proactive sensing)和被动感知模式(Reactive sensing)[4]。主动感知模式下,不管是否有数据传输需要,次用户都周期性地检测各个信道,且可同时使用多个子信道以 OFDM 方式进行多带传输。被动感知模式下,次用户只有在需要进行数据传输时才启动感知,所以也被称为按需感知,次用户通常只能使用一个空闲信道进行传输。无论是主动还是被动感知都必须考虑频谱快速移动性问题,以避免对重新出现的主用户造成干扰,所以两种模式下都必须周期性监视当前正在使用的信道,一旦信道不可用则启动按需搜索,即次用户在搜索过程中一旦搜索到可用信道,就停止搜索,并切换到该信道开始传输。因此归纳起来,主动感知=周期感知+周期性监测+按需搜索,被动感知=按需感知+周期性监测 + 按需搜索。虽然主动感知需要周期性检测多个信道,检测开销比被动感知要大很多,但是优点也非常明显:一方面可大大提高次用户的传输速率,避免次用户频繁地被迫转入信道重新搜索导致 QoS 下降;另一方面由于周期性检测多个信道积累了大量频谱信息,所以重新按需搜索进行切换的时间更短。

目前，感知机制优化方面的文献不是很多，属于近年来 CR 技术中比较前沿的问题。2007 年，文献[20]中主要讨论了单个信道搜索时间 Ts 和感知时长 Tm 的选取对于感知过程的速度与质量之间权衡的影响。在信道搜索场景中，分析了信道平均搜索时间 T_{search}（代表搜索速度）和 Ts（代表搜索质量）之间的关系。为了在速度和质量之间找到权衡，在满足主系统的干扰限制条件前提下，通过最小化 T_{search}，找到最优的搜索时间 Ts；然后在信道监测阶段，为使次用户的平均吞吐量最大，寻找最优化的 Tm。该文献的主要缺陷在于：只考虑了非协作、被动感知的情况，因此空闲频谱利用率和次用户的平均吞吐量较低；假设了不同信道的 Ts 和 Tm 相同，没有考虑搜索次序的优化，这些都不是很合理。

2008 年，Hyoil Kim 研究了非协作、主动感知模式下的频谱感知机制，通过对各个信道分别选取最优的感知周期，使发现频谱机会的概率最大；提出按照过渡概率从大到小的最优信道搜索次序，使次用户在整个信道切换过程延迟最小；并对信道占用的模型参数进行最大似然和置信区间估计，考虑其时变性对以上两个优化问题的影响。该文献的不足在于：在对检测周期的优化中，只考虑发现频谱机会的最大化，而没有考虑对主用户系统的干扰影响。另外，该文献虽然对各个信道的感知周期分别进行设定，但周期都是固定不变的，因此本质上仍然属于异步固定周期感知。作为固定周期感知机制的推广，文献[22]提出了一种基于可变检测周期（FSP）的检测机制，在信道状态可能发生变化的区域缩小检测周期，提高检测效率，体现了周期变化的灵活性。文献[24]引入了随机检测机制，并提出了更具一般性的检测周期优化模型，同时考虑了实际应用中由物理层检测算法局限性引起的检测错误，以及为避免与主用户冲撞引入的次用户延迟占用等情况对检测周期优化的影响。

2009 年，文献[21]对基于能量检测算法的集中式协作、主动感知模式下的感知机制进行了优化，主要讨论了 3 个问题：

(1)在信道监测场景下，多个次用户采用主动、协作方式对多个子信道进行周期性监测，通过对各子信道的检测周期的最优化选择，使总的感知代价最小，此处总的感知代价综合考虑了因检测算法的制约而漏失的频谱机会，因检测过程需暂停传输而浪费的频谱机会，以及对主系统的干扰概率；

(2)在信道监测场景下，通过对子信道的个数、各子信道感知时长的优化，使系统的总吞吐量最大；

(3)在信道搜索场景下，通过对各个信道的搜索时间进行加权优化，在满足搜索条件限制和主系统的 QoS 限制条件下，使平均搜索时间（即信道切换延迟）最小。

该文献的主要缺陷在于：在搜索过程中，直接采用了连续搜索方式，而没有对搜索顺序进行优化。

上述文献中虽然对感知机制的优化进行了较为深入的研究，但都或多或少存在一些不足，比较共性的问题是：仅把信道占用模型简单地建模为一个 ON/OFF 型随机过程，而且大部分都是基于能量检测算法的感知机制优化；另外，上述文献在静默期的设置方面研究相对较少，没有明确讨论次用户检测某一频谱时，系统内其它工作于这个频段的次用户是否会对它的感知过程造成影响。基于以上分析，下一步应重点针对不同的信道占用模型和应用场景，着力研究协作环境下基于不同感知算法的感知模式及感知参数的优化。

4 动态频谱接入控制

动态接入控制的功能是确定次用户是否可以接入网络及采用何种策略和协议接入，是实现资源优化分配的基本前提[3]。

4.1 接入方式的选择

考虑到与现有网络的兼容性，认知网络一般都采用伺机接入的分层共享模型[1]，由于主用户对信道具有绝对优先权，次用户是否占用频谱对主用户来说完全透明，即当主用户再次出现时，次用户要主动及时地腾出正在使用的信道，否则将会和主用户发生碰撞，甚至被强制中断。所以如何采用灵活的接入控制策略尽可能减少主－次用户之间的碰撞是关注的重点。目前，主要有两种透明接入方法：一种是基于信道预留的透明接入，其核心思想是预留一部分频谱资源给主用户或次用户专用，以达到减小碰撞的目的，但却是以损失一定的频谱效率为代价的[3]；另一种是基于预测的透明接入，次用户通过预测信道的特性，如主用户的占用规律、频谱空穴可能出现的位置及时长等，主动选择满足要求的最佳接入机会，降低可能与主用户冲撞的概率。预测的方法可以是基于历史信息的简单估计，也可以是一些相对复杂的人工智能算法[3]，如利用 Markov 模

型[26]、部分可观测 Markov(POMDP)模型[27],或者隐马尔可夫模型(HMM)[28]对主用户的频谱占用行为进行跟踪和预测等。虽然类似的基于预测接入方法非常多,但是大都停留在理论仿真阶段,实用性还有待在具体的测试平台上检验。

4.2　MAC 协议

次用户接入某个频段时,其收发两端以及相邻次用户(或者与基站)之间必须通过一定的 MAC 协议来完成一系列的交互,比如:协作信息、工作参数等。目前主要的 MAC 协议分为 3 类[29],包括随机接入协议(Random Access)、固定时隙接入协议(Time Slotted)、混合接入协议(Hybrid)。这些协议与认知网络的拓扑结构以及用户需求密切相关,例如在 802.22 标准中采用的就是集中方式的 Time Slotted 协议[30]。MAC 协议还需要考虑全局或本地通用控制信道的支持,这方面的文献很多,文献[29]对此做了详细总结。主要难点在于[2]:

(1)时间同步性:Sltotted 和 Hybrid 协议都需要对控制和数据信道进行时间同步,但是这对于分布式的拓扑结构比较困难,因为需要大量的协作开销使得频谱利用率降低;

(2)感知支持问题:主要是避免其它次用户信号对检测的影响,一般通过设置静默期或者静默区域,或者采用多个收发器来解决。

5　动态频谱分配

频谱分配也被称为信道分配,主要功能是将检测得到的空闲频谱资源公平而有效地分配给多个次用户。与其它无线通信系统中的资源分配问题的最主要区别在于动态性和实时性要求。提高实时性体现在降低算法复杂度、减小信令开销等多个方面[3]。另外一个重要特点就是,必须满足各个主、次用户的干扰限制条件。现有的分配算法中主要基于两种干扰模型:二进制干扰模型和聚合干扰模型。前者将每个次用户对主用户的干扰简化为 2 种干扰结果,用 1 表示干扰,0 表示不干扰;而后者考虑多个次用户同时发射的累积作用,用干扰温度来衡量累积结果。目前的文献中主要有基于图论和基于博弈论两大类频谱分配算法。

基于图论的方法主要是建立在二进制干扰模型上,将信道分配问题近似等效为一个无向图的着色问题(Graph Coloring Problem,GCP),主要区别在于:传统 GCP 问题着重以最少的颜色给图中所有的顶点着色,一般每个顶点的可选颜色集合相同;而频谱分配的优化目标一般都是针对网络的频谱利用率及分配公平性[31],而且各个顶点的可选颜色和收益不同(频谱空洞分布不均匀且不同频带具有不同带宽和吞吐量),相邻顶点不能同时着色为相同颜色,所以通常称为颜色敏感型图着色问题(Color-sensitive graph Coloring Problem,CSGCP)[31]。

在基于图论的信道分配算法方面,Zheng Hai-Tao 等人做了大量工作[31-33],主要提出了 3 种较为经典的算法,其算法思想和性能分析如表 2 所示。

表 2　几种典型的基于图论的频谱分配算法

Table 2 Several typical algorithms of spectrum allocation based on graph theory

典型算法	基本思想及性能分析
基于标签机制的分配算法[31]	针对系统总带宽最大化等 3 种不同的优化目标,给出了 7 种计算标签值和着色的规则,每次选出标签值最大点对应地着色,剔除该颜色后更新各节点标签值选出新顶点着色,以此类推直至所有顶点的可用颜色列表为空。该算法原理简单,适用于集中式或者分布式的网络,但是复杂度较高,需要进行大量的信息交互,相应的分配开销和延时都比较大,所以对特性变化快、能量限制严格的网络环境不适用[31]。
基于本地议价机制的信道分配算法[33]	在标签算法的基础上引入了 local Bargaining 机制,将发生变动的那些节点自组织成 Bargaining 群,仅对 Bargaining 群进行重新分配优化,而不影响其它节点的工作。该算法适用于分布式网络,具有和标签机制算法相近的系统性能(频谱利用率稍微差一点),但是算法的复杂度和通信开销却降低了 50%以上[33]。
基于规则的分配算法[32]	各个节点通过观察本地的频谱使用情况和相邻节点的动作,依据预先设定的适用于不同场景的规则独立决策选择信道,从而使系统的频谱利用率、公平性、复杂度和通信开销取得折衷,该算法适用于分布式网络,在通信性能牺牲很少的情况下,算法复杂度、通信开销相对于标签和本地议价算法分别降低了 60%和 240%[32]。

其他学者在基于图论的分配算法方面的研究主要是对 Zheng 等人工作的完善和推广,例如,文献[34]提出一种并行分配算法,把复合图分解为多个独立的简单子图,利用标签机制同时对多个子图着色,由于该算法的开销不受可用频谱数量的影响,因此更适用于大规模系统的频谱分配。文献[35]将次用户的频谱需求引入到标签值计算和公平性优化目标中,结果表明,新的标签规则所获得的系统公平性

比现有规则提高。

基于博弈理论的分配算法大都是建立在聚合干扰模型之上，主要研究共用式信道分配[3]，即多个次用户之间以干扰避免方式来分配有限的频谱资源。由于多个次用户可共同占用同一段频谱，因此如何减小同频干扰，最大化次用户的收益是着力解决的问题。2005 年，Nie Nie 等人在接收机信干比(SIR)模型的基础上，针对协作和非协作两种场景，分别提出了两种博弈模型来解决其中的信道分配问题。在协作场景下，各个用户的决策同时考虑本身所受干扰大小及其对其它所有次用户的干扰，由此建立了势力场博弈模型(Potential Game Formulation)。该模型能够快速收敛于纯策略纳什均衡；针对非协作场景，由于势力场博弈模型不再适用，所以建立了一种更通用的基于无悔学习算法(No-regret Learning)的混合策略博弈模型。在该模型下，每个次用户同时以非零概率选择多个纯策略(即作出混合决策)，通过多次重复执行该算法，次用户可以学会如何决策才能使收益最大。虽然势力场博弈模型在平均吞吐量、分配公平性等方面的性能稍强，但是仅适用于协作场景，节点间需要大量的信息交互；而基于无悔学习算法的博弈模型通用性更强，节点间信息交互较少。另外，文献[36]提出了一种基于无悔学习算法和相关均衡的博弈模型，结果表明，应用相关均衡的频谱利用率比应用纳什均衡高 5%～15%，而且分配公平性更好。

现有的频谱分配算法多数缺乏实用性，有待改进的地方主要体现在：

(1)基本上都没有考虑次用户的发射对主用户的干扰情况，只着重研究不同次用户之间的干扰；

(2)大部分基于图论的算法将相互干扰简单地建模为二进制干扰模型，适用性非常有限；

(3)很少考虑功率控制问题，大部分直接假设了各个次用户的发射功率相同；

(4)大多数没有考虑次用户的需求，很可能造成大量频谱分配给某些业务量小的用户，或者分配的频谱始终无法满足 QoS 最低要求而造成严重浪费。

6 跨层设计

上述各项链路层的关键技术一般都是局限于图 1 给出的典型分层协议模型，考虑到认知环路的大部分功能都需要链路层的配合才能得以完成，如频谱感知不仅需要物理层的感知算法，还需要链路层的协作和控制以提高感知精度和效率；频谱决策更是需要结合应用层的 QoS 需求、网络层的路由设计、链路层调度，以及物理层的频谱分析共同完成，因此许多学者都主张将链路层的各项功能与其它各层进行联合跨层设计。

在与链路层相关的跨层设计中，除了典型的感知技术跨层设计外，目前研究最多的是联合资源分配，其主要思想是：根据次用户的优先级、QoS 等要求，公平而有效地动态分配检测到的空闲频谱资源，并动态控制其发射功率，在保证各次用户间的相互干扰及其对主用户的干扰都在限制范围内的前提下，使网络性能逼近于最优状态。文献[37]提出了基于检测贡献的加权频谱分配算法，将频谱分配和物理层的频谱感知联合设计，为在频谱检测中作贡献大的次用户分配更多的频谱，最大化系统吞吐量的同时体现分配的公平性。文献[38]在集中式网络结构中，以最大化系统吞吐量为目标，建立了功率和信道联合优化分配问题的数学模型，并利用非线性规划方法提出了快速算法进行求解，该算法与穷举搜索的最优结果相近。2009 年，Simon Haykin 等人讨论了非协作体制下，基于 OFDM 传输方式的分布式认知无线电网络的资源分配问题[39]。由于子载波功率的有无决定了以该载波为中心的信道是否能被分配，因此可将信道和功率分配统一归结于对各个子载波带的动态功率控制问题。由于认知网络的动态特性，传统迭代注水算法在某些极端情况下将无法收敛于纳什均衡，针对此问题，提出了一种基于最大－最小理论的稳健型迭代注水算法，将最差干扰条件下的迭代注水问题等效于一个变分不等式问题(Variational Inequality Problem，VI 问题)，并证明了在一定条件下存在唯一的纳什均衡点。该算法以牺牲一定的网络吞吐量换取稳健性的提高，所以属于保守型算法。

以上这些联合资源分配算法主要涉及到物理层和链路层，基本没有考虑上层设计。在链路层与应用层的跨层设计方面，文献[40]基于重复博弈理论设计了一种分布式动态信道和功率的联合分配算法。每个次用户根据应用层的 QoS 需求和本地信息，以最大化净收益为目标(定义净收益＝信道最大容量－被干扰代价－干扰温度代价)，进行分布式信道选择和功率分配。该算法具有较好的收敛性，在系统频谱效率和业务 QoS 之间进行有效折衷，能够

实现资源的有效利用,避免出现资源分配给某个用户后却不能满足其 QoS 最低要求而造成浪费的情况,因此更适用于异构网络和业务的应用。

在链路层与网络层跨层设计方面,文献[41]提出一种合作式路由选择和频谱分配的跨层解决方案,在选择路由的同时,调度每段路由上无冲突信道的使用,使得路由的稳定性和端到端的吞吐量得到提高。

在链路层与传输层跨层设计方面,文献[3]指出 TCP 协议可根据链路层的频谱分配情况自适应地调整传输往返时间(RTT)和恢复时间目标(RTO)参数,以避免频谱的动态变化对 TCP 协议超时重传机制带来的不利影响。

在 CRN 的分层功能模型中,频谱决策和频谱移动性管理涉及到几乎所有层的跨层设计(见图 1),目前这两方面突破性的研究成果较少,主要难点在于建立全面的频谱决策模型和移动性管理机制。

7　安全机制

认知无线电技术虽然可大大缓解频谱资源短缺的问题,但同时也使无线网络面临许多新的安全隐患,这其中与链路层相关的安全问题主要包括偏袒效用攻击、异步感知攻击、虚假反馈攻击、饱和控制信道攻击 4 种可能的形式[3, 42]。

这些安全问题一般都是由自私或恶意用户节点对 MAC 帧的修改和伪造造成的。针对这些问题,在集中式网络中可增加对 MAC 帧的认证机制,例如 IEEE 802.22 提出的基站/用户端协议参考模型就内嵌了模块化安全子层,用来保护数据、认证频谱感知与定位信息以及频谱管理实体的配置信息等。但是在分布式 CRN 中,由于缺乏可信的实体作为服务器控制密钥分发来进行加密认证和完整性保护,应用安全子层非常困难,因此,更适合采用相邻节点监视机制[3, 42]。现有文献对链路层相关的安全问题大多处于摸索讨论阶段,实质性成果不多。

8　结　论

综上所述,认知无线电网络的发展还处于初级阶段,许多问题都还有待于深入研究,尤其是其中的链路层关键技术更是需要关注的重点和难点。随着各国政府和研究机构对认知无线电技术的研究热情越来越高,投入越来越大,相信在不远的将来,这些难点问题将会被一一攻克,认知无线电网络的实用化和商用化将指日可待。

参考文献:

[1] ZHAO Q, SADLER B M. A survey of dynamic spectrum access[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007,24(3):79－89.

[2] AKYILDIZ I, LEE W, CHOWDHURY K. Spectrum management in cognitive radio ad hoc networks[J]. IEEE Network,2009,23(4):6－12.

[3] 曾志民,郭彩丽. 认知无线电网络的 MAC 层关键技术[J]. 中兴通讯技术,2009(2):20－24.
ZENG Zhi－min, GUO Cai－li. MAC Layer Key Technologies of Cognitive Radio Network[J]. ZTE Communications,2009(2):20－24.(in Chinese)

[4] KIM H, SHIN K G. Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC－Layer Sensing in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2008,7(5):533－545.

[5] GHASEMI A, SOUSA E S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: The cooperation processing tradeoff[J]. Wireless Communications and Mobile Computing,2007,7(9):1049－1060.

[6] CABRIC D, TKACHENKO A, BRODERSEN R W. Spectrum Sensing Measurements of Pilot, Energy, and Collaborative Detection[C]//Proceedings of IEEE Military Communications Conference. [S. l.]: IEEE, 2006:1－7.

[7] GHASEMI A, SOUSA E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments [C]//Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. [S. l.]:IEEE,2005:131－136.

[8] GANESAN G, LI Y. Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio, Part I: Two User Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007,6(6):2204－2213.

[9] SHEN B, ZHAO C, ZHOU Z. User clusters based hierarchical cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//Proceedings of 4th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. Hannover:[S. n.],2009:1－6.

[10] SUN C, ZHANG W, LETAIEF K B. Cluster-Based Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. [S. l.]: IEEE, 2007: 2511－2515.

[11] DIGHAM F F, ALOUINI M, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. [S.l.]:IEEE,2003:3575－3579.

[12] MA J,ZHAO G,LI Y. Soft Combination and Detection for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2008,7(11):4502－4507.

[13] SHEN B, KWAK K S. Soft Combination Schemes for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks[J]. ETRI Journal,2009, 31(3): 263－270.

[14] SRIVASTAVA S K, BANERJEE A. n-ratio logic based cooperative spectrum sensing using double threshold energy detection [C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. [S.l.]:IEEE,2009:1－6.

[15] PEH E, LIANG Y. Optimization for cooperative sensing in cognitive radio networks[C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Kowloon, China: IEEE,2007:27－32.

[16] HUANG X, HAN N, ZHENG G, et al. Weighted-collaborative spectrum sensing in cognitive radio [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Communications and Networking in China. Shanghai, China:IEEE,2007:110－114.

[17] MA J, LI Y. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. [S.l.]:IEEE,2007:3139－3143.

[18] YANG W, YE Y, CAI Y, et al. A collaborative spectrum sensing scheme using fuzzy comprehensive evaluation in cognitive radio[J]. Journal of Electronics (China),2009, 26(3): 326－331.

[19] 向晓. 基于认知无线电的频谱感知技术的研究[D]. 吉林:吉林大学, 2009.
XIANG Xiao. Researches of spectrum sensing technology based on cognitive radio[D]. Jilin:Jilin University, 2009. (in Chinese)

[20] GHASEMI A, SOUSA E S. Optimization of spectrum sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks[C]//Proceedings of 4th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas, United states: IEEE, 2007:1022－1026.

[21] 郭晨,彭涛,王文博. 认知无线电网络中合作频谱感知机制的优化[J]. 电子与信息学报,2009, 31(7): 1525－1530.
GUO Chen, PENG Tao, WANG Wen-bo. Optimization of cooperative spectrum sensing mechanisms in cognitive radio networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(7): 1525－1530. (in Chinese)

[22] 张宇,冯春燕,郭彩丽. 基于可变间隔的认知无线电频谱检测机制[J]. 北京邮电大学学报,2008, 31(2): 128－131.
ZHANG Yu, FENG Chun-yan, GUO Cai-li. A flexible sensing period mechanism of spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(2):128－131. (in Chinese)

[23] LIANG Y, ZENG Y, PEH E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008,7(4):1326－1337.

[24] GUO C, ZENG Z, FENG C, et al. Random periodic spectrum sensing with sensing period optimization for cognitive radio networks [C]//Proceedings of 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems. Singapor:IEEE,2008:1504－1508.

[25] LEE W, AKYILDIZ I F. Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(10):3845－3857.

[26] XING Y, CHANDRAMOULI R, MANGOLD S, et al. Dynamic spectrum access in open spectrum wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2006,24(3):626－637.

[27] ZHAO Q, TONG L, SWAMI A, et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2007, 25(3):589－600.

[28] AKBAR I A, TRANTER W H. Dynamic spectrum allocation in cognitive radio using hidden markov models: Poisson distributed case[C]//Proceedings of IEEE Southeast Conference. Richmond, United states:IEEE,2007:196－201.

[29] VAMSI KRISHNA T, DAS A. A survey on MAC protocols in OSA networks[J]. Computer Networks, 2009,53(9):1377－1394.

[30] IEEE 802.22 Draft V2.0[S/OL]. 2009－07－23 [2009－12－06]. http:// www.ieee802.org/22/.

[31] ZHENG H, PENG C. Collaboration and fairness in

opportunistic spectrum access [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. [S. l.]:IEEE,2005:3132－3136.

[32] CAO L, ZHENG H. Distributed rule-regulated spectrum sharing[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2008,26(1):130－145.

[33] CAO L, ZHENG H. Distributed spectrum allocation via local bargaining [C]//Proceedings of the Second Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. [S. l.]:IEEE,2005:475－486.

[34] 廖楚林,陈劼,唐友喜,等. 认知无线电中的并行频谱分配算法[J]. 电子与信息学报,2007,29(7):1608－1611.
LIAO Chu-lin, CHEN Jie, TANG You-xi, et al. Parallel Algorithm of Spectrum Allocation in Cognitive Radio[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2007,29(7):1608－1611. (in Chinese)

[35] 谢显中,周通,董雪涛,等. 一种基于流量需求的动态频谱分配算法[J]. 通信技术,2008, 41(10): 9－11.
XIE Xian-zhong, ZHOU Tong, DONG Xue-Tao, et al. A Requirement-based Algorithm in Dynamic Spectrum Allocation[J]. Communications Technology,2008, 41(10): 9－11. (in Chinese)

[36] ZHU H, PANDANA C, LIU K J R. Distributive opportunistic apectrum access for cognitive radio using correlated equilibrium and no-regret learning[C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. [S. l.]:IEEE,2007:11－15.

[37] TIAN F, YANG Z. A new algorithm for weighted proportional fairness based spectrum allocation of cognitive radios[C]//Proceedings of 8th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing. Qingdao:IEEE,2007:531－536.

[38] DIGHAM F F. Joint power and channel allocation for cognitive radios[C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Las Vegas, United states:IEEE,2008:882－887.

[39] SETOODEH P, HAYKIN S. Robust transmit power control for cognitive radio[J]. Proceedings of the IEEE,2009,97(5):915－939.

[40] 邱晶,周正. 认知无线电网络中的分布式动态频谱共享[J]. 北京邮电大学学报,2009,32(1):69－72.
QIU Jing, ZHOU Zheng. Dynamic Spectrum Sharing Strategy in Cognitive Radio Systems[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32(1): 69－72. (in Chinese)

[41] WANG Q, ZHENG H. Route and spectrum selection in dynamic spectrum networks[C]//Proceedings of the 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference. [S. l.]:IEEE,2006:625－629.

[42] 周贤伟, 王建萍, 王春江. 认知无线电[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
ZHOU Xian-wei, WANG Jian-ping, WANG Chun-jiang. Cognitive Radio[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:

刘　全(1985－),男,江西萍乡人,博士研究生,2006 年于海军工程大学获工学学士学位,2008 年提前攻读博士学位,主要研究方向:认知无线电链路层关键技术、多抽样率信号处理理论及应用;

LIU Quan(male) was born in Pingxiang, Jiangxi Province, in 1985. He received the B. S. degree in Communication Engineering from Naval University of Engineering, Wuhan, China, in 2006. Since 2008, he has been with the Software Radio Lab, Naval University of Engineering, where he is a Ph. D. candidate. His current research interests include cognitive radio systems and multirate signal processing.

Email:liuquan. hjgc@gmail. com; alex－hjgc@163. com

高　俊(1957－),男,江苏泰州人,博士,教授、博士生导师,1982 年于海军电子工程学院获工学学士学位,1989 年于北京理工大学获工学博士学位,主要研究方向:软件无线电、数字通信理论与技术;

GAO Jun (male) was born in Taizhou, Jiangsu Province, in 1957. He received the B. S. degree in Communication Engineering from Naval Electronic College of Engineering, in 1982, and the Ph. D. degree in Electronic Engineering from Beijing Institute of Technology in 1989. Since 1996, he has been a professor at Naval University of Engineering, and his research interests are digital communications and software radio systems.

关建新(1978－),男,湖北随州人,博士研究生,讲师,主要研究方向:软件无线电、数字通信;

GUAN Jian－xin (male) was born in Suizhou, Hubei Province, in 1978. He is now a Ph. D. candidate and also a lecturer. His research interests include software radio and digital communications.

郭云玮(1983－),男,江西新余人,硕士研究生,主要研究方向:认知无线电频谱感知技术。

GUO Yun－wei (male) was born in Xinyu, Jiangxi Province, in 1983. He is now a graduate student. His research direction is spectrum sensing technonogy for software radio.