

# 认知无线网络：关键技术与研究现状

魏急波, 王杉, 赵海涛

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 综述了认知无线网络的关键技术和研究进展。首先, 从物理层的频谱感知和网络层的可用带宽估计两方面对网络环境感知技术进行了总结和归纳; 其次, 对目前的多信道 MAC 协议进行了分类, 重点分析了不同多信道 MAC 协议实现方法的优缺点和适用场景; 然后, 对认知无线网络中智能决策和网络重构的实现框架进行了介绍, 并总结了其中需要突破的关键技术; 最后, 对认知无线网络的重点研究方向给出了建议。

**关键词:** 认知无线网络; 频谱感知; 可用带宽估计; 多信道 MAC 协议; 智能决策; 网络重构

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)11-0147-12

## Cognitive wireless networks: key techniques and state of the art

WEI Ji-bo, WANG Shan, ZHAO Hai-tao

(College of Electronic Science and Engineer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Key techniques in cognitive wireless networks and the state-of-the-art of this research were surveyed. The first focus was on the techniques to obtain network information, which was classified into spectrum sensing in PHY layer and available bandwidth estimation in network layer. Second, the design of multi-channel MAC protocols was introduced. In particular, both the characteristics and the applicable scenarios were analyzed for different types of multi-channel MAC protocols. Third, key techniques in the intelligent decision and the network reconfiguration were discussed. In the end, several suggestions on future research topics that should be put more effort in this field were given.

**Key words:** cognitive wireless networks; spectrum sensing; available bandwidth estimation; multi-channel MAC; intelligent decision; network reconfiguration

### 1 引言

在日趋复杂的电磁环境下, 无线通信网络面临诸多挑战, 不仅网络用户数量日趋庞大, 服务类型和需求更是日趋多样化, 单一无线通信技术已经不能满足数据与语音通信要求, 而以频谱为代表的无线资源本身愈来愈成为一种稀缺、同时又是用户想

方设法获得的资源。由此显现出 3 个重要挑战: 第一、如何解决一方面网络资源的分配使用几乎殆尽, 而另一方面网络资源的实际利用率又极低(根据 FCC 在一份调查报告中的测量结果, 授权频谱的时空利用率在 15%~85%之间<sup>[1]</sup>; 有统计表明, 小于 3GHz 的频谱在空间时间上的平均使用率低于 5%<sup>[2]</sup>)的矛盾; 第二、多个网络存在时, 如何能快

收稿日期: 2011-09-08; 修回日期: 2011-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61002032); “十二五”通信装备预研基金资助项目(41001010403); 全军军事学研究生课题 (2010JY0075-006)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61002032); The Twelfth Five-Year Pre-research Foundation on Communication Equipments (41001010403); The Military Science Graduate Students Research Foundation of China (2010JY0075-006)

速建立分处于不同网络中用户的端到端通信渠道，并能满足用户一定的服务质量（QoS, quality of service）要求；第三、如何在复杂网络环境下，使通信终端在尽可能少的人为操作下，自适应的完成组网，从而提高网络运行的稳健性和网络维护的效率。认知无线网络技术<sup>[3]</sup>可以说为以上问题提供了解决方向。认知无线网络技术是指以提供端到端用户服务质量保证为目标，通过对无线通信网络环境的交互感知作用，进行智能规划、决策和调度、自组织的实现组网并自适应于具体无线通信环境，有效地优化网络资源的管理和使用状况。认知无线网络技术不仅可以提高网络资源的利用效率、提供无线电通信兼容性和自适应于无线网络资源的动态变化，更能适应复杂电磁环境下通信资源和通信手段的限制与反限制、攻击与保护等。

目前，认知无线网络技术已经得到了各界的关注，很多著名学者和机构都投入到认知无线网络相关技术的研究中，启动了很多针对认知无线电和认知无线网络的重要研究项目。例如德国高校提出的频谱池系统、美国加州大学 Berkeley 分校研究组开发的 CORVUS 系统、美国马里兰大学和微软研究院联合设计的 KNOWS 认知无线电系统、美国 Georgia 理工学院宽带和无线网络实验室提出的 OCRA 项目、美国军方 DARPA 的 XG 项目和 WNAN 项目、欧盟的 DRiVE 项目和 E2R 项目等。在这些项目的推动下，该技术已在基本理论、频谱感知、网络架构和协议设计等领域取得了一些成果。IEEE 为此专门组织了 2 个重要的国际年会交流该方面的研究成果。目前，最引人关注的是 IEEE 802.22 工作组的工作，该工作组正在制订利用空闲电视频段进行宽带无线接入的技术标准，这是第一个引入认知无线电概念的 IEEE 技术标准化活动。国内研究工作起步稍晚，但是最近投入亦很大。国家“863”计划在 2005 年首次支持了认知无线电关键技术的研究。2008 年国家自然科学基金委信息科学部在认知无线电领域设立重点项目群，解决频谱认知、动态频谱管理、抗干扰和有效中继等问题。2009 年“973”国家重点基础研究发展计划中也设立了有关无线网络的重大项目。国内的研究工作主要集中在香港科技大学、浙江大学、清华大学、北京邮电大学、西安电子科技大学和国防科学技术大学等单位。

认知无线网络被认为是下一代无线通信与网络的核心技术，是实现无线网络异构融合、高效利

用网络资源满足用户端到端服务需求的最佳方法。它不仅能够通过重构其工作特性及各种参数，自适应于具体无线通信环境，从而有效地优化复杂无线网络环境下频谱资源的管理和使用状况，更为未来大容量大宽带无线通信与网络系统设计提供了一条全新的途径和大量的机会。

## 2 认知无线网络的结构

认知无线网络的主旨是让网络能够观察、学习和优化自己的行为，其基本目标是提高端到端的效能。这就要求认知无线网络不仅能够感知当前的状况以采取相应的自适应行动，并且具备思考、学习和记忆的能力，能够基于所获取的知识对当前情况和事件做出推理，继而将学习到的知识应用在未来的判决中。

传统网络中的状态信息受层次化协议结构的限制，单个元素不能体会其他元素当前的、准确的感知状态。因此，单个元素对网络激励的反应也只能局限在有限的范围内。同时，这种自适应反应是一种反射性的，即只有当问题发生的时候才会来采取相应的措施，而不能提前预测可能发生的问题。在认知无线网络体系中，以认知特性为基础，通过信息处理和人工智能，可以实现对网络的感知、决策、资源分配和网络重构，四者之间又存在着紧密的内在逻辑关系，如图 1 所示。在这种体系结构中，认知无线网络能够观察、感知和学习网络环境状态，智能决策并自适应调整节点和网络的配置与行为，进而达到对网络性能的智能优化。

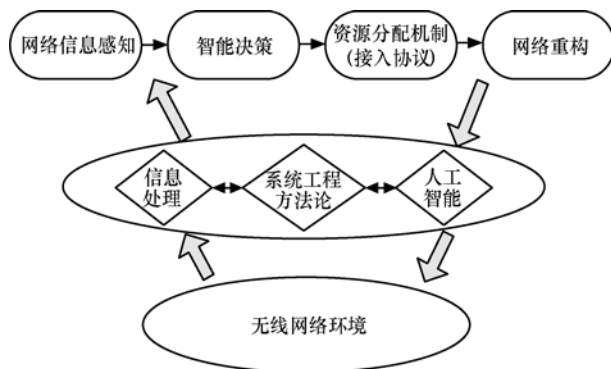


图 1 认知无线网络的理论体系结构

认知无线网络的组网方式可以分为两类：基于基础架构的组网方式和基于 ad hoc 的组网方式。基于基础架构的认知无线网络如图 2 所示，它由认知无线网络接入点和认知无线网络节点组成。

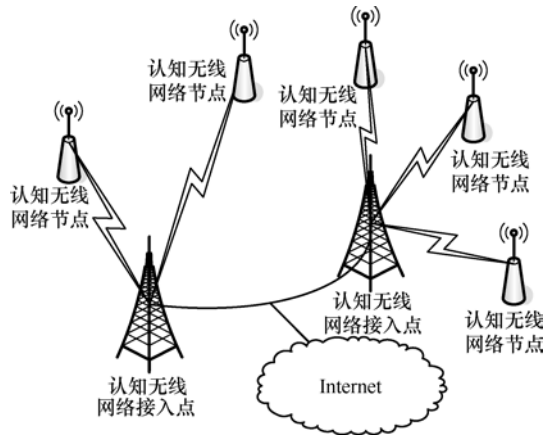


图 2 基于基础架构的认知无线网络

基于 ad hoc 形式的认知无线网络中，认知节点以自组织、多跳方式组网，如图 3 所示。这种网络没有基础架构的支撑，网络节点既能通过无线的方式直接相互通信，又能协助其他网络节点完成相互通信。在这种方式组成的网络中，所有节点地位平等，无需设置任何的控制中心。

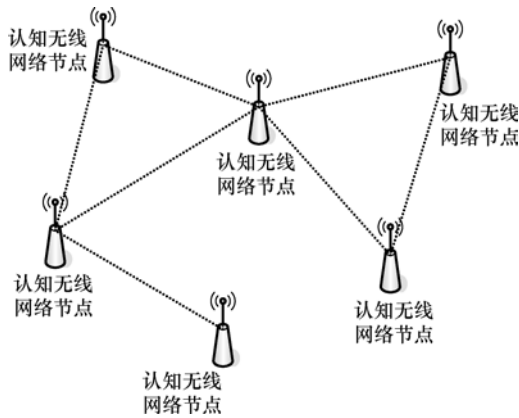


图 3 基于 ad hoc 方式的认知无线网络

认知网络的应用相当广泛，可以简单划分为以下几类：频谱租赁<sup>[4]</sup>、认知 Mesh<sup>[5]</sup>、网络融合、军事应用、紧急救灾<sup>[6]</sup>等。其中主要的研究领域有：网络信息感知、无线资源分配机制（主要体现在网络接入协议设计中）、智能决策算法和网络重构技术等。

### 3 网络信息感知技术

频谱资源（频谱空洞）是认知无线网络物理层最基础的可用资源，从网络层的角度来看，该资源可映射为端到端的带宽资源。这些资源信息的获取是无线网络中保证用户 QoS 的一个重要前提也是认知无线网络的工作基础，其感知结果的准确性将直接决定频谱利用率及业务流所能达到的性能。特

别是可用带宽信息，它是网络资源的综合，是直接为网络业务所利用的资源，因而其研究意义也越来越受到重视。

#### 3.1 频谱共享与感知

频谱共享是指允许部分非授权用户（即认知用户）在不干扰授权用户（即主用户）的前提下动态共享部分频谱，它是认知网络工作的基础。频谱共享的方式大体可分为 Underlay（重叠），Overlay（覆盖），Interweave（交织）和 Aggravation（聚合）这 4 种<sup>[7, 8]</sup>，如图 4 所示。

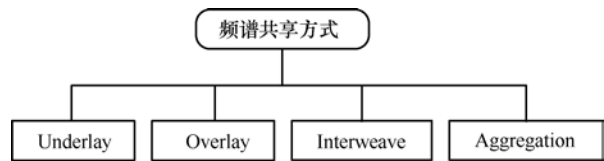


图 4 频谱共享方式分类

##### Underlay 方式

Underlay 的方式也称为干扰控制，图 5(a)是 Underlay 的频谱共享原理图。在这种模式下，认知用户可以与主用户同时使用频谱资源，但前提是认知用户的功率必须小于主用户的干扰温度门限。通过将信号扩频至很大的带宽上，可以实现在超低功率下短距离的高速通信。认知超宽带(cognitive UWB)<sup>[9]</sup>是使用这种模型的典型例子。

##### Overlay 方式

Overlay 的方式也称为干扰减轻，它也允许认知用户与主用户在相同的频谱上进行传输，但是需要假设主用户和认知用户之间的信道信息是已知的。Overlay 系统能够运行的前提是：认知用户使用部分能量进行认知用户本身的传输，同时使用剩余的能量来帮助主用户进行发送（转发）。通过仔细地进行能量分割，认知用户转发对主用户的信息 SNR 的增加能够弥补认知用户发送其本身的数据对主用户信息 SNR 的减小。这实际上是类似于最近提出的协同通信的思想<sup>[10]</sup>。为了减轻干扰，认知用户必须知道主用户的码本，认知用户发送方或接收方能够机会主义地对主用户的信息进行译码。这样就会给主用户和认知用户都带来增益。

##### Interweave 方式

Interweave 的方法又称为干扰避免，是基于机会主义通信的思想，也是最早在 J. Mitola 的博士论文<sup>[11]</sup>中提出的思想。该模型不强调功率控制，而是通过在时间—频率二维空间寻找频谱空洞。这些频

谱空洞, 能够被认知用户使用进行通信, 从而提高频带利用效率, 其原理图如图 5(b)所示。采用交织的频谱共享方式时, 认知用户需要周期性地监听频带, 智能地检测不同频带的占用情况, 然后使用频谱空洞进行机会主义的通信同时保证对活跃主用户的干扰最小。该方式是目前认知网络最常用的频谱接入模型, 可用于认知网络的 FDMA、TDMA 或 OFDMA 系统, 有着广泛的应用前景。

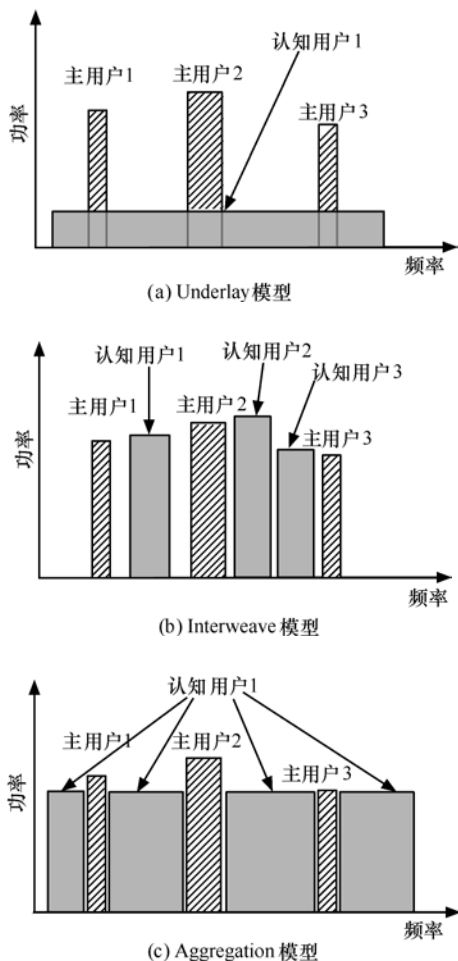


图 5 频谱共享方式示意图

### Aggregation 方式

Aggregation<sup>[8]</sup>是最近提出来的, 它实际是交织方式的一种改进方式, 它将多个可用的空白频段聚合起来给某一个认知用户使用, 从而可以显著提高该认知用户的通信速率, 如图 5(c)所示。

由上面的分析可以看出, 为了进行频谱共享首先需要进行频谱感知。频谱感知技术也是认知网络区别于传统无线网络的核心技术之一。按照感知的对象不同, 频谱感知可分为基于发射源的感知和基于干扰的感知。而根据感知方式的不同, 目前对频谱检测技术的研究主要包含两方面, 一是单点频谱检测技术, 根据单个认知无线电节点接收的信号, 检测其所处无线环境的频率占用状态; 二是多点协作频谱检测技术, 即把多个节点的频谱检测结果进行合并, 以提高检测正确率, 并降低对单节点的性能要求, 如图 6 所示。

#### 1) 基于发射源的感知

针对发射源的不同特征进行感知, 该方法又可细分为以下几类:

##### 能量检测

能量检测<sup>[12]</sup>是指在一定频段内检测能量的积累, 如果积累后的能量高于设定的门限则说明有信号存在, 否则只有噪声。能量检测的优点是无需任何检测信号的先验知识, 属于非相关检测。其缺点是检测速度慢, 并且对门限值的设定也非常敏感。

##### 匹配滤波检测

匹配滤波是指通过频谱滤波器进行信号检测的技术<sup>[13]</sup>。匹配滤波器是输出信噪比最大的最佳线性滤波器。匹配滤波是在已知主用户信号特征下最优的频谱检测技术, 是一种相关检测。和其他检测技术相比, 它具有时间短, 检测精度高的优势。但是需要主用户信号的详细特征, 如果需要对多个主信号进行检测, 就需要配置多个滤波器, 其执行成本

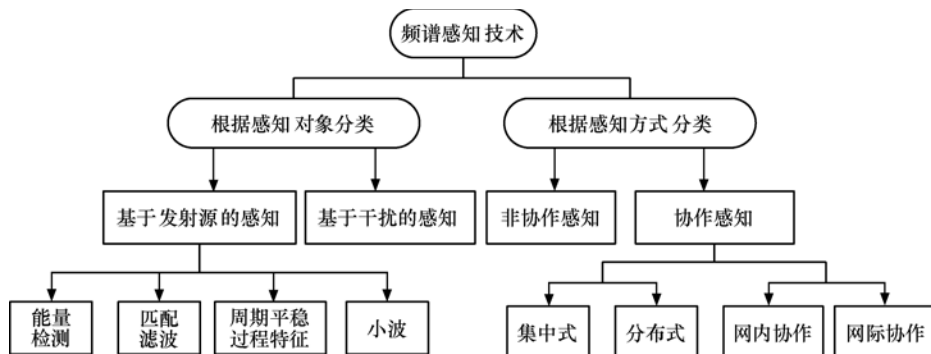


图 6 频谱感知技术分类

将大大增加，因此其应用场合也受到很大的限制。

### 周期平稳过程特征检测

周期平稳过程特征检测是指通过提取接收信号的静态相关特征来检测主用户信号的技术<sup>[14]</sup>。静态相关特征是由信号的周期性特征导致的。这种检测技术的主要优势是能从调制信号功率中区分出噪声能量，前提是噪声为不相干的广义平稳信号。因此，周期平稳过程特征检测可以在较低的信噪比前提下检测信号。

### 小波检测

由于无线网络中率谱密度的不规则性，因此可以通过小波变换来分析信号的特征<sup>[15]</sup>，其最大的优势是能对较宽频段的信号进行检测。

表 1 对以上 4 种主要的频谱感知技术进行了优缺点的总结<sup>[16]</sup>。

感知技术	优点	缺点
能量检测	不需要信号的先验知识，简单易行	检测速度慢；不能在低信噪比下工作；无法区分主用户与认知用户信号
匹配滤波	准确度高，较易执行	需要主用户信号的全部先验知识；可扩展性差
周期平稳过程特征检测	低信噪比和干扰条件下性能稳定	计算复杂，需要主用户的部分先验知识
小波检测	利于宽频段下的信号检测	计算复杂，无法检测扩频信号

## 2) 基于干扰的感知

该方法的基本思想是根据接收端受到的干扰程度来决定是否或者如何进行频谱接入。在实际应用环境中，基于发射源的感知方法还存在一些难以克服的问题。如图 7 所示，图 7(a)中的情形是主用户接收端不确定问题，也称为主用户的隐终端问题。认知用户在主用户发射端的干扰半径之外，因此一旦检测到频谱可用并接入信道，便会与主用户接收端发生冲突。而图 7(b)图中虽然认知用户处于主用户发射端的干扰半径之内，但是由于障碍物的存在，导致在阴影区域（扇形区域）检测到频谱可用，而接入信道后也会与主用户的接收端发生冲突。

因此，学者又提出了一种新的检测干扰的模型——干扰温度模型。该模型不使用噪声作为判断门限，而是将干扰温度，即接收端所能忍受的干扰程度来进行门限判断。只要不超过该门限，认知用户就可以使用该频段。

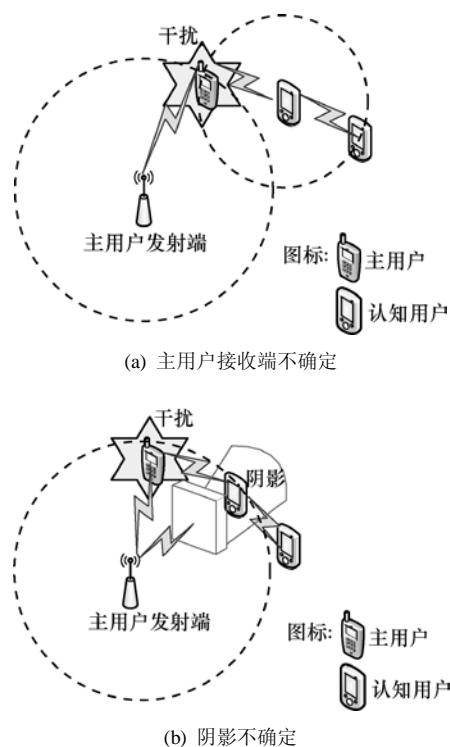


图 7 发射源感知存在的问题

## 3) 协作感知

由于无线环境存在路径损耗、阴影效应和多径效应，仅依靠单个节点检测频谱，不能保证其正确性。在复杂环境中，认知无线电用户受到了阴影效应的影响，只有某些用户能够正确检测频谱（例如如图 7(b)所示的情况）。因此，必须合并多个节点的频谱检测结果，通过协作频谱检测来提高频谱检测的正确性。协作感知的本质即认知用户通过协作来共同感知频谱空洞<sup>[18]</sup>。

协作感知可以分为集中式和分布式。在集中式协作感知中存在一个中心控制节点。该节点通过公共控制信道广播感知任务给网络中的所有节点，并将各感知节点的感知结果进行采集。需要指出的一点是公共控制信道在认知网络中并不容易实现，该问题也是认知网络中一个极具挑战性的问题，在下面的 MAC 协议研究中还将详细讨论该问题。在分布式的感知中，认知节点虽然共享感知信息，但是却单独进行频谱接入。协作感知还可以分为网内协作（即在一种网络系统内进行协作感知）与网际协作（即在多种无线网络系统中协作感知）。

协作感知与非协作感知的优缺点对比如表 2 所示<sup>[16]</sup>。

表 2 协作与非协作感知对比

感知方式	优点	缺点
非协作感知	工作过程简单	无法彻底解决隐终端及阴影等问题, 感知准确度低, 感知速度慢
协作感知	感知准确度高, 感知速度快, 能解决隐终端和阴影问题	执行与计算复杂, 通信开销大, 需要公共控制信道

除了以上几个主要的频谱感知研究领域, 频谱感知还出现了一些新的研究领域和方向, 比如压缩感知<sup>[17]</sup>和频谱预测<sup>[19]</sup>等。

### 3.2 可用带宽感知技术

可用带宽是指在不影响网络中背景业务流(即已经存在的业务流)的情况下, 端到端通信所能获得的最大数据传输率<sup>[20]</sup>。在网络资源感知方面, 由于无论是物理层的频谱资源, 还是 MAC 层的信道资源, 最终都将转化为网络中端到端的带宽资源。可用带宽信息的获取是认知无线网络中支持 QoS 的一个重要前提, 最近关于可用带宽信息的感知技术也越来越受到重视。

在过去的 10 年中, 基于探测分组的可用带宽测量方法首先被提出、不断改进, 并应用于有线网络。这些方法原理上都是基于探测分组间距模型(PGM, probe gap model)<sup>[21]</sup>或者探测分组速率模型(PRM, probe rate model), 工作过程就是终端节点通过不断发送端到端的探测分组来估计目标路径上的可用带宽的方法。但由于无线网络本来就资源受限且十分珍贵, 往往不能承受节点发送过多探测分组所带来的额外负载, 因而人们又不断提出适合无线网络中的可用带宽获取方法, 这些方法大体可以分为两类: 基于感知的估计方法和基于模型的预测方法。

#### 1) 基于感知的估计方法

基于感知的可用带宽估计方法最先在单跳无线网络中提出, 然后扩展到多跳无线网络中。这类方法的基本思想是节点分别感知其周围信道的利用情况, 然后交互这些信息来进行可用带宽估计。如果这种包交互的不是很频繁, 基于感知的方法可以认为对存在的业务不构成干扰。

Zhai 等人首先在文献[22]中提出了“信道占用率”的概念用于估计可用带宽。这一思想为基于感知的可用带宽估计方法提供了研究依托。尽管作者提出的算法是针对单跳网络的, 但很容易将其进行扩展, 用于多跳网络中。这其中的代表性工作有 QoS-AODV<sup>[23]</sup>, FAT<sup>[24]</sup>和 CACP<sup>[25]</sup>。

多跳网络与单跳网络的主要区别是多跳网络中存在“流内竞争问题”<sup>[26]</sup>。这个问题是指同一条多跳路径上的相邻节点也会为支持同一个业务流而竞争信道, 当某一链路在发送数据时, 路径上在其干扰范围内的链路无法进行数据传递。为了准确的考虑这个问题, 最近的文献[27]提出了一种新的模型来综合考虑流内竞争问题, 获得了较准确的结果, 也提高了多跳网络中可用带宽估计的准确性。

最后, 为了进一步提高可用带宽估计的准确性, ABE<sup>[28]</sup>和 IAB<sup>[29]</sup>除了考虑载波侦听范围内的信道占用情况外, 还详细考虑了相邻 2 个节点的空闲信道时间的同步概率、分组的碰撞概率和由于避退过程引起的带宽浪费比例等因素对可用带宽造成的影响, 这也代表了基于感知的可用带宽估计方法的最新研究进展。

#### 2) 基于模型的预测方法

在很多时候, 仅仅对当前可用带宽进行估计并不足够, 还需要对下一时刻的可用带宽进行预测, 而基于模型的方法正是基于这个背景提出来的。基于模型的方法是指根据网络的行为规律建立其数学模型, 然后利用模型来分析网络中给定路径可用带宽信息的方法。很自然的, 在该方法中首先要解决的问题是建立无线网络的模型, 正是因为模型能反映网络活动规律, 所以具有预测性。

因为在无线网络中, 节点间由于相互竞争而导致其活动有不确定性, 所以通过概率分析模型来分析网络行为是很好的方法。这其中的代表性工作有 Bianchi 针对 IEEE 802.11 建立的马尔科夫模型这一开创性工作<sup>[30]</sup>及文献[31,32]对其在非饱和状态方面、文献[33]对其在信道传输错误方面和文献[34]对其在异构网络节点方面进行的改进。作为总结, 图 8 给出了这三类方法的分类框图和其中有代表性的工作。

## 4 认知无线网络 MAC 协议研究

由于认知网络的核心是分配、管理和利用割裂的频谱资源, 从而进行动态的组网。这些割裂的频谱资源自然地就形成了多个信道, 所以认知网络的 MAC 协议主要是基于多信道的 MAC 协议。多信道 MAC 协议完成的主要工作是在获取了网络信息的基础上, 为不同的通信节点分配相应的信道, 消除数据分组的冲突, 使尽量多的节点可以利用可用的网络资源同时进行通信。为了完成这一工作, 多信道 MAC 协议设计都会面临信道协商机制和信道选

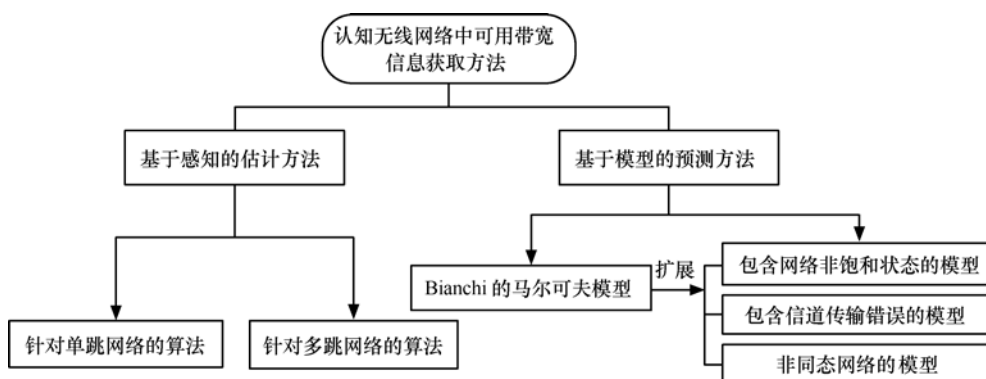


图 8 认知无线网络中可用带宽估计方法总结框图

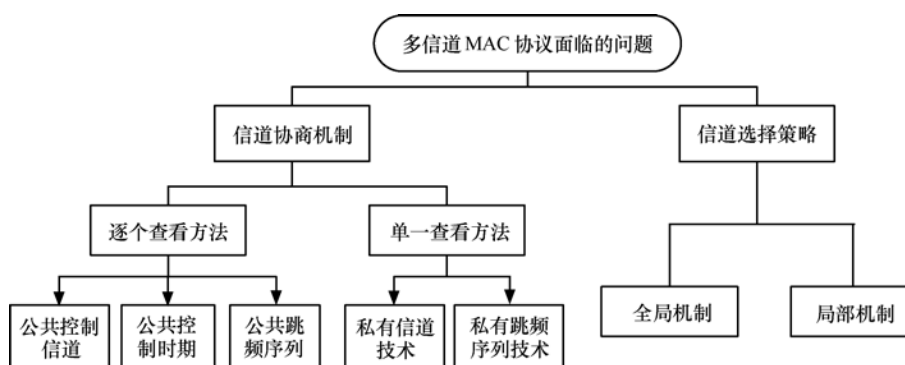


图 9 多信道 MAC 协议设计面临的问题和解决方案

择策略这 2 个问题（如图 9 所示）。

### 1) 信道协商机制

因为网络中的任意 2 个节点必须在相同的信道上才可以通信，所以就寻找一个能让 2 个通信节点都能占用的信道，并且在完成通信时间内只有这 2 个用户来占用这个信道。不在相同信道上的 2 个节点可以通过信道协商策略解决如何同步地切换到通信信道上。而公共信息在信道协商策略中起到重要作用，因为每个通信节点利用公共信息就可以获得在什么时间、哪个信道上能找到其他通信节点，而公共信息的获得是通过逐个查看的方法和单一查看的方法实现的。

逐个查看方法是指所有的通信节点都在相同的一个信道上会合并且侦听这个信道，成功竞争的节点就使用这个信道来进行用于数据通信信道的协商，也称为单一会合策略<sup>[35]</sup>，所以每个节点都会知道其他节点用于数据通信的信道使用情况。使用的技术如下：

#### 公共控制信道技术

在这种机制中，一个或多个控制信道专门用于交换控制包，目的是进行信道使用的协商，剩下的信道就称为数据信道，数据信道用于数据交换。任

何一个通信节点对之间可以在任何时间在专门的控制信道上进行协商，然后切换到它们共同选取的数据信道上进行数据交换。使用这类技术的代表性协议有 DCA<sup>[36]</sup>、MCDA<sup>[37]</sup>和 MCMAC<sup>[38]</sup>。

公共控制信道技术的优点是：专门的控制信道可以作为一个广播信道来使用，因为这种控制信道就是用来传输控制分组的，并且所有的节点都会来侦听这个信道，起到了广播的作用。并且信道的协商和广播包的发送可以随时进行，所以数据分组之间的发送时延很小。其缺点是：由于公共控制信道专门用于传输控制分组，所以会造成信道资源的浪费，信道带宽利用率不高，并且控制信道会成为整个网络吞吐量提升的瓶颈。

#### 公共控制时期技术

在公共控制时期技术中没有专门的控制信道，而是有一个由数据信道来临时的充当的控制信道。因为通信节点要地某一段时间内切换到临时的控制信道，并且需要在控制时间段与数据时间段之间来回切换，所以对于所有的节点需要同步技术。在控制时间段内，所有的节点都切换到临时的控制信道上与目的节点进行信道使用的协

商，成功协商后，2 个通信节点还要等待当前控制时间段的结束，然后才能切到所选取的信道上进行数据交换。使用这类技术的典型协议有：MMAC<sup>[39]</sup>和 MAP<sup>[40]</sup>。

公共控制时期技术的优点是：公共控制时期是很适合发送广播分组的时间段，因为在这一段时间内，任何节点都会切换到临时的控制信道上侦听信道；公共控制信道在公共控制时间段内是充当公共控制信道，而在数据交换时间段内可以充当数据信道，增加了信道利用率。其缺点是：各个节点之间需要同步技术；并且信道的协商与广播分组的发送不能随时进行，所以如果有节点想发送数据分组可能需要等待，所以造成了发送时延较大。

### 公共跳频序列技术

在这种机制中需要跳频技术，所有的节点在所有的可用信道之间以相同的序列进行跳频。当一个节点有数据要发送时，它就会在当前的信道上与目的节点联系。2 个节点在交换数据时都在相同的一个信道上。使用该技术的经典协议有 HRMA<sup>[41]</sup>，后来的研究也大多沿用了其中的思想。

公共跳频序列技术的优点是：信道的协商和广播分组的发送可以随时进行，并且利用跳频技术，所以减少了由于信道之间的干扰而造成的传输错误。其缺点是：各个节点之间需要同步技术，并且高频率的信道切换会造成功率浪费和能量消耗。

表 3 对逐个查看方法中可采用的不同技术的优缺点进行了总结和对比。

表 3 逐个查看方法不同技术的优缺点对比

技术名称	优点	缺点
公共控制信道技术	专门的控制信道，也可作为广播信道来使用；信道协商和广播分组的发送可以随时进行，数据分组之间的发送时延小	公共控制信道专门用于传输控制分组，会造成信道资源的浪费；控制信道可能会成为整个网络吞吐量提升的瓶颈
公共控制时期技术	公共控制信道在公共控制时间段内充当公共控制信道，而在数据交换时间段内可充当数据信道，增加了信道利用率	各个节点之间需要同步技术；信道的协商与广播包的发送不能随时进行，造成了发送时延较大
公共跳频序列技术	信道的协商和广播分组的发送可以随时进行；利用跳频技术减少了由于信道之间的干扰而造成的传输错误	各个节点之间需要同步技术；高频率的信道切换会造成功率浪费和能量消耗

单一查看方法是指一个节点主动的把接口切换到目的节点所使用的信道上，以此达到发送节

点与目的节点在同一个信道上，也称为多种会合策略<sup>[35]</sup>，使用的技术如下：

### 私有信道技术

在这种机制中的每个节点都会侦听一个专门的信道，并且这些属于每个节点的专门的信道是静态的或动态的分配给节点，称为私有信道。一个发送节点首先要获得目的节点的私有信道，然后当有数据要发送给目的节点时就会切换到目的节点的私有信道上。这种私有信道的信息可以通过广播或把信息存放在发送出去的分组中，以此来通知其他节点。使用这种技术的协议有 HMCP<sup>[42]</sup>、PCAM<sup>[43]</sup>和 xRDT<sup>[44]</sup>，其中 HMCP 和 xRDT 是通过发送多个单播信息，而 PCAM 是通过在专门的广播信道上发送广播来通知相邻的节点。

该技术的优点是：信道的协商与数据的发送可以在不同的信道上同时进行，这样可能增加网络吞吐量。其缺点是可能会引起隐藏终端问题的产生会导致碰撞概率的上升，进而影响网络吞吐量，而且由于要获得相邻节点的信道使用状况等信息，所以额外开销很大。

### 私有跳频序列技术

在这种机制中，每个节点都有一个属于自己的跳频序列，称为私有跳频序列，每个节点可以通过选取一个种子并且利用伪随机产生器生成一个私有跳频序列。为了能在 2 个节点之间建立通信，每个节点必须通知它的相邻节点它所选取的种子。使用这类技术的协议有 SSCH<sup>[45]</sup>和 McMAC<sup>[46]</sup>。在 McMAC 协议中，发送端与接收端在相同的信道上进行数据交换，当数据交换完成后就会重启各自的跳频序列。在 SSCH 协议中，发送端在数据交换时间段内就会把自己的跳频序列改变到接收端的跳频序列上去。

该技术的优点是减少了信道之间的干扰，但该技术一个明显缺点是各个节点之间需要同步技术，而且由接口需要在各个信道之间来回切换，会造成能量消耗过大。

表 4 对单一查看方法中可采用的不同技术的优缺点进行了总结和对比。

### 2) 信道选择策略

信道选择策略是指如何在多个可用信道中挑选一个可用的信道用来通信，并且这个挑选的可用信道对于发送端与接收端来讲都是有利的。在逐个查看方法中，所有基于公共控制信道或公共控制时

间段的协议都会面临如何在协商期间内决定一个公共信道。给每个节点分配专一信道也可看作是决定性的问题，然而许多协议简单的使用固定和随机的分配。

表 4 单一查看方法不同技术的优缺点对比

技术名称	优点	缺点
私有信道技术	信道的协商与数据的发送在不同的信道上同时进行，可增加网络吞吐量	可能会引起隐藏终端问题，导致碰撞概率的上升，进而影响网络吞吐量；如果通信节点只配置一个接口，那么“多信道盲”问题会变得更加严重；由于要获得相邻节点的信道使用状况等信息，所以额外开销很大
公共跳频序列技术	减少了信道之间的干扰	各个节点之间需要同步技术；接口需要在各个信道之间来回切换，会造成能量消耗过大

信道选择策略可以分为全局机制和局部机制，在全局机制中，每个节点都知道各自所使用的信道，但是在局部机制中，节点只能知道相邻节点所使用的信道情况。使用全局机制的协议包括 MAP<sup>[40]</sup>和 MAXM<sup>[47]</sup>。MAP 协议就是在公共控制时间段内获得所有的协商数据，这就意味着每个节点会知道有多少通信节点会对建立通信和通信节点会对占用多长时间的信道。基于这些获得的信息，每个节点使用最少业务量优先机制算法为那些通信节点对安排合理的信道。在控制时间段结束后，每个传输对就会基于这种机制切换到合适的信道上进行数据交换。而目前大部分的协议都是使用局部机制的，这是因为它们需要较少的维护开销，比较有代表性的协议如 DCA<sup>[36]</sup>和 MMAC<sup>[39]</sup>等。

### 5 智能决策与网络重构技术

认知网络中的智能决策研究可以从认知用户、认知网络 and 传统网络这 3 个层面来描述（如图 10 所示），将认知功能的逻辑结构细化为推理、学习和决策，并引入两个逻辑功能实体：传感设备和执行设备，用来表示认知网络与底层可重构网络之间的接口。

其中，执行设备和传感设备作为认知代理，可以部署在实际通信系统中，采集所需相关信息；认知网络层面负责进行自适应学习、推理和智能决策，该层面可以部署在通信系统的任意位置，通过认知代理传递的信息进行推理和决策，并控制认知代理的行为，实现基于认知网络的智能决策。

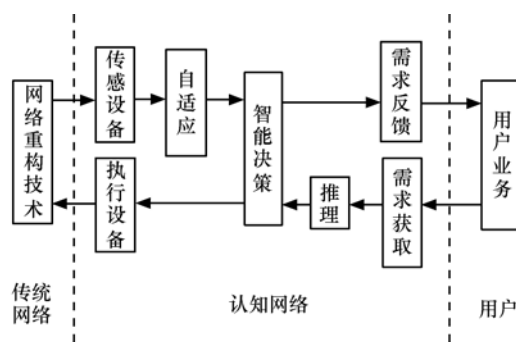


图 10 智能决策的实现结构

认知网络的智能决策涉及到人工智能理论、机器学习、推理机制等技术。目前常用的智能决策技术主要有：①基于知识的方法，如神经网络、遗传算法等；②基于决策树的学习方法，如 CLS (concept learning system) 算法等；③基于概率的不确定性推理方法，如概率推理、主观贝叶斯推理、可信度方法等；以及④基于集合理论的方法，如模糊数学方法<sup>[48]</sup>等。

智能决策可以确定网络重构的具体目标，而网络重构的实施使得网络行为能够动态的适应环境变化。传统网络对通信环境变化的应对有很多是通过人工调整的方式，无论是初期的网络建设还是后期的维护，在增加网络配置和维护成本的同时，其效果往往并不理想。认知网络应该具有自配置、自我管理、自优化的功能，即网络可重构。

网络重构技术是指针对无线接入环境的异构特性，以异构资源的最优化使用和用户对业务的最优化体验为目标，结合可编程、可配置、可抽象的硬件环境以及模块化的软件设计思想，实现对多种无线接口技术的支持，使网络和终端具有支持多种接入，且可灵活配置的技术。

网络重构技术主要包括网络可重构体系的设计、网络重构元的定义以及快速重构技术。由于认知网络具有动态、灵活、智能、重构的特征，因而对网络协议要求具有异步、实时的特点，而且能够感知终端变动和环境变化，并能自适应的重配置网络资源以及指导网络拓扑的调整。因此，认知网络的协议设计应该充分反映认知无线电的特征，协议架构应结合算法与网络结构等因素，统筹考虑。

文献[49~52]对认知网络的体系结构与模型设计进行了一些研究。其中，文献[49,50]重点研究了认知网络中具有可重构能力的平台框架，提出一种基于元素的节点体系结构，网络节点可由异构的软

硬件元素来组建, 并可以用 XML 配置文档进行定义和描述。文献[51]提出了一个 3 层框架结构: 端到端的用户目标、认知过程、软件自适应网络。该框架中, 网络应用程序接口被定义为认知过程与软件自适应网络的接口, 使得两者之间的耦合较为紧密。文献[52]则提出了一个支持网络重构优化决策的认知节点框架与分布式推理算法。

## 6 结束语

虽然目前认知网络已经获得了足够的重视, 但是仍然存在许多新问题, 值得在该领域持续投入精力进行更深入的研究。

### 1) 认知无线网络容量分析

任何通信系统的设计, 都离不开对传输信道和信道容量的研究。从信道的角度, 认知无线通信与传统无线通信的区别在于: 传统无线通信系统希望在特定点对点信道下达到最佳理论性能界限或者信道容量。由于信道的时变性和通信系统本身对网络中各个信道了解不充分, 信道容量往往不可达。而认知通信则通过感知变化的无线信道, 增加对网络条件下无线信道的了解, 从而有可能获得认知传输的信道容量增益、为设计最佳协议逼近信道容量提供了可能。虽然目前认知无线网络技术都得到了广泛的关注, 也逐渐取得了部分研究成果, 但在认知环境下认知无线网络的容量分析仍是未解决的问题, 这也成了制约该技术进一步发展和实用化的重要障碍。

### 2) 网络信息感知技术的进一步实用化发展

由于目前大多数关于认知无线网络资源感知的研究均假设感知过程得到的结果是正确的, 而这一假设在某些情况下并不成立, 如存在网络攻击者等。因此还需要两方面的研究, 一是关于网络信息的可靠感知技术; 另一方面就是要加强在感知信息不准确时认知网络研究。比如, 在频谱误检和漏检等情况出现的前提下, 如何进行频谱接入管理就是一个极具挑战性的研究问题, 这涉及到安全管理等研究领域。另外, 为了应对认知网络中需要进行宽频带的频谱感知, 压缩感知技术也是值得研究的方向。

### 3) 认知无线网络跨层协议栈设计

跨层设计的引入打破了传统网络的层次结构, 克服了网络层次间信息流通不畅的弊端, 从而为设计具有认知能力的网络架构提供了一种解决方案。文献[53]在跨层设计的基础上, 以“Knowledge”为

核心, 将“自感知”与“环境感知”等元素引入到体系结构设计中, 提出一种新的结构: 认知层(knowledge plane)。该结构以人工智能和认知系统作为核心技术, 以当前 Internet 为基础, 以构建高层次模型为目标, 达到对外提供服务和对网络其他元素提供建议的目的, 该方法也可以引入到无线网络中。文献[54]则提出上下文感知是使网络具备认知能力的关键技术之一, 并将上下文感知方法引入到认知网络节点的设计中。以上方法均以跨层协议栈设计为主要手段, 通过引入认知元素和跨层信息交互使网络系统获得一定的认知能力。

### 4) 认知引擎的动态构建研究

由于认知技术多种多样, 目前并无统一的认知标准。因此在认知网络的复杂电磁环境下, 某一种认知技术将存在相应的不足。理想的情况是认知无线电能根据网络环境动态调整其认知机制, 采取多种认知技术对网络资源进行查找, 然后自适应的进行决策, 即形成认知引擎的动态构建。这将提高认知的准确性, 对认知无线网络节点的设计也将提出更高的要求。

### 5) 网络软硬件可重构的设计与实现

可重构技术是最终实现认知网络的一项核心技术, 目前的研究已经提出了相关的体系架构, 但更细化的、高效的重构技术、方法和实现仍需要进一步深入研究。可重构技术又可从软件可重构和硬件可重构两方面来分别进行研究。软件可重构主要包括网络协议和算法中参数的实时动态调整, 以适应变化的无线网络环境, 甚至实现网络协议的可进化功能。硬件可重构主要是包括在硬件平台上运行算法的在线加载、更新和替换。目前一个很重要的思路是借鉴软件通信体系架构(SCA)<sup>[55]</sup>的思想进行实现和标准化。

综上所述, 认知无线网络技术已经引起无线网络产生重要变革, 并将产生巨大的经济价值及社会效应。但认知网络的应用及推广, 还需要其中一些关键技术的不断突破。

## 参考文献:

- [1] FCC. ET Docket No 03-222 Notice of Proposed Rule Making and Order[R]. 2003.
- [2] KOLODZY P. Dynamic Spectrum Policies: Promises and Challenges[M]. CommLaw Conspectus. 2004.
- [3] THOMAS R W. Cognitive Networks[D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.

- [4] STINE J A. Spectrum management: the killer application of ad hoc and mesh networking[A]. Proc IEEE DySPAN[C]. 2005. 184-93.
- [5] CHOWDHURY K R, AKYILDIZ I F. Cognitive wireless mesh networks with dynamic spectrum access[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 168-81.
- [6] MALDONADO D, B. LIE, HUGINE A, *et al.* Cognitive radio applications to dynamic spectrum allocation[A]. Proc IEEE DySPAN[C]. 2005. 597-600.
- [7] SRINIVASA S, JAFAR S A. The throughput potential of cognitive radio: a theoretical perspective[J]. IEEE Commun Mag, 2007, 45(5):73-79.
- [8] HARIHARAN R, NATE K, DINA K, *et al.* Learning to share: narrowband-friendly wideband networks[A]. ACM SIGCOM[C]. 2008.
- [9] ZHANG H, ZHOU X, YAZDANDOOST K Y, *et al.* Multiple signal waveforms adaptation in cognitive Ultra-wideband radio evolution[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(4): 878-84.
- [10] SADEK A K, SU W, LIU K J R. Multinode cooperative communications in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(1): 341-55.
- [11] III J M. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[D]. Royal Institute of Technology(KTH), 2000.
- [12] DIGHAM F, ALOUINI M, SIMON M. On the energy detection of unknown signals over fading channels[A]. Proc IEEE Int Conf Commun[C]. Seattle, Washington. 2003. 3575-3579.
- [13] TANDRA R, SAHAI A. Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty[A]. Proc IEEE Int Conf Wireless Networks, Commun and Mobile Computing[C]. Maui. 2005. 464-469.
- [14] GHOZZI M, F. MARX, DOHLER M, *et al.* Cyclostationarity-based test for detection of vacant frequency bands[A]. Crowncom 2006. Mykonos[C]. Greece. 2006.
- [15] TIAN Z, GIANNAKIS G B. A wavelet approach to wideband spectrum sensing for cognitive radios[A]. Crowncom 2006[C]. Mykonos, Greece. 2006.
- [16] ARSLAN H, YUCEK T. Chapter 9: spectrum sensing for cognitive radio applications[A]. Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems[C]. Springer 2007. 263-289.
- [17] CANDÈS E, WAKIN M, An introduction to compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21-30.
- [18] GANESAN G, LI. Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[A]. Proc IEEE DySPAN[C]. 2005. 137-143.
- [19] YARKAN S, ARSLAN H. Binary time series approach to spectrum prediction for cognitive radio[A]. Proc of IEEE Vehicular Technology Conference(VTC) Fall[C]. 2007. 1563-1567.
- [20] JAIN M, DOVROLIS C. End-to-end available bandwidth: measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(4): 537-49.
- [21] STRAUSS J, KATABI D, KAASHOEK F. A measurement study of available bandwidth estimation tools[A]. Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement (IMC)[C]. Miami Beach, FL, USA: ACM, 2003.
- [22] ZHAI H, CHEN X, FANG Y. A call admission and rate control scheme for multimedia support over IEEE 802.11 wireless LANs[J]. ACM Wireless Networks, 2006, 12(4): 451-463.
- [23] DE RENESSE R, GHASSEMIAN M, FRIDERIKOS V, *et al.* QoS enabled routing in mobile ad hoc networks[A]. Fifth IEE International Conference on 3G Mobile Communication Technologies (3G 2004)[C]. 2004. 678-682.
- [24] WU H, WANG X, LIU Y, *et al.* SoftMAC: layer 2.5 MAC for VoIP support in multi-hop wireless networks[A]. Second Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)[C]. 2005. 441-451.
- [25] YANG Y, KRAVETS R. Contention-aware admission control for ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(4): 363-377.
- [26] SANZGIRI K, CHAKERES I D, BELDING-ROYER E M. Determining intra-flow contention along multihop paths in wireless networks[A]. Proceedings of First International Conference on Broadband Networks (BroadNets)[C]. 2004.611-620.
- [27] ZHAO H, WANG S, XI Y, *et al.* Modeling intra-flow contention problem in wireless multi-hop networks[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(1): 18-20.
- [28] SARR C, CHAUDET C, CHELIUS G, *et al.* Bandwidth estimation for IEEE 802.11-based ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(10): 1228-1241.
- [29] ZHAO H, GARCIA-PALACIOS E, WEI J, *et al.* Accurate available bandwidth estimation in IEEE 802.11-Based ad hoc networks[J]. Computer Communications, 2009, 32(6): 1050-1057.
- [30] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535-547.
- [31] MALONE D, DUFFY K, LEITH D. Modeling the 802.11 distributed coordination function in nonsaturated heterogeneous conditions[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(1): 159-172.
- [32] DANESHGARAN F, LADDOMADA M, MESITI F, *et al.* Unsaturated throughput analysis of IEEE 802.11 in presence of non ideal transmission channel and capture effects[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1276-1286.
- [33] CHATZIMISIOS P, BOUCOUVALAS A C, VITSAS V. Influence of channel BER on IEEE 802.11 DCF[J]. Electronics Letters, 2003, 39(23): 1687-1689.
- [34] ERGEN M, VARAIYA P. Throughput analysis and admission control for IEEE 802.11a[J]. Mobile Network Applications, 2005, 10(5): 705-716.
- [35] MO J, SO H S W, WALRAND J. Comparison of multi-channel MAC protocols[A]. ACM International Symposium on Modeling, Analysis

- and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)[C]. 2005. 209-18.
- [36] WU S L, LIN C Y, TSENG Y C. A new multi-channel MAC protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks[A]. International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks(ISPAN)[C]. 2000.232-237.
- [37] CHANG C Y, SUN H C, HSIEH C C. MCDA: an efficient multi-channel MAC protocol for 802.11 wireless LAN with directional antenna[A]. International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)[C]. 2005.64-67.
- [38] KOUBAA H. Fairness-enhanced multiple control channels MAC for ad hoc networks[A]. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)[C]. 2005. 1504-1508.
- [39] SO J, NITIN H, VAIDYA. Multi-channel MAC for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver[A]. International Symposium Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)[C]. 2004.222-233.
- [40] CHEN J, SHEU S T, YANG C A. New multi-channel access protocol for IEEE 802.11 ad hoc wireless LANs[A]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE[C]. 2003.7-10.
- [41] TANG Z, GARCIA J. Hop-reservation multiple access (HRMA) for ad hoc networks[A]. IEEE International Conference on Computer Communications and Networks(IC3N)[C]. 1998. 388-395.
- [42] KYASANUR P, VAIDYA N H. Routing and interface assignment in multi-channel multi-interface wireless networks[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)[C]. 2005. 2051-2056.
- [43] PATHMASUNTHARAM J S, DAS A, GUPTA A K. Primary channel assignment based MAC (PCAM) - a multi-channel MAC protocol for multi-hop wireless networks[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)[C]. 2004. 21-25.
- [44] MAHESHWARI R, GUPTA H, DAS S R. Multichannel MAC protocols for wireless networks[A]. IEEE Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)[C]. 2006. 393-401.
- [45] BAHU P, CHANDRA R, DUNAGAN J. SSCH: slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 ad-hoc wireless networks[A]. International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)[C]. 2004. 216-230.
- [46] SO H W, WALRAND J. McMAC: A Multi-Channel MAC Proposal for Ad-Hoc Wireless Networks[R]. Berkeley, 2005.
- [47] HSU S H, HSU C C, LIN S S, *et al.* A multi-channel MAC protocol using maximal matching for ad hoc networks[A]. International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW)[C]. 2004. 505-510.
- [48] BALDO N, ZORZI M. Cognitive network access using fuzzy decision making[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3523-3535.
- [49] SUTTON P D, DOYLE L E, NOLAN K E. A reconfigurable platform for cognitive networks[A]. 1st International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications[C]. Mykonos Island. 2006. 1-5.
- [50] NOLAN K E, RONDEAU T W, SUTTON P D, *et al.* A framework for implementing cognitive functionality[A]. Proceedings of the 51st SDR Forum General Meeting and 2006 Technical Conference[C]. Orlando. 2006.
- [51] THOMAS R W, DASILVA L A, MACKENZIE A B. Cognitive Networks[A]. Proc of the 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN'05)[C]. Baltimore, 2005. 352-360.
- [52] MAHONEN P, PETROVA M, RIIHIMARVI J. Cognitive wireless networks: your network just became a teenager[A]. Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM'06)[C]. Barcelona, Spain,2006.
- [53] CLARK D D, PARTRIDGE C, RAMMING J C, *et al.* A knowledge plane for the internet[A]. Proc of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications[C]. Karlsruhe, Germany, 2003. 3-10.
- [54] BALAMURALIDHAR P, PRASAD R. A context driven architecture for cognitive radio nodes[J]. Wireless Personal Communications, 2008, 45(3): 423-34.
- [55] JTRS JPO. Software Communication Architecture Specification (Version 2.2.2)[R].Washington: JTRS Joint Program Office, 2006.

#### 作者简介:



魏急波 (1967-), 男, 湖北汉川人, 国防科学技术大学教授、博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理、宽带无线移动通信及无线组网协议等。



王杉 (1978-), 男, 陕西兴平人, 博士, 国防科学技术大学讲师, 主要研究方向为无线通信协议分析与设计、无线自组织网络以及认知无线网络技术等。



赵海涛 (1981-), 男, 山东昌乐人, 博士, 国防科学技术大学讲师, 主要研究方向为无线网络可用带宽估计、交叉层协议设计与优化以及认知无线网络技术。

