

# 认知无线多跳网中结合 QoS 查找的跨层多信道 MAC 协议

孙杰, 郭伟

(电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 611731)

**摘要:** 针对认知无线多跳网中频谱资源具有较大时变性及差异性的问题, 设计了一种结合 QoS 查找的跨层多信道 MAC 协议。该协议将按需 QoS 查找与动态频谱分配跨层相结合, 仅让参与传输的节点执行频谱分配并按 QoS 要求获取频谱资源。此外, 协议使用频分双工收发机实现了对公共控制信道的不间断监听, 并设计了一套支持不同数量收发机节点间混合通信的接入算法。大量仿真结果表明, 该协议能有效保证对端到端传输的 QoS 要求的满足, 并显著提高端到端吞吐量及时延。

**关键词:** 认知无线电; 无线多跳网; MAC 协议; QoS 保证

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)04-0010-09

## Cross-layer multi-channel MAC protocol combined with QoS search for cognitive wireless multi-hop networks

SUN Jie, GUO Wei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications,  
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** In cognitive wireless multi-hop networks, the spectrum resources are highly variable and diverse. A cross-layer multi-channel MAC protocol combined with QoS search was proposed. The protocol combines the on-demand QoS search with dynamic spectrum allocation via cross-layer method, which only permits the transmission nodes to participate in the spectrum allocation and can guarantee the allocation results meet the QoS requirement. Besides, frequency division duplex transceivers are introduced to continuously listen to the common control channel, and an access algorithm is carefully designed to realize hybrid communication between nodes with different number of transceivers. Extensive simulations show that our protocol can efficiently guarantees the QoS requirement for end-to-end transmission and significantly improves end-to-end throughput and delay.

**Key words:** cognitive radio; wireless multi-hop networks; MAC protocol; QoS guarantee

### 1 引言

认知无线多跳网络是将认知无线电 (CR, cognitive radio) 技术<sup>[1]</sup>和无线多跳网络相结合的一种新型网络。该类网络由 CR 技术中的 SU 以无线

多跳方式构成。在 CR 技术中, 用户分为 PU (PU, primary user) 和 SU (SU, secondary user) 两类。其中 PU 使用授权频段, 对频谱的使用具有优先权; SU 对频谱的使用不能干扰 PU 的正常通信。二者之间的频谱共享模式主要分为两类<sup>[2]</sup>: 一是

收稿日期: 2012-03-20; 修回日期: 2012-06-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (2009CB320405); 国家科技重大专项基金资助项目 (2010ZX03005-002, 2010ZX03006-002)

**Foundation Items:** The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB320405); The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2010ZX03005-002, 2010ZX03006-002)

overlay 方式, 指 SU 只能在 PU 空闲时使用频谱, 即在时间上对 SU 做出限制; 另一类是 underlay 方式, 指 SU 对 PU 总的干扰功率不能超过限制, 即在功率上对 SU 做出限制。无论使用哪种频谱共享模式, SU 所能获得的频谱资源都具有时变性和差异性等特点<sup>[2~4]</sup>。

MAC 协议的设计是认知无线多跳网络中的关键点和难点。由于同时需要考虑频谱时变性、差异性、PU 检测以及信道冲突等诸多因素, 传统的无线多跳网络 MAC 协议不再适用, 必须设计专门的协议。

传统无线多跳网络 MAC 协议主要针对静态频谱环境设计, 不考虑对 PU 的监听, 也不考虑频谱资源的变化性。此类 MAC 协议可分为单信道协议和多信道协议两类。前者以 IEEE 802.11 系列协议为代表, 后者以 MMAC<sup>[5]</sup>、DCA<sup>[6]</sup>等协议为代表。IEEE 802.11 协议没有信道分配机制, 使用 CSMA/CA 方式竞争单一信道。MMAC 协议使用单一收发机, 并假设节点同步。该协议将所有信道在时间上分为“竞争期”和“传输期”2 部分。节点只有在“竞争期”对信道竞争成功才能在“传输期”进行传输。DCA 协议则将所有信道区分为控制信道和数据信道。节点须先在控制信道上竞争对数据信道的使用权, 才能在数据信道上进行传输。该协议规定节点装备 2 套收发机, 分别独立工作于控制信道和数据信道。

以认知无线电为技术背景的 MAC 协议目前已经有一些研究成果。文献[7]假设网络由一个控制信道和  $N$  个数据信道组成。SU 在控制信道上使用超宽带 (UWB) 技术以实现对 PU 干扰的限制, 对数据信道的利用采用典型的 ON/OFF 模型。如果检测到 PU 在某信道上空闲时, SU 还需再监听一个 ASP (arbitrary sensing period) 时间来保证不与其他 SU 发送冲突。SU 一次只能监听一个信道, 若信道繁忙则切换到下一个信道, 直到找到空闲信道。文献[8]针对时延敏感业务设计了 OMC-MAC。该协议同样假设控制信道的存在。协议使用周期性的信标信号来实现 SU 间的同步。任何新加入网络的节点须先在控制信道上侦听群首发出的信标信号, 如果在一个信标间隔时间内没有收到其他节点的信标信号, 则发出信标宣布自身为群首。一个信标间隔时间被划分: 感知、竞争和传输 3 部分。节点在感知时间内对所有信道进行扫描, 保存可用信道列表;

然后在竞争时间内在控制信道上发送包含自身可用信道信息的 RTS 分组竞争对数据信道的使用权; 随后在传输时间内进行传输。作者使用了 2 次 RTS-CTS 的握手来实现对数据信道的严格预留。文献[9]提出 DH-MAC 协议, 是少有的不使用公共控制信道的认知无线网络 MAC 协议。在该协议中, SU 根据 PU 的行为制定自身的跳频序列。SU 在每个可用信道上只停留一定时间, 随后按跳频序列跳向下一个信道。需要通信的节点须按照同样的跳频序列进行跳频。协议的核心是 SU 必须获得所有邻居节点的跳频序列, 但文章并未清楚说明这一点是如何实现的。而且当频谱资源发生变化时, 该协议需要花费较长时间才能重新计算及分发所有节点的跳频序列。

已有的认知无线网络 MAC 协议的研究, 基本都采用“主动式”频谱分配, 即无论节点是否有发送需要都参与频谱分配。对频谱资源本来就十分拮据的认知无线网络而言, 这种方法一方面造成了频谱资源的浪费, 另一方面若频谱分配的执行周期跟不上频谱资源变化的速度, 则会造成分配结果的错误, 带来对 PU 的干扰或者多信道隐藏终端<sup>[5,10]</sup>等问题。其次, 这类分配方式要求节点维持一个庞大的本地可用信道列表, 在数据传输前必须先交换该列表以寻找到合适的信道<sup>[11~13]</sup>。这将带来较大时延, 导致数据传输性能的下降。

为此, 本文提出一种结合按需 QoS 查找的跨层多信道 MAC 协议, 实行“按需式”的频谱分配。即仅让实际参与传输的节点执行频谱分配, 并按 QoS 要求获取频谱资源。本文的创新点主要有: 1) 提出了将按需 QoS 查找与动态频谱分配相结合的机制, 节约了频谱资源, 实现了对端到端传输 QoS 要求的有效支持; 2) 使用频分双工收发机并设计了相应的控制机制, 实现了对控制信道的时刻监听并提高了传输效率; 3) 制定了支持具有不同数量收发机节点间混合通信的接入算法; 4) 通过减小竞争控制信道分组的大小来缩短节点的成功传输周期, 从而提高数据分组的传输效率。

## 2 网络场景与系统模型

本文考虑 SU 以全分布式组网, 即不存在 SU 基站的网络环境。每个 SU 可能处于不同 PU 覆盖下, 所能获得的频谱资源也可能不一致。对网络场景做如下假设。

- 1) 不考虑 SU 移动性。
- 2) 各信道相互正交、独立。
- 3) 存在公共控制信道 (CCC, common control channel)。

### 3 结合 QoS 查找的跨层多信道 MAC 协议

#### 3.1 频谱检测机制

频谱信息不仅指 PU 对频谱的占用情况, 还包括 SU 间的相互干扰情况。本文采用周期性检测的方式来实现对频谱信息的感知, 将每个检测周期分为“PU 检测时间 (PSP, PU sensing phase)”和“SU 自主时间 (SAP, SU autonomous phase)”2 部分。在 PSP 时间内, SU 完成对所有 PU 活动的检测, 以寻找到所有可用的信道。具体频谱检测算法不是本文重点, 可参考文献[14,15]等。在 SAP 时间内, SU 根据发送需要自主决定自身行为。若没有发送需要, 则按 PU 活动由弱到强的顺序, 依次检测各信道内其他 SU 的活动状况, 以获得准确的频谱信息; 若有发送需要, 则按下节“结合按需 QoS 查找与动态频谱分配的机制”及相应的接入算法执行。

本协议不要求 SU 间的时间同步, 各 SU 独立检测频谱。如需获得其他节点的检测结果, 在 SAP 时间内在公共控制信道上以分布式方式传递。本协议可适用于 overlay 和 underlay2 种频谱共享模式。Overlay 模式下, 若 PU 在 SAP 时间内出现, SU 须暂停一切发送避让 PU。Underlay 模式下因只需考虑发射功率限制, SU 在 SAP 时间内的活动没有特别限制。

#### 3.2 结合 QoS 查找与动态频谱分配的跨层机制

该机制的基本思想是: 仅让参与传输的节点执行频谱分配, 且节点按 QoS 要求获取频谱资源。本文对具体使用的频谱分配算法不做任何限制, 以保证协议通用性。仅对频谱分配算法做如下假设: 频谱分配以节点对为单位, 即一对收、发节点使用相同发送功率在一个信道内通信。但一节点可同时属于多个节点对, 分配得到多个频谱资源。现有的频谱分配算法大多基于这一假设, 典型算法如文献[16,17]等。当需要时, 节点可通过多次执行该机制来获得多个频谱资源。该机制的流程如图 1 所示, 详细执行步骤如下。

**step1** 多径路由协议确定多条到目的节点的路径。

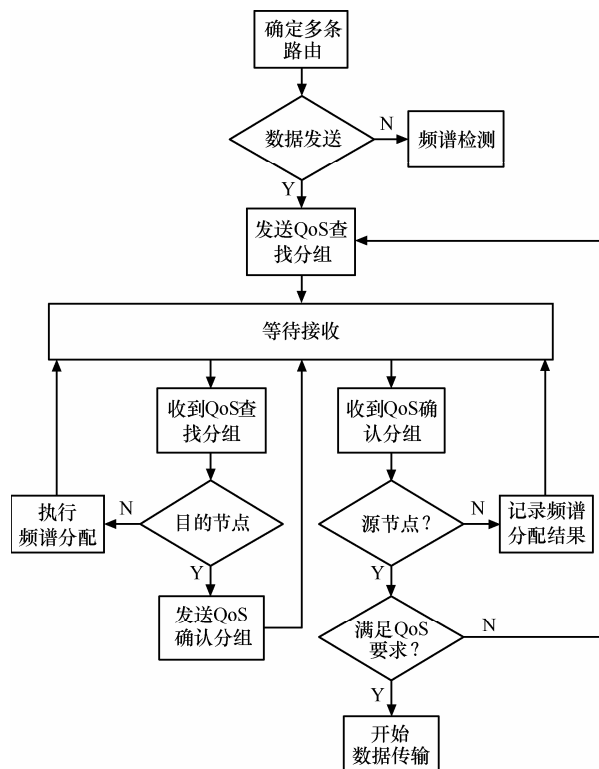


图 1 协议流程

**step2** 如有数据需要发送, 节点发起 QoS 查找, 在控制信道上以单播方式按路由传递。

**step3** 节点若收到 QoS 查找请求分组, 首先判断自己是否是目的节点。若是, 转 step4; 若不是, 转 step5。

**step4** 目的节点反向传递一个 QoS 查找确认分组, 沿途记录频谱分配结果 (节点所获频谱资源是否满足 QoS 要求)。随后等待接收。

**step5** 中间节点按 QoS 要求执行频谱分配, 规定每执行一次频谱分配, 只能获得一个频谱资源, 且节点在分配成功后在所分配信道上以所分配功率发出忙音信号表明自身存在, 以便其他未分配节点判断该信道使用情况。如果分配结果不能满足 QoS 要求, 则选择最接近的分配结果。随后等待接收。

**step6** 节点收到 QoS 查找确认分组, 首先判断自己是否是源节点。若是, 转 step7; 若不是, 转 step8。

**step7** 源节点判断频谱分配结果是否满足要求。若是, 开始数据传输。否则更换路由发送新的 QoS 查找分组, 回到 step2。

**step8** 中间节点在 QoS 查找确定分组中记录频谱分配结果, 表明自身对 QoS 要求的支持能力。随后等待接收。

这种按需式频谱分配方式的优点在于：首先，使节点仅在数据发送时才执行频谱分配，可以按照最新的频谱信息来运行频谱分配算法，提高了分配结果的准确性；其次，只有参与传输的节点才执行频谱分配，节约了频谱资源并减少了干扰，可以让节点获得更优质的频谱资源；第三，节点随着 QoS 查找分组的传递依次执行频谱分配，将避免选择和邻近节点相同的信道，达到将节点分散到不同信道，减少 SU 间干扰的目的。

### 3.3 节点接入算法

首先，将下文将涉及的术语说明如下。

1) 信道接入请求 (RTA, require to access): 发送节点在发送数据前先在 CCC 上发送 RTA, 向接收节点请求接入。RTA 中包含通信所需的频谱信息。

2) 允许接入 (PTA, permit to access): 接收节点收到 RTA, 若空闲则在 CCC 上回复 PTA, 允许发送节点接入。

3) MAC 层确认帧 ACK (ACKnowledgement): 传输完成后由接收节点发出, 确认数据发送成功。根据功能不同分为: I 类 ACK, 简单确认, 发送节点若有后续发送需重新发送 RTA; II 类 ACK, 确认发送成功, 并通知发送节点可无需发送 RTA 实现不间断传输。两类 ACK 除分组头中控制字段的相关值不同外, 其他完全一致。

4) 信道变换时间 (CCIT, channel changing interval): 发射机或接收机改变信道所需时间。

5) 传输间隔 (DIFS, DCF interframe space) 2 次传输间隔个时间间隔。沿用 IEEE 802.11 协议名称。

6) 帧间间隔 (SIFS, short interframe space): 传输过程中不同数据帧之间的时间间隔, 主要包含数据帧处理时间。沿用 IEEE 802.11 协议名称。

### 3.3.1 单收发机节点接入算法

注意到如下事实: 1) 在数据传输过程中, 发送节点的接收机和接收节点的发射机都相对空闲; 2) 数据分组的长度一般远大于控制分组。因此为提高收发机的利用率, 可以使用频分双工收发机, 让空闲的接收机和发射机在数据传输的同时变换到 CCC 上监听/发送控制分组。这在现有技术条件下不难实现。与一般使用半双工收发机的方案相比, 使用频分双工收发机将使得节点在长时间数据传输的同时, 仍能不间断监听 CCC 接收频谱信息, 从而避免出现多信道隐藏节点<sup>[5,10]</sup>的问题; 同时, 节点可以并行传输那些与当前数据传输无关的控制分组, 如频谱信息分组、路由分组、各种广播分组等, 以提高传输效率。在下文中均假设节点装备频分双工收发机。

算法执行时序如图 2 所示。发送节点首先在 CCC 上发送 RTA, 告知接收节点自身信道信息。接收节点如果空闲则回复 PTA; 否则不回应, 发送节点在 RTA 超时后便知接收节点繁忙。收到 PTA 后, 发/收节点将各自发射机/接收机调整至 RTA 标明的信道  $Ch_i$  开始数据传输。而发射节点接收机仍停留在 CCC 接收各种控制信息; 接收节点发射机则可以在 CCC 并行发送其他控制分组。在数据分组传输完之前一个 CCIT 时间, 发/收节点的发射机/接收机回到  $Ch_i$  传输 I 类 ACK, 完成本次数据传输。

节点采用 CSMA/CA 方式发送 RTA, 在每次成功发送后进行随机回退以保证公平性。如果 RTA 发生碰撞, 按二进制指数退避算法回退。具体取值可参照 IEEE 802.11 DCF<sup>[18]</sup>, 并可进一步参考 IEEE 802.11e 以支持优先级。这里不再赘述。

RTA/PTA 与 IEEE 802.11 协议中 RTS/CTS 的区

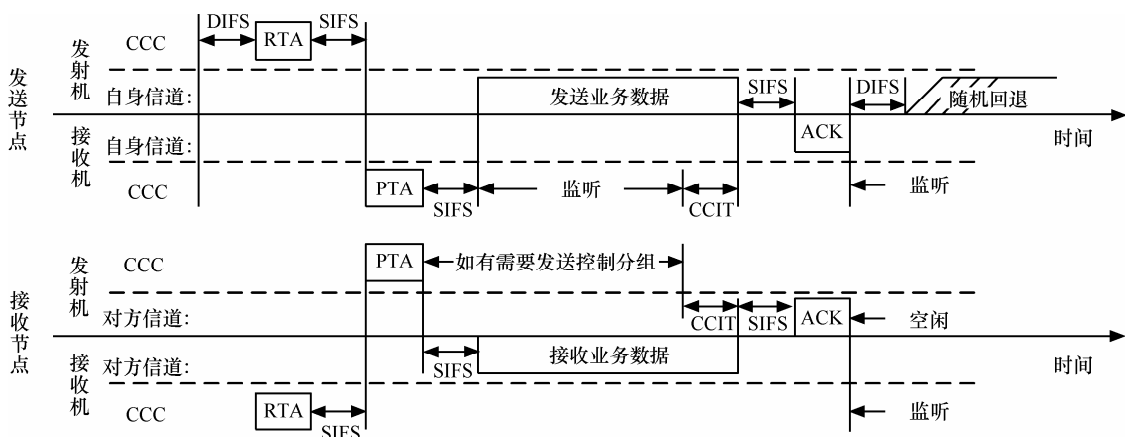


图 2 单收发机节点接入时序图

别在于：前者仅负责传递信道信息，信道分配的功能由“结合按需 QoS 查找与动态频谱分配的机制”完成；而后者的作用是预约信道，相当于在时间上实现对信道使用权的分配。

### 3.3.2 多收发机节点接入算法

多收发机节点可以使用多余的收发机专门监听 CCC。同时，当处于多个数据流的交汇处，并获得多个频谱资源时，多个收发机可互不干扰的同时处理这些数据流。

单收发机节点之所以要在每次发送成功后回到 CCC 重新发送 RTA，是为了使其他节点有机会接入，以保证公平性。多收发机节点因为有多余的收发机监听 CCC，不需要所有收发机在发送完成后都回到 CCC 监听。因此，多收发机节点在接入算法上与单收发机节点略有不同：当有多余的空闲收发机监听 CCC 时，多收发机节点对现有的数据传输回复 II 类 ACK，实现不间断传输；否则，该节点随机选择任意收发机回到 CCC 监听，对该信道的数据传输回复 I 类 ACK，其他信道回复 II 类 ACK。

### 3.4 主要控制帧的帧结构

几种重要控制帧的格式如图 3 所示。其中“控制字段”与 IEEE 802.11 的“Frame Control”字段定义完全一致，仅利用其“Type”字段的保留值 0000~1111<sup>[18]</sup>，定义其中 0000~0011 分别代表 RTA、PTA、I 类 ACK、II 类 ACK。其他部分限于篇幅，不再赘述。

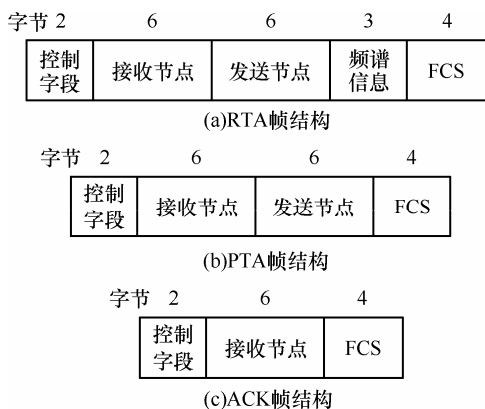


图 3 主要控制帧的帧结构

## 4 协议性能分析

### 4.1 仿真参数

本文仿真采用 MATLAB 2011a 完成。场景中有 1~5 个 PU，1~30 个 SU。频谱共享模式采用 overlay

方式。PU 活动采用指数分布的 ON-OFF 模型，主要参数如表 1 所示，其他控制分组大小由图 3 计算得到。

表 1 仿真参数

参数	值
PU 平均活跃时间 (ON 状态)	1s
PU 平均非活跃时间 (OFF 状态)	5s
PU 检测时间 (PSP)	1s
SU 自主时间 (SAP)	1s
数据负载大小	1 000byte
公共控制信道最大传输速率	1Mbit/s
数据信道最大传输速率	1Mbit/s
DIFS	50μs
SIFS	10μs

### 4.2 竞争控制信道分组的影响

经过大量仿真及深入分析，本文发现一个重要结论：可以通过减小竞争控制信道分组的大小来提高节点传输效率。

首先通过分析大量文献<sup>[19~21]</sup>有以下结论，在 CSMA/CA 信道中，节点有成功发送、失败发送、回退、挂起 4 种状态。在任意时刻节点处于其中某一状态的概率（分别用  $P_s$ 、 $P_c$ 、 $P_b$ 、 $P_s$  表示）仅由节点密度  $\rho$  决定，且分别与  $\rho$  成单减、单增、单增、单增关系。 $\rho$  的定义是载波监听范围内邻居节点的个数。

由此可推出定理 1。

**定理 1** 称节点 2 次成功发送之间的时间间隔为成功发送周期  $T_{ac}$ 。则  $T_{ac}$  与  $\rho$  成单调递增关系，且与竞争控制信道的数据分组大小成单增关系。如图 4 所示。

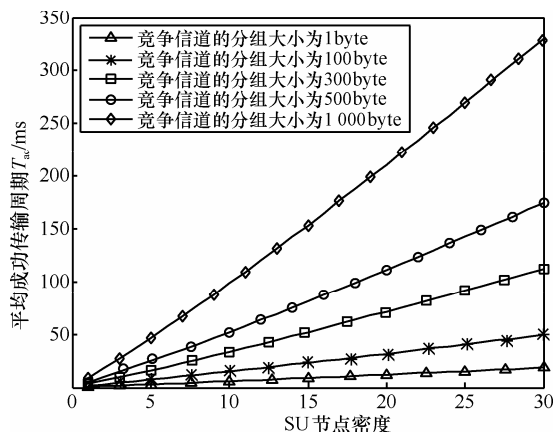


图 4 成功传输周期变化

**证明** 文献[19~21]对 CSMA/CA 的研究基于单信道 MAC 协议。多信道 MAC 协议采用 CSMA/CA 机制作为控制信道的接入方式，节点处于 4 种状态的概率与单信道下一致（因为仅与节点密度相关），但时间长度却不一样。用  $T_t$ 、 $T_c$ 、 $T_b$ 、 $T_s$  表示 4 种状态的时间长度。根据图 2 并结合文献[19~21]中的分析，可得  $T_t$ 、 $T_c$ 、 $T_b$ 、 $T_s$  的计算公式如下

$$\begin{cases} T_t = \text{传输间隔} + (\text{请求帧} + \text{回应帧})\text{传输时间} + \\ \quad (\text{数据} + \text{确认})\text{传输时间} + \text{多个帧间间隔} \\ T_c = \text{传输间隔} + \text{请求帧传输时间} \\ T_s = \text{传输间隔} + (\text{请求帧} + \text{回应帧})\text{传输时间} + \\ \quad \text{帧间间隔} \\ T_b: \text{由物理层决定} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中“传输间隔”指 2 次完整传输间的时间间隔，如本文的 DIFS；“请求帧”指参与信道竞争的分组大小，如本文的 RTA；“回应帧”指对“请求帧”的回应，如本文的 PTA；“(数据+确认)传输时间”指竞争信道成功后数据及 ACK 的传输时间；“帧间间隔”指在一次传输内各种帧间的间隔，如本文的 SIFS。

式(1)适用于任何采用 CSMA/CA 作为控制信道接入方式的多信道 MAC 协议。其与单信道 MAC 协议的不同仅在于  $T_s$ 。在单信道环境下  $T_s$  等于  $T_t$ 。而在多信道环境下，数据负载在数据信道上传输，各节点的“挂起”状态只针对其他节点传输的“请求帧—回应帧”。因此  $T_s$  如式(1)所示。

由  $T_t$ 、 $T_c$ 、 $T_b$ 、 $T_s$  和  $P_t$ 、 $P_c$ 、 $P_b$ 、 $P_s$  可推得  $T_{ac}$ ，如式(2)所示。

$$T_{ac}(\rho) = \frac{T_t P_t(\rho) + T_c P_c(\rho) + T_b P_b(\rho) + T_s P_s(\rho)}{P_t(\rho)} \quad (2)$$

由  $P_t$ 、 $P_c$ 、 $P_b$ 、 $P_s$  与  $\rho$  的单调关系可直接推得“ $T_{ac}$  与  $\rho$  成单增关系”。由于不考虑节点移动性， $\rho$  是固定的，则  $P_t$ 、 $P_c$ 、 $P_b$ 、 $P_s$  固定； $T_b$  由物理层决定是固定的；数据分组大小一般设为固定，即数据负载传输时间也固定。则唯一可变的是由竞争控制信道的分组决定的  $T_t$ 、 $T_c$ 、 $T_s$ 。结合式(1)，即得“ $T_{ac}$  与竞争控制信道的数据分组大小成单增关系”。

### 4.3 SU 最大节点密度分析

SU 节点必须周期性收集 PU 频谱信息，能够用于传输的时间是有限的，其最大长度为 3.1 节中的

“SU 自主时间 SAP”。另一方面由于节点采用竞争方式接入公共控制信道，若冲突太强则会造成长时间无法接入，即节点成功传输周期  $T_{ac}$  不能无限制长。因此，在认知无线多跳网中，必须满足  $T_{ac} < SAP$ 。

由上面的分析， $T_{ac}$  由节点密度  $\rho$  唯一决定，则  $T_{ac} < SAP$  的要求可转化为对  $\rho$  的限制：即 SU 的节点密度不能超过  $\rho_{max}$ 。由式(2)可推得  $\rho_{max}$  为

$$\rho_{max} = T_{ac}^{-1}(SAP) \quad (3)$$

其中， $\rho_{max}$  的值可通过式(2)和式(3)计算出，其随 SAP 的变化规律如图 5 所示。

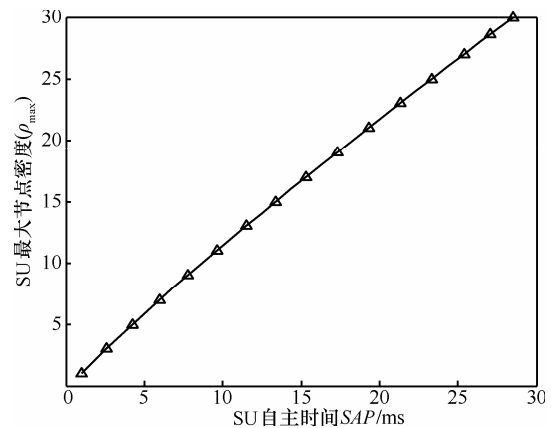


图 5 SU 最大节点密度变化

### 4.4 信道利用率

SU 的所有传输只能在有限的 SAP 时间内进行。如果用于传输控制分组的时间过多，则必然影响对数据分组的传输效率。定义信道利用率为：SAP 内用于传输数据分组的时间的百分比。计算公式如式(4)所示。

$$\text{信道利用率} = \frac{\lfloor SAP/T_{ac} \rfloor E[L]/C_{DATA}}{SAP} \quad (4)$$

其中， $\lfloor \cdot \rfloor$  为向下取整运算符， $\lfloor SAP/T_{ac} \rfloor$  表示在 SAP 时间内成功发送的次数； $E[L]$  表示平均数据分组大小； $C_{DATA}$  表示数据信道的带宽。

本文协议与其他 MAC 协议<sup>[12,22]</sup>的信道利用率对比如图 6 所示。本文通过 2 个方面来提高节点的信道利用率：1) 通过减小竞争控制信道的分组的大小来减小  $T_{ac}$ ；2) 在数据传输的同时传输控制分组。本文通过“按需式”的频谱分配方式，使竞争控制信道的分组 (RTA/PTA) 中仅包含一个信道的信息，减小竞争公共控制信道的分组的大小，由定

理 1 可知可以减小  $T_{ac}$ 。再进一步由式(4)知, 可以起到提高信道利用率的作用。此外, 并行地发送控制分组和数据分组, 必然可以将传输控制分组所需的时间节约出来传输数据分组, 有效提高信道利用率。如图 6 所示, 通过大量仿真验证, 本文 MAC 协议相比较其他文献的信道利用率将提高至少 10% 以上。

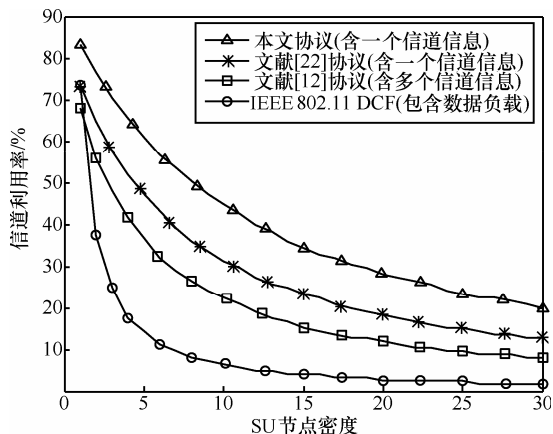


图 6 信道利用率对比

#### 4.5 网络满负载时的性能分析

网络满负载 (saturation throughput) 的定义是: 网络中所有节点的发送队列始终非空, 始终有发送需求。则此时网络具有最大数量的节点参与竞争, 冲突概率最大。满负载时由于节点间冲突最严重, 反映的是端到端传输性能的下限。

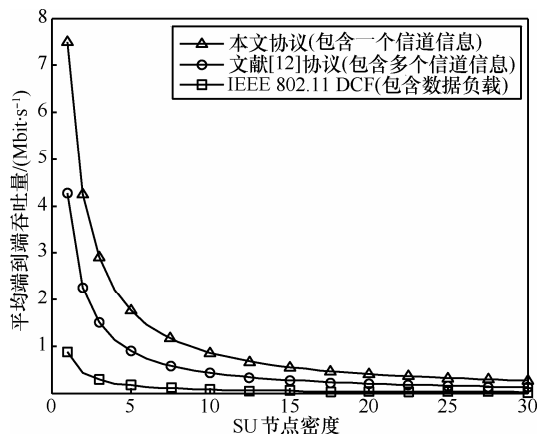
2 个最重要的反映端到端传输性能的指标: 平均吞吐量和平均时延的计算公式如式(5)所示。其中  $N$  表示端到端路径上所有节点的集合。

$$\begin{cases} S = \min_{i \in N} \left\{ \frac{\lfloor SAP/T_{ac} \rfloor E[L]}{SAP} \right\} \\ D = \sum_{i \in N} \frac{SAP}{\lfloor SAP/T_{ac} \rfloor} \end{cases} \quad (5)$$

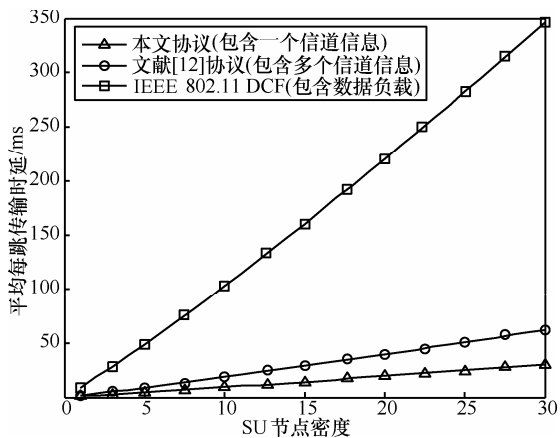
本文通过 3 个方面来提高端到端吞吐量: 1) 通过“按需式”的频谱分配, 提高频谱分配结果的可靠性, 避免多信道隐藏节点的出现; 2) 通过减小竞争控制信道的分组的大小来减小  $T_{ac}$ , 从而提高传输性能; 3) 通过并行传输部分控制分组来提高传输效率。首先, “按需式”的频谱分配方式, 除了使节点获得满足 QoS 要求的传输能力外, 还起到了获得最新频谱信息, 避免“主动式”频谱分配方式可能带来的频谱信息过期问题的作用, 从而降低出现多信道隐藏节点的可能, 提高传输效率。其二,

通过式(5)可以看出,  $SAP$ 、 $E[L]$ 是固定值, 节点成功发送周期  $T_{ac}$  是端到端传输的关键因素。对特定的网络  $\rho$  是固定的, 由定理 1, 则对传输性能的提高可以通过减小竞争控制信道的分组的大小来实现。本文用于竞争控制信道的 RTA 和 PTA 中只包含一个信道的信息, 相比较传统的 IEEE 802.11 协议及其他认知无线网络 MAC 协议, 分组大小已经大大降低, 从而能够提供更高的传输效率。第三, 并行式的传输方式肯定能使传输效率更高。虽然本文只并行传输了部分控制分组, 但每并行传输一个控制分组, 其所节约的传输时间、回退时间、冲突重传时间等都可以使更多的数据分组得到传输, 最终提高传输性能。

本文协议与 IEEE 802.11 协议以及其他认知无线网络 MAC 协议<sup>[12]</sup>的对比如图 7 所示。为突出反映不同协议节点接入能力的区别, 数据信道的带宽设为无限大, 即图 7 中曲线表示的是满负载条件下协议性能的上界。



(a) 满负载时平均端到端吞吐量比较



(b) 满负载时平均每跳时延比较

图 7 满负载时的端到端传输性能比较

### 4.6 空负载时端到端传输性能

空负载的定义是：除了所考察的唯一端到端传输外，没有其他任何节点进行传输。空负载反映的是端到端传输性能的上限。

空负载时由于实际进行传输的节点密度很低，因而发生冲突的可能性低，相应的具有最短的成功发送周期  $T_{ac}$  和最好的传输性能。一般情况下，载波监听半径为传输半径的 1~2 倍，此时端到端路径上的节点密度一般为 2~4 个（如图 8 所示）。 $P_t$ 、 $P_c$ 、 $P_b$ 、 $P_s$  按文献[21]算法求得， $T_t$ 、 $T_c$ 、 $T_b$ 、 $T_s$  按

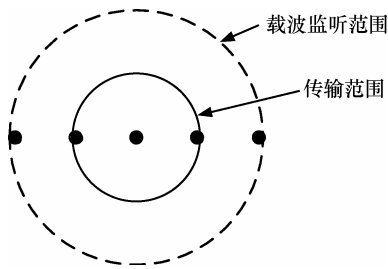
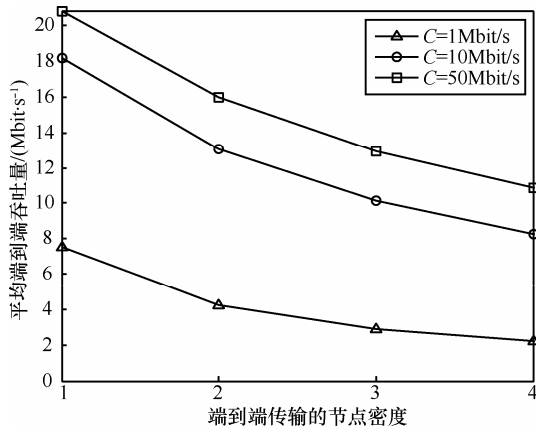
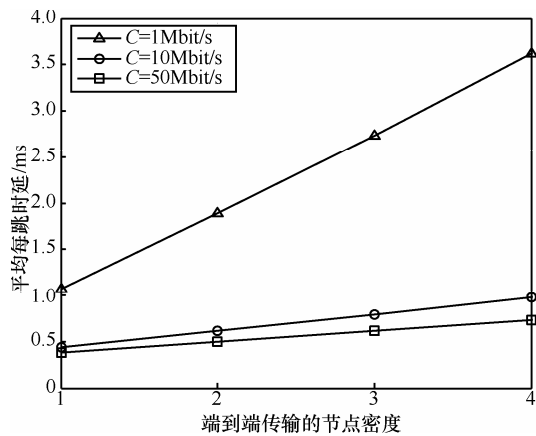


图 8 空负载时的节点密度



(a) 空负载时平均端到端吞吐量比较



(b) 空负载时平均每跳时延比较

图 9 空负载时的端到端传输性能

式(1)计算。经大量计算及仿真，当数据负载平均大小为 1 000byte，公共控制信道的最大传输速率为 1Mbit/s，数据信道带宽为无限大时，本文协议成功发送周期  $T_{ac}$  在 5ms 以内。则空负载时端到端的吞吐量至少可以达到 1 000byte/5ms=2Mbit/s 以上，每跳时延在 5ms 以内。仿真结果如图 9 所示，图中 C 为公共控制信道的带宽。

### 5 结束语

本文提出了一种适用于认知无线多跳网络的多信道 MAC 协议。该协议创新性地提出将按需 QoS 查找与频谱分配跨层相结合的机制，仅让参与传输的节点在有数据发送需要时才按 QoS 要求获取频谱。该机制一方面节约了频谱资源，减小了 SU 间的干扰；另一方面使得参与传输的节点具有提供 QoS 保障的能力。此外，协议规定使用频分双工收发器，在数据传输的同时在控制信道上收/发控制分组，实现了不间断监听控制信道的能力，并提高传输效率。然后，针对节点可能具有不同数量收发机的情况，制定了支持这些节点间混合通信的接入机制。从而最终形成了一套完整的 MAC 协议。

本文协议适用于 overlay 和 underlay 2 种频谱共享模式，并且不限制具体使用的频谱分配算法，具有良好的通用性。通过大量仿真实验验证，该协议在信道利用率、端到端吞吐量及端到端时延等方面的性能都优于传统的认知无线网络 MAC 协议。

### 参考文献：

- [1] MITOLA J. Cognitive Radio: an Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[D]. Royal Institute of Technology, 2000.
- [2] DOMENICO A, STRINATI E C, BENEDETTO M G D. A survey on MAC strategies for cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012,14(1):21-44.
- [3] THOMAS R W, DASILVA L A, MACKENZIE A B. Cognitive networks[A]. IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN'05)[C]. 2005. 352-360.
- [4] MAHONEN P, ZORZI M. Cognitive wireless networks[J]. Wireless Communications, 2007,14(4): 4-5.
- [5] SO J, VAIDYA N H. Multi-channel MAC for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver[A]. Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'04)[C]. 2004. 222-233.
- [6] WU S L, LIN C Y, TSENG Y C, et al. A new multi-channel MAC



- protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks[A]. *Parallel Architectures, Algorithms and Networks*[C]. 2000. 232-237.
- [7] CAI L X, LIU Y K, SHEN X M, *et al.* Distributed QoS-aware MAC for multimedia over cognitive radio networks[A]. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*[C]. 2010.1-5.
- [8] JHA S C, PHUYAL U, RASHID M M, *et al.* Design of OMC-MAC: an opportunistic multi-channel MAC with QoS provisioning for distributed cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10(10):3414-3425.
- [9] SHIH C F, WU T Y, LIAO W. DH-MAC: a dynamic channel hopping MAC protocol for cognitive radio networks[A]. *IEEE International Conference on Communications (ICC 2010)*[C]. 2010. 1-5.
- [10] ZHOU Z, PENG T Z, CUI J H, *et al.* Handling triple hidden terminal problems for multi-channel MAC in long-delay underwater sensor networks[A]. *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*[C]. 2010.1-5.
- [11] SALAMEH H A B, KRUNZ M M, YOUNIS O. MAC protocol for opportunistic cognitive radio networks with soft guarantees[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(10):1339-1352.
- [12] JHA S, PHUYAL U, RASHID M, *et al.* Design of OMC-MAC: an opportunistic multi-channel MAC with QoS provisioning for distributed cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(10): 3414-3425.
- [13] CHUAH M, CHEN W. Cooperative multichannel MAC (COMMAC) for cognitive radio networks[A]. *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)*[C]. 2010.1-5.
- [14] PEH E C Y, LIANG Y C. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with weighted decision fusion schemes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(12):3838-3847.
- [15] RAO R, QI C. Subspace-based cooperative spectrum sensing for cognitive radios[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(3):611-620.
- [16] HUANG J, BERRY R, HONIG M L. Auction-based spectrum sharing[J]. *Mobile Networks and Applications (MONET)*, 2006, 11: 405-418.
- [17] CHEN L, IELLAMO S, COUPECHOUX M, *et al.* An auction framework for spectrum allocation with interference constraint in cognitive radio networks[A]. *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*[C]. 2010.1-9.
- [18] IEEE 802.11 WG, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification[S]. 2007.
- [19] 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.
- [20] XIAO Y. Performance analysis of priority schemes for IEEE 802.11 and IEEE 802.11e wireless LANs[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(4):1506-1515.
- [21] TSERTOU A, LAURENSEN D I. Revisiting the hidden terminal problem in a CSMA/CA wireless network[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(7):817-831.
- [22] SU H, ZHANG X. Cognitive radio based multi-channel MAC protocols for wireless ad hoc networks[A]. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2007)*[C]. 2007. 4857-4861.

#### 作者简介:



孙杰 (1982-), 男, 四川绵阳人, 电子科技大学博士生, 主要研究方向为认知无线网络协议、跨层协同通信。



郭伟 (1964-), 男, 四川达州人, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信网、信号与信息处理。