

## 面向实时业务的认知无线网络 MAC 层频谱接入方案

李瑞芳<sup>1,2</sup>, 刘泉<sup>1,2</sup>, 李仁发<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070;  
3. 湖南大学 嵌入式系统与网络实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 为满足认知无线网络中宽带业务实时传输的需求, 提出低延迟的 MAC 层频谱接入方案, 包括频谱感知调度与信道接入竞争两部分。在频谱感知阶段, 认知用户选取最佳可用信道数实现感知与传输的延迟最小化; 在信道接入竞争阶段, 协议考虑频谱资源动态变化的特点, 通过设计数据帧格式以及邻居节点协同侦听机制, 减小信道冲突与“聋终端”的影响。理论与实验结果表明, 与传统的认知无线网络 MAC 层协议相比, 提出的接入方案数据传输延迟更短, 同时在授权信道空闲率较大时吞吐量性能略优。

**关键词:** 认知无线网络; 频谱接入方案; 媒体访问控制层; 实时; 低延迟

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)04-0035-09

## Spectrum access scheme of MAC layer for real-time traffic in cognitive radio network

LI Rui-fang<sup>1,2</sup>, LIU Quan<sup>1,2</sup>, LI Ren-fa<sup>3</sup>

(1. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
2. Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing,  
Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
3. Embedded System & Networking Laboratory, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** These protocols have not satisfied the emergent needs of the increasing real-time businesses and high-level service quality. In order to satisfy the requirement for real-time transmission of high broadband service in cognitive radio networks, a low-delay spectrum access scheme of MAC layer, LD-SAS, was proposed. In spectrum sensing phase, the transmission delay can be minimized by choosing the optimum available channel number of sensing channels. In channel access contention phase, the effect of channel conflict problem and deaf terminal problem in multichannel coordination can be reduced by designing channel access frame. The theoretical and experimental results were presented to demonstrate the effectiveness of our proposed protocol. Compared with the traditional MAC protocols for cognitive networks, LD-SAS has shorter delay time and slightly better throughput performance when the probability of channel being idle is bigger.

**Key words:** cognitive radio network; spectrum access scheme; MAC layer; real-time; low delay

### 1 引言

认知无线网络 (CRN, cognitive radio network) 中, 认知用户 (SU, secondary user) 利用认知无线电技术感知频谱空洞, 采用机会式动态频谱接入的

方式, 在不影响授权用户 (PU, primary user) 传输的情况下, 共享授权频谱资源, 从而提高频谱利用率, 缓解网络中频谱资源短缺问题<sup>[1]</sup>。近年来, 包括多媒体业务在内的宽带业务逐渐成为无线网络的核心业务, 低延迟传输成为保障业务 QoS 需求

收稿日期: 2012-12-28; 修回日期: 2013-04-20

基金项目: 教育部科学技术研究重大基金资助项目 (313042); 国家自然科学基金资助项目 (51175389, 61173036); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (2013-VII-001); 中央高校基本科研业务基金资助项目 (2014-IV-065)

**Foundation Items:** The Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (313042); The National Natural Science Foundation of China (51175389, 61173036); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2013-VII-001); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2014-IV-065)

的关键。媒体访问控制 (MAC, medium access control) 层设计确定认知用户使用什么信道, 采用何种策略接入, 建立节点共享信道的规则, 是实现认知无线网络频谱共享的基本前提<sup>[2]</sup>, 如何在认知无线网络频谱资源动态变化的情况下, 通过 MAC 层频谱接入方案的设计实现低延迟传输成为亟待解决的难题。

与传统无线网络不同, 认知无线网络中 MAC 层设计重点关注频谱接入方案, 其中, 频谱感知调度与信道接入竞争是关键组成部分<sup>[3]</sup>。本文基于频谱聚合技术, 优化频谱感知与信道接入竞争机制, 提出低延迟的频谱接入方案 (LD-SAS, low-delay spectrum access scheme), 主要包括 2 个部分内容。

1) 分析 CRN 中 MAC 层数据传输时间与信道感知时间的平衡问题, 通过建立频谱感知与数据传输的规划函数, 确定最优可用信道数目, 使延迟最小化。

2) 考虑 CRN 频谱动态变化的特点, 改进公共控制信道的信道接入竞争机制, 解决认知无线网络多信道协调 (MCC, multi-channel coordination) 中的信道冲突与聋终端问题, 避免重传从而进一步降低延迟。

## 2 相关工作

目前的 CRN MAC 层设计研究成果从协议实现结构角度上可分为集中式与分布式两大类, 其中分布式 MAC 协议按照射频数量又分为多射频以及单射频两类, 本文重点研究单射频的分布式 MAC 层协议设计方案, 其代表性的协议与算法主要包括: HC-MAC 协议<sup>[4]</sup>通过限制频谱感知范围, 提高传输速率, 获得高吞吐量, 但协议的控制信息过多, 易使控制信道饱和; 文献<sup>[5]</sup>提出的信道分配算法关注业务分组的传输成功率, 减小分组丢失率, 从而提高网络吞吐量; POMDP 协议<sup>[6]</sup>采用部分可观测马尔可夫决策过程对授权网络的信道模型进行估计, MAC 层根据估计结果优化频谱接入, 协议假设频谱使用状况不变, 且优化过程复杂; DySCO-MAC 协议<sup>[7]</sup>注重解决 CR 网络中 MAC 协议的隐藏终端、暴露终端以及 MCC 问题从而提高网络吞吐量, 协议频谱管理结构较为复杂; BCA<sup>[8]</sup>基于信道切换代价考虑频谱接入问题, 减少信道碰撞概率, 提高频谱利用率; 在 IEEE CrownCom 2012 会议上, 研究者 Fakhreddine G<sup>[9]</sup>从频谱切换的角度考虑机会式频谱接入策略, 提出当授权用户重新出现时 2 种信道

接入策略。以上协议均旨在通过优化频谱感知或频谱接入, 提高频带利用率, 从而提高网络吞吐量, 未考虑针对业务 QoS 需求提供实时保障。文献<sup>[10]</sup>针对认知无线网络中不同类型业务的 QoS 需求, 通过多属性参数与信道属性匹配, 选择最优信道, 减少重传, 但频谱接入的具体实现机制文中并未做出说明。

随着通信技术不断发展和完善, 实时业务逐渐成为无线通信的核心业务, 低延迟成为保障实时业务传输的关键 QoS 指标。与大多数研究工作关注网络吞吐量不同的是, 本文重点关注认知网络中实时业务的传输速率, 降低传输延迟。

## 3 系统描述与问题建模

### 3.1 授权用户活动模型

不失一般性, 对授权用户业务流量建模 ON-OFF 模型, ON 状态表示授权用户正在使用信道, OFF 状态表示信道空闲, 允许 CR 用户接入该信道。OFF 和 ON 状态的持续时间分别用随机变量  $X$  和  $Y$  表示。假设随机变量  $X$  和  $Y$  独立, 且分别服从参数为  $\alpha$  和  $\beta$  的指数分布, 则  $X$ 、 $Y$  的概率密度函数可分别表示为  $f_X(x)=\alpha e^{-\alpha x}$  与  $f_Y(x)=\beta e^{-\beta x}$ 。由此, 授权频谱占用与空闲的概率分别为:  $p_{\text{off}}=\alpha/(\alpha+\beta)$ ,  $p_{\text{on}}=\beta/(\alpha+\beta)$ 。

### 3.2 问题建模

SU 具有频谱聚合能力, 能将分散的信道容量小的频段聚合为完整的信道容量较大的频段, 以支持高带宽需求<sup>[11]</sup>。比如采用正交频分复用技术, 通过开启或关闭子载波, 灵活聚合当前感知到的空闲频段。

每个 CR 终端有 2 个半双工收发器, 即控制收发器和数据收发器, 控制收发器在公共控制信道交换控制信息, 感知授权信道得到可用信道集合, 通过竞争获取信道接入权, 数据收发器动态地切换到获得的数据信道上传输数据, 业务传输的帧结构如图 1 所示。由图 1 可知, 忽略控制信道切换到数据信道的延迟, 业务传输的时间主要由信道感知时段、接入竞争时段以及数据传输时段 3 部分组成。增加信道感知时间能使 SU 获得更多可用信道, 通过频谱聚合技术使频带增大, 传输速率提高, 减少数据传输时间, 降低时延, 但同时, 增加的信道感知时间延迟了业务开始传输的时间。因此, 如何取得数据传输时间与信道感知时间的平衡是 MAC 协议需要解决的关键问题。

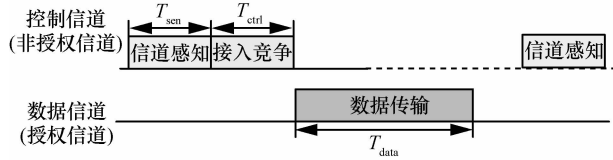


图 1 传输帧结构

假设 SU 每感知一个授权信道需要时间  $\delta$ ，则感知  $n$  个信道所花费的时间为  $n\delta$ ，因此确定感知信道的数量是关键。以  $N$  表示整个网络中授权信道的总数， $m$  为 SU 通过感知获得的空闲信道数，假设 SU 能正确感知信道（不考虑虚警和漏报的情况），授权信道相互独立且空闲的概率均为  $p_{\text{off}}$ ，获得  $m$  个可用信道遵循二项式分布。假设获得  $m$  个可用信道 SU 需要感知  $n=m+k$  个信道，由于当信道感知得到  $m$  个可用信道后即停止继续感知，因此感知的最后一个信道一定为可用空闲信道，需要多感知  $k$  个信道的概率为  $P(k)$ ，数学期望为  $E(k)$ ，如式(1)和式(2)所示。

$$P(k) = C_{m+k}^{m-1} p_{\text{off}}^{m-1} (1-p_{\text{off}})^k p_{\text{off}} = C_{m+k}^{m-1} p_{\text{off}}^m (1-p_{\text{off}})^k \quad (1)$$

$$E(k) = \sum_{k=0}^{N-m} k \cdot C_{m+k}^{m-1} p_{\text{off}}^m (1-p_{\text{off}})^k \quad (2)$$

由于 SU 在公共控制信道竞争过程遵循相同的退避规则，则在相同网络情况下不同 SU 的竞争时间  $T_{\text{ctrl}}$  的均值大致相同，因此，业务传输时间主要由信道感知时间  $T_{\text{sen}}$  与数据传输时间  $T_{\text{data}}$  决定。设待传输业务的数据量为  $L$ ， $N$  条授权信道具有相同带宽，传输速率为  $R$ ，则在数据信道上传输所需要的时间为  $T_{\text{data}}=L/(mR)$ ，由此可得，将获得的  $m$  条可用信道通过频谱聚合后，业务传输总延迟为

$$T(m) = T_{\text{sen}} + T_{\text{ctrl}} + T_{\text{data}} \\ = [m + \sum_{k=0}^{N-m} k C_{m+k}^{m-1} p_{\text{off}}^m (1-p_{\text{off}})^k] \delta + L/(mR) + T_{\text{ctrl}} \quad (3)$$

用  $N_F$  代表在频谱聚合技术的限制下，一个 SU 最多能使用的信道数。欲使数据传输延迟最小，MAC 层信道感知与接入优化问题可形式化描述为如下规划问题

$$\text{Minimize } [m + \sum_{k=0}^{N-m} k \cdot C_{m+k}^{m-1} p_{\text{off}}^m (1-p_{\text{off}})^k] \cdot \delta + L/(mR) \\ \text{Subject to } m \leq \min\{N, N_F\}$$

## 4 算法设计与分析

### 4.1 频谱感知调度—最佳可用信道数 $m$ 确立

确定业务传输时间最短情况下需获得的可用信道数  $m$ ，即将业务传输时间最小化问题转化为最佳可用信道数  $m$  的选择。SU 在感知频谱过程中，每多获得 1 个可用信道，计算业务传输所耗时间。假设现在感知获得  $m$  个可用信道，则业务传输时间为如式(3)所示，同时 SU 预测再多感知一个信道所获得的业务传输时间为

$$T(m+1) = [m+1 + E(m+1)] \cdot \delta + \frac{L}{(m+1)R} + T_{\text{ctrl}} \quad (4)$$

比较  $T(m+1)$  与  $T(m)$ ，如果  $T(m+1)$  不小于  $T(m)$ ，说明现在是最佳停止时机，当前获得的可用信道数就是最佳值；如果  $T(m+1)$  小于  $T(m)$ ，说明当前可用信道数不是最佳值，需要继续感知，直到到达最佳。

### 4.2 信道接入竞争机制

#### 4.2.1 信道接入竞争过程

认知用户感知获得可用信道集合后，通过在公共控制信道竞争接入成功，并与目的节点进行协商确定可用信道的选择，然后切换至数据信道进行数据传输。信道接入竞争过程如图 2 所示，需要发送数据的源节点首先监测控制信道，如信道忙则退避，如信道空闲则等待 DIFS 后，发送 RTS 帧。与

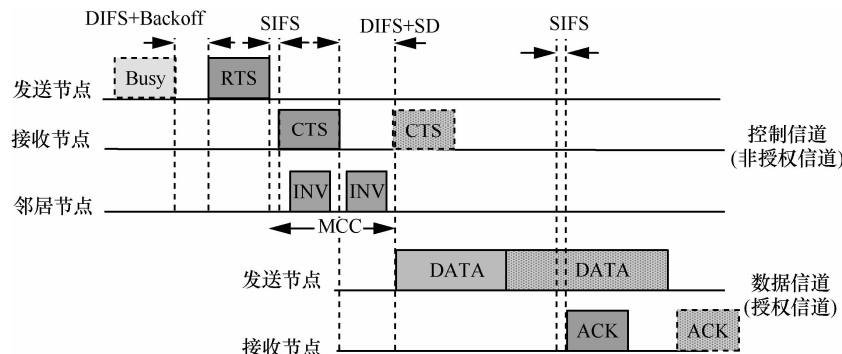


图 2 信道接入竞争过程

其他协议不同的是, 针对 CRN 频谱资源动态变化的特点, LD-SAS 协议中 RTS 帧包含了待聚合信道列表与待传输的数据量, 如图 3(a)所示。其中, 待聚合信道列表包括通过最小化数据传输延迟限制所获得的可用信道信息, 即  $m$  个空闲授权信道。而待传输数据量指节点本次通信待传输的数据帧大小, 即式(4)中的  $L$ 。目的节点接收到 RTS 帧后, 依据信道列表的信息确认能聚合的信道, 如果  $m$  个信道均可用, 确认聚合信道列表, 若目的节点感知到其中某个信道被授权用户或邻居节点占用, 则返回  $0 < m' < m$  个可用待聚合信道, 同时根据待传输数据帧大小  $L$  及可聚合信道数  $m$  或  $m'$  计算传输时间, 返回 CTS 帧。

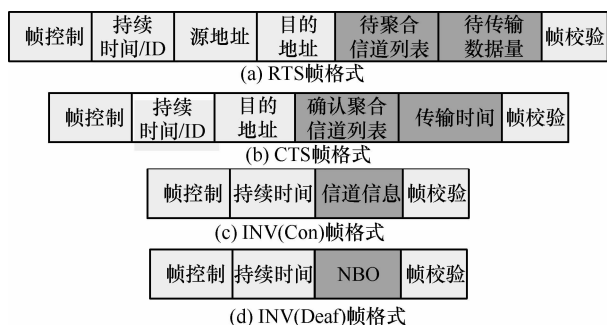


图 3 数据帧格式

### 4.2.2 多信道协调问题的解决

多信道协调是单接口多信道 MAC 协议节点通信存在的重要问题<sup>[12]</sup>, 主要包括信道冲突和“聋终端”2 个方面, 在认知频谱资源动态变化的情况下, 这个问题的解决更为复杂。协议为减小 MCC 问题的影响, 源节点与目的节点在控制信道协商交换信息的同时, 引入邻居节点协同侦听机制。邻居节点侦听控制信道的 RTS 与 CTS 帧, 若出现 MCC 问题则在 MCC 期间内返回 INV 帧, 具体规则如下。

**规则 1** 若出现信道冲突, 即源节点与目的节点协商确认的可用信道列表中, 有信道已经被占用 (包括授权用户和其他认知用户), 则目的节点的邻居节点在 MCC 期间的任意时间内发送 INV(Con) 帧, 告知已占用信道的信息, 帧结构如图 3(c)所示。当目的节点收到 INV(Con)帧后, 调整 CTS 中的确认信道列表并重新计算数据传输时间重新发送 CTS 帧, 源节点接收到 CTS 帧之后, 切换至协商的数据信道, 开始发送数据。

**规则 2** 若出现“聋终端”问题, 即当源节点发送 RTS 帧时, 目的节点在正处于数据信道通信状

态, 无法接收信息。由于引入了邻居节点协同侦听机制, 此时源节点与目的节点的共同邻居节点能监测到“聋终端”情况的发生, 邻居节点向源节点发送 INV(Deaf)帧, 通知源节点需要退避 (NBO, need back off), 帧格式如图 3(d)所示。源节点接收到 INV(Deaf)帧后, 退避后重新发送 RTS。

同时, 由于在信道接入竞争过程中, 目的节点广播了确认聚合信道列表与传输时间信息, 通信范围内的邻居节点可以获知在此段时间内信道占用情况, 从而进一步避免认知用户之间的信道冲突。

## 4.3 性能分析

### 4.3.1 延迟分析

#### 1) 信道感知时段分析

由图 1 可知, 数据传输延迟主要由频谱感知时段、信道接入竞争时段以及数据帧传输 3 部分组成。其中频谱感知时间为

$$T_{\text{sen}} = [m + \sum_{k=0}^{N-m} k \cdot C_{m+k-1}^{m-1} p_{\text{off}}^m (1-p_{\text{off}})^k] \cdot \delta \quad (5)$$

#### 2) 信道接入竞争时段分析

如图 2 所示, 在频谱接入竞争时段, SU 在公共控制信道发送控制帧, 存在发送成功、信道冲突、聋终端、发送失败以及信道空闲 5 种情况, 其时间长度分别如下

$$T_{\text{ctrl}} = \begin{cases} T_{\text{success}} = 2T_{\text{DIFS}} + 2T_{\text{SIFS}} + T_{\text{RTS}} + T_{\text{CTS}} + T_{\text{SD}} \\ T_{\text{conflict}} = 2T_{\text{DIFS}} + 2T_{\text{SIFS}} + T_{\text{RTS}} + 2T_{\text{CTS}} + T_{\text{SD}} \\ T_{\text{deaf}} = T_{\text{DIFS}} + T_{\text{RTS}} + T_{\text{INV}} + T_{\text{BO}} + T_{\text{success}} \vee T_{\text{conflict}} \\ T_{\text{failure}} = T_{\text{DIFS}} + T_{\text{RTS}} \\ T_{\text{idle}} = \sigma \end{cases} \quad (6)$$

假设 MAC 层采用标准的指数退避,  $r$  表示最高退避阶数,  $W_0$  为最小退避窗口值,  $s$  表示 SU 总数, 采用前期研究成果<sup>[13]</sup>的数学模型, 可得在当前时隙一个 SU 要发送 RTS 的概率  $\tau$  与发送 RTS 冲突的概率  $p$ 。在当前时隙至少有一个 SU 发送的概率为  $p_{\text{tr}} = 1 - (1-\tau)^s$ , 在至少一个站点发送数据的条件下, 有且只有一个站点发送的概率为  $p_s = s\tau(1-\tau)^{s-1}/p_{\text{tr}}$ , 空闲概率为  $p_{\text{idle}} = 1 - p_{\text{tr}}$ 。显然发生冲突传输失败的概率, 即  $p_{\text{failure}} = p_{\text{tr}}(1-p_s)$ , RTS 发送成功, 且不碰撞的概率为  $p_{\text{tr}}p_s$ , 在这个前提下, 讨论多信道 MCC 问题发生的概率。

当时隙内  $n$  条可用授权信道中, 源节点感知的  $m$  条可用信道至少有一条信道正被源节点或者目的节点的邻居节点使用, 发送数据信道冲突。假设邻

居节点数目为  $s'$ ，则邻居节点至少有一个节点在进行数据传输的概率为

$$p_{\text{data}_n} = 1 - (1 - p_{\text{tr}} p_s)^{s'}$$

则发生数据信道冲突的概率为

$$p_{\text{conflict}} = p_{\text{tr}} p_s \cdot [1 - (p_{\text{tr}} p_s)^{s'}] \cdot m / n$$

其中， $n$  为此时隙整个网络的空闲信道数，假设网络中共有  $N$  个授权信道，各授权信道的占用率与空闲率分别为  $p_{\text{on}}$  与  $p_{\text{off}}$ ，则

$$p\{n=i\} = \binom{N}{i} p_{\text{off}}^i p_{\text{on}}^{N-i}, i \leq N$$

因此，网络中空闲信道的平均数量为

$$E[n] = \left[ \sum_{i=0}^N i P\{n=i\} \right] = \lfloor N p_{\text{off}} \rfloor = \left\lfloor \frac{N\alpha}{\alpha + \beta} \right\rfloor \quad (7)$$

当发生“聋终端”问题，即为在此时隙中当源节点成功发送 RTS 帧后，目的节点正在处于数据信道进行传输，其概率为

$$p_{\text{deaf}} = p_{\text{tr}} p_s p_{\text{tr}} p_s = (p_{\text{tr}} p_s)^2$$

由此，不发生 MCC 问题，数据一次性成功传输的概率为

$$p_{\text{success}} = p_{\text{tr}} p_s \left[ 1 - \frac{(1 - (p_{\text{tr}} p_s)^{s'}) \cdot m}{n} - (p_{\text{tr}} p_s)^2 \right]$$

因此，接入竞争的平均时间为

$$E[T_{\text{ctrl}}] = p_{\text{success}} T_{\text{success}} + p_{\text{conflict}} T_{\text{conflict}} + p_{\text{deaf}} T_{\text{deaf}} + p_{\text{failure}} T_{\text{failure}} + p_{\text{idle}} T_{\text{idle}} \quad (8)$$

### 3) 数据传输时段分析

SU 通过在公共控制信道竞争获得频谱接入的权利，切换至协商的数据信道进行通信，传输数据帧的时间为

$$T_{\text{data}} = \frac{L}{(m' R)} + T_{\text{ACK}}, 1 \leq m' \leq m \quad (9)$$

其中， $m'$  为通信节点对协商阶段目的节点 CTS 帧最后确定的可聚合信道数目，忽略授权用户在 RTS 阶段出现的概率，考虑 SU 的邻居节点活动对其的影响。

假设邻居节点为  $s'$  个，邻居节点正在传输数据的概率为  $p_{\text{tr}} p_s$ ，当有邻居节点正在 SU 所感知得到的  $m$  条可用信道中的  $q$  条信道上传输，此时  $m' = m - q$ ，其概率为

$$p\{m' = m - q\} = \sum_{i=q}^{s'} C_{s'}^i (p_{\text{tr}} p_s)^i \left( 1 - \frac{m}{n} \right)^{i-q} \left( \frac{m}{n} \right)^q, k \leq m$$

则认可可聚合的信道数  $m'$  的平均值为

$$E[m'] = \left[ m - \sum_{k=0}^m q p\{m' = m - k\} \right] \\ = \left[ m - \sum_{k=0}^m q \cdot \sum_{i=k}^{s'} C_{s'}^i (p_{\text{tr}} p_s)^i \left( 1 - \frac{m}{n} \right)^{i-q} \left( \frac{m}{n} \right)^q \right], q \leq m$$

### 4.3.2 饱和吞吐量分析

SU 在授权信道传输数据前，需要感知信道状态并获得最佳可用信道数，收发节点在公共控制信道交互控制帧，竞争获取数据信道接入权，然后切换至数据信道进行数据传输。由于网络中只有一条公共控制信道，通常控制信道成为传输的瓶颈，即只要认知节点在公共控制信道成功预约获得数据信道后，数据就能在数据信道传输。定义  $S_{\text{SU}}$  为 SU 单次传输实现的吞吐量，则  $S_{\text{SU}}$  可以表示为

$$S_{\text{SU}} = \frac{E[m'] \cdot T_{\text{data}}}{T_{\text{sen}} + E[T_{\text{ctrl}}]} \cdot R$$

其中， $E[m']$  为单次传输实际接入可用信道的期望， $R$  为单个信道的传输速率，即 SU 花费  $T_{\text{sen}} + E[T_{\text{ctrl}}]$  时间在  $E[m']$  个信道以速率  $R$  同时传输  $T_{\text{data}}$  时间，则网络吞吐量  $S$  为

$$S = \frac{E[n] \cdot E[T_{\text{idle}}]}{T_{\text{sen}} + E[T_{\text{ctrl}}]} \cdot R$$

其中， $E[n]$  为网络中可感知到的可用授权信道数目的数学期望，由式(7)给出， $T_{\text{idle}}$  为授权信道可被认知用户使用的空闲时间，由于授权信道的空闲时间符合服从参数  $\alpha$  的指数分布，则  $E[T_{\text{idle}}] = 1/\alpha$ 。

## 5 仿真实现与分析

### 5.1 实验参数设定

本文采用 MATLAB 与 NS2 对提出的 LD-SAS 协议进行仿真，其中应用 MATLAB 工具对协议的最佳信道数选取进行仿真分析，NS2 工具对协议的时延及吞吐量性能进行仿真，网络中 SU 分布在一个  $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$  的矩形仿真区域内，节点的传输范围为  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ ，仿真时间 40 s，仿真 10 次取平均值。具体实验参数设置如表 1 所示，其中 MAC 层参数设置与文献[14]一致， $N$ 、 $s$  分别表示授权信道与认知用户数目， $p_{\text{off}}$  为授权信道空闲概率， $R_{\text{data}}$  与  $R_{\text{ctrl}}$  为数据信道与控制信道的传输速率， $t_{\text{切换}}$  为切换时延， $r$  为最高退避阶数，PLCP、 $\sigma$ 、SlotTime、SIFS

与 DIFS 分别为物理层汇聚过程、信道空闲、时隙、最短帧间隔与 DCF 帧间隔长度,  $CW_{min}$  与  $CW_{max}$  表示最小与最大退避窗口大小。

表 1 实验参数设置

参数	设定值	参数	设定值
$N$	12, 20	SlotTime	9 $\mu$ s
$s$	20, 30, 40...	SIFS	15 $\mu$ s
$p_{off}$	0.2~0.9	DIFS	34 $\mu$ s
$R_{data}$	1 Mbit/s	RTS	20 bit
$R_{ctrl}$	1 Mbit/s	CTS	20 bit
$t_{切换}$	16 $\mu$ s	INV	20 bit
$r$	5	ACK	20 bit
PLCP	16 $\mu$ s	$CW_{min}$	32
$\sigma$	9 $\mu$ s	$CW_{max}$	1 023

5.2 最佳可用信道数  $m$  分析

首先对最佳可用信道数  $m$  进行分析, 对比在不同可用信道数情况下数据传输相对应的时延。图 4 分别比较在授权用户信道空闲概率为 0.8、0.6 以及授权信道总数在 12、20 的情况下, 数据传输总的时延与感知获得的可用信道数之间的关系。分析可知, 当感知可用信道数较小时, 随着  $m$  增加, 时延急剧下降, 当下降到最低点之后, 随着  $m$  增加, 时延快速增长。这是因为  $m$  较小时, 每增加一个可用信道, 增加了感知信道时间但同时大幅减少了数据传输时间, 而当达到最佳可用信道之后, 继续感知可用信道虽然能减少数据传输时间, 但减少的幅度减小, 且继续感知信道获得多 1 个可用信道的感知时间的增幅仍保持在一定范围之内, 因此, 随着感知可用信道数  $m$  的增加, 总的传输时延增加。

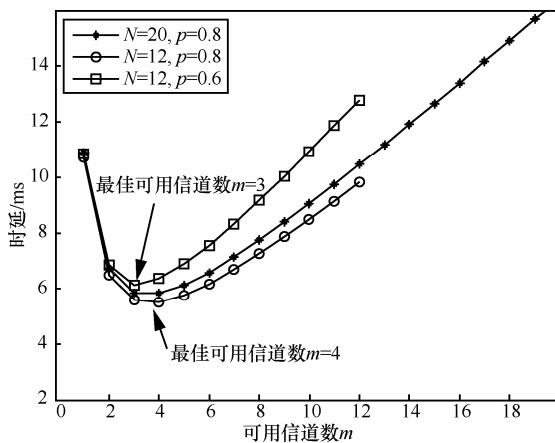


图 4 可用信道数—传输延迟

在实验所设定的参数下, 当授权用户信道总数  $N=20$ , 信道空闲概率  $p=0.8$  的情况下, 最佳可用信道数  $m=4$ ; 当  $N=12$ , 信道空闲率分别为 0.6 与 0.8 时, 最佳可用信道数  $m$  分别为 3 和 4。当授权信道空闲概率降低时, 每感知获得可用信道所耗时长要增加, 而所带来了数据传输时长减小的收益仅与可用信道数量相关。因此, 当空闲概率降低时, 相应最佳信道数量会相比空闲概率高时减少。如图 5 所示, 当授权信道数  $N=20$  情况下, 最佳可用信道数、相应需感知信道数以及传输延迟这三者与授权信道空闲率的关系。可以看出, 随着概率  $p$  的增加,  $m$  相应增加, 同时获得最佳可用信道数  $m$  所需感知的信道数  $n$ , 可以看出在  $m$  相同的情况下 (如  $p=0.3$  与  $p=0.4$  情况下,  $m$  均为 2), 空闲概率小时需要感知的信道数要大 (如  $p=0.3$  时,  $n$  大于 10, 而当  $p=0.4$  时,  $n$  接近于 7)。同时, 随着授权信道空闲率的增加, 在使用最佳可用信道数的情况下, 传输延迟逐渐递减, 这是在空闲概率增大的情况下, 感知更少的信道就能获得较多的可用信道, 这样使感知时间减少同时又带来了数据传输时间的急剧减少。

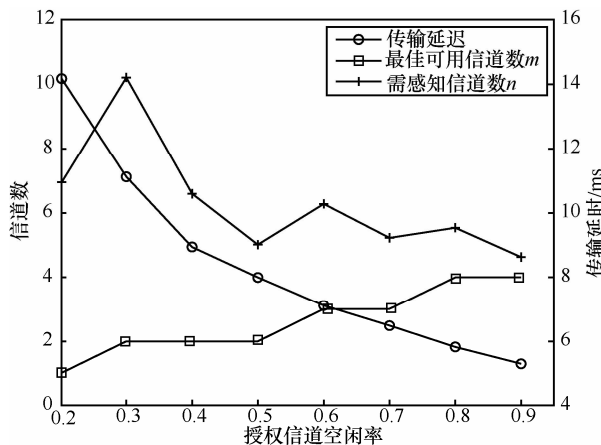


图 5 不同信道空闲率—最佳可用信道

5.3 传输延迟分析

实验设定整个网络中授权信道的总数  $N$  为 20, 信道空闲概率  $p_{off}$  均为 0.8, 网络中节点总数为 50, 节点均匀分布在部署区域, 比较 LD-SAS 方案与传统未基于信道聚合的认知 MAC (即 CogMAC) 协议。LD-SAS 方案采用感知得到最佳可用信道数后开始竞争信道进入传输, CogMAC 协议只要感知得到一个可用数据信道即进入竞争信道接入阶段, 观察随着待传输数据分组的大小变化这二者的端到

端延迟性能。

从图 6 可以看出随着数据分组大小增大，采用 LD-SAS 方案传输延时逐渐增加但是幅度较小，而采用 CogMAC 协议，延迟的增大幅度非常明显。这是由于当数据分组增大时，利用多信道聚合传输，信道带宽成倍增长，相应的传输速度成倍增加，因此延迟增加幅度较小。由此可知，LD-SAS 方案在数据传输延迟方面的性能优势明显，适用于多媒体等大数据量低延迟等实时性要求高的数据传输。

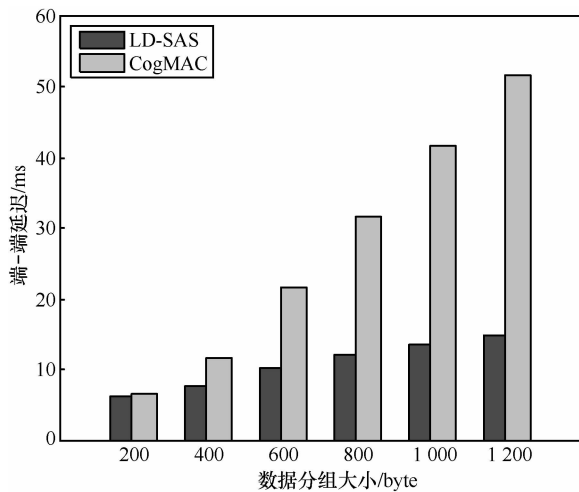


图 6 端到端延迟性能比较

### 5.4 实时保障分析

接下来分析频谱接入方案保障业务实时需求的性能。设定实时业务允许的延迟为 30 ms，观察

随着待传输数据分组的大小与授权频谱空闲概率的变化，LD-SAS 与 CogMAC 二者的性能。如图 7 所示，深色阴影区域为时延超过 30 ms 的情况，可以看出在相同情况下，CogMAC 协议随着数据分组大小的增加、频谱空闲概率的减小时延急剧增加，大半情况都无法保障实时业务的 QoS 需求，而本文提出的 LD-SAS 策略仅在空闲概率小于 0.5 且数据分组大于 1 000 byte 的情况下，无法保障业务传输的实时性。通过比较可以看出，LD-SAS 在实时性保障方面的性能远优于 CogMAC。

### 5.5 吞吐量性能分析

下面比较 2 种协议随着授权信道空闲概率  $p_{off}$  与网络负载的变化，网络吞吐量的变化情况。从图 8(a)可以看出，随着授权信道空闲率的增加，网络吞吐量明显增加。同时，在授权信道空闲率较小的情况下，LD-SAS 相较于 CogMAC 协议吞吐量略小，这是因为当授权信道空闲率较小时，LD-SAS 获得多个可用信道（如在  $p_{off}=0.3$  时，最佳可用信道为 2）所花费的感知与接入时间相较于 CogMAC 协议要多，相应吞吐量也略小，而  $p_{off}$  增加，LD-SAS 平均接入每个可用信道的感知时间与竞争接入时间之和减小，相比 CogMAC 协议吞吐量有明显增幅。因此，本文提出的方案在授权信道空闲率较大时，吞吐量性能较优。

图 8(b)比较在其他实验参数不变情况下，授权信道空闲概率为 0.6（即此时协议吞吐量性能基本相同）时，网络吞吐量随网络负载变化的情况。

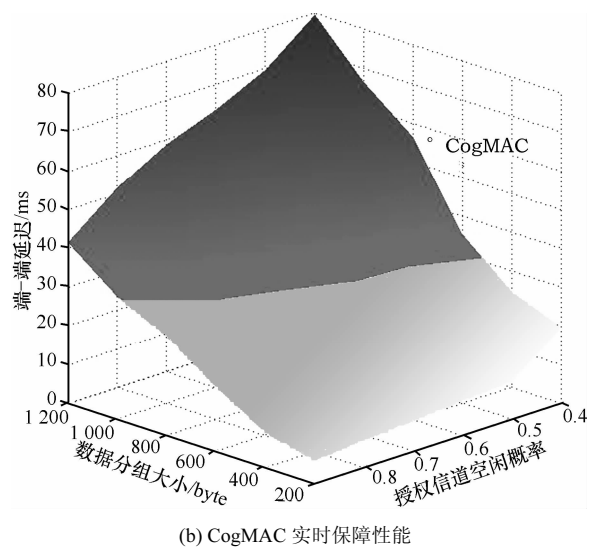
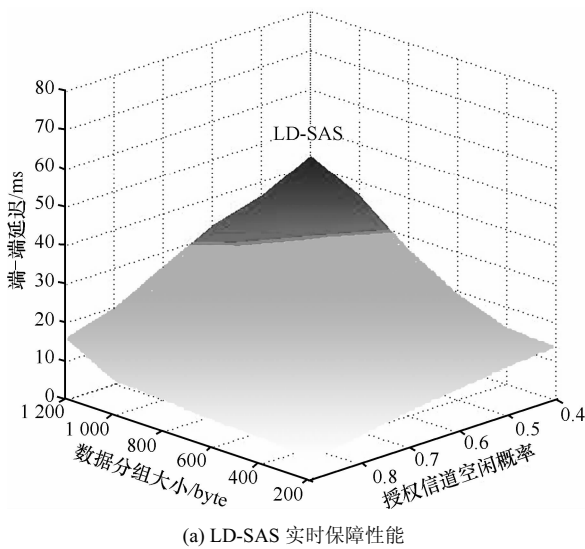
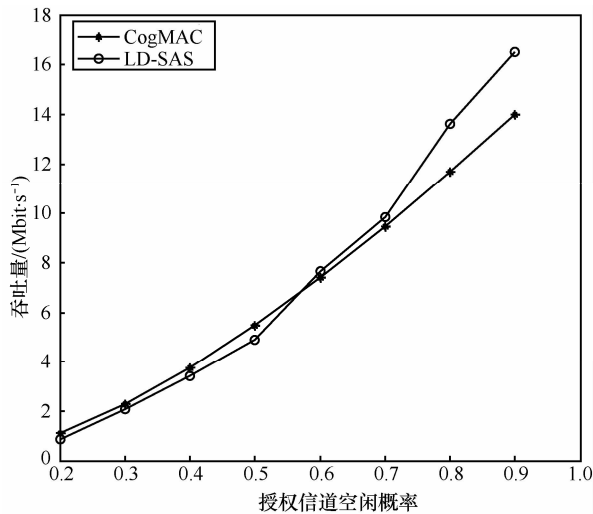
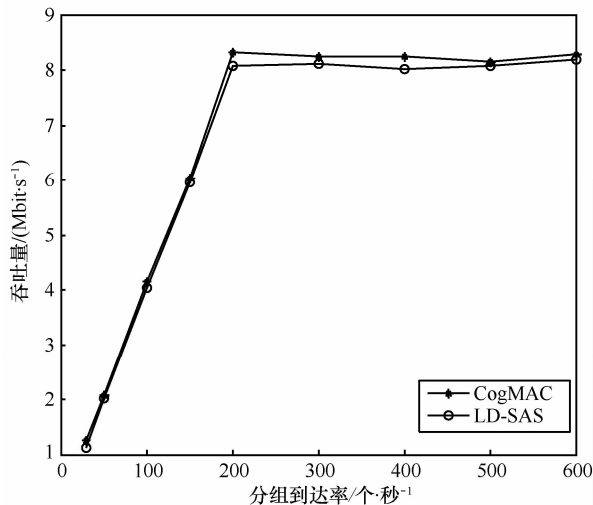


图 7 协议实时保障性能比较

可以看出, 当网络负载较小情况下, 二者的吞吐量性能基本相同, 当网络负载增大到饱和状态之后, CogMAC 协议相较于 LD-SAS 协议, 吞吐量略有优势, 这是由于当网络负载逐渐增大时, LD-SAS 协议采用基于多个数据信道聚合的方式进行传输, 在接入控制的过程中, 发生信道碰撞的几率相对增加, 数据成功接入的概率减小, 从而使吞吐量减小。



(a) 吞吐量随授权信道概率的变化



(b) 吞吐量随网络负载的变化

图 8 协议吞吐量比较

## 6 结束语

MAC 层设计是认知用户高效共享授权频谱, 实现动态频谱接入的关键, 本文针对高宽带业务传输实时性的需求, 提出低延迟 MAC 层频谱接入方案。本文的工作主要包括 2 个部分: 一是基于频谱聚合技术, 依据待传输业务量的大小选取认知用户

最佳可用信道, 实现业务传输延迟最小化; 二是通过信道接入竞争的数据帧格式设计与邻居节点协同侦听机制, 减小多信道协议中的信道冲突与“聋终端”问题的影响, 避免重传从而降低接入延迟。通过理论分析与实验仿真验证了协议传输延迟与吞吐量性能。

本文提出的 LD-SAS 方案依据认知用户待传输业务量的大小确定频谱感知的信道数量, 从而减小延迟。而对于多种类型业务共同接入 CRN 网络, 如何进一步扩展协议功能, 实现多种业务的服务区分能力, 是下一步工作的重点。

## 参考文献:

- [1] WANG J, GHOSH M, CHALLAPALI K. Emerging cognitive radio applications: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(3): 74-81.
- [2] 阙保强, 范建华, 王建业. 认知无线网络信道接入协议[J]. 软件学报, 2012, 23(7):1824-1837.  
KAN B Q, FAN J H, WANG J Y. MAC layer of cognitive radio networks[J]. Journal of Software, 2012, 23(7): 1824-1837.
- [3] CLAUDIA C, KAUSHIK R. A survey on MAC protocols for cognitive radio networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(7):1315-1329
- [4] JIA J, ZHANG Q, SHEN X. HC-MAC: a hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management[J]. IEEE J Selected Areas Commun, 2008, 26(1):106-117
- [5] 刘军, 谢秀峰. 基于排队时延及博弈分析的认知无线网络信道分配算法[J]. 通信学报, 2012, 33(6):73-81.  
LIU J, XIE X F. Cognitive network channel allocation method based on the queuing delay and game analysis[J]. Journal on Communications, 2012, 33(6):73-81.
- [6] ZHAO Q, TONG L, SWAMI A, et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: a POMDP framework[J]. IEEE J Selected Areas Commun, 2007, 25(3): 589-600.
- [7] SHASHI R, BUDDHIKA D, TIE L, et al. Dynamic spectrum cognitive MAC (DySCO-MAC) for wireless mesh & ad hoc networks[A]. IEEE INFOCOM 2010, Workshop on Cognitive Wireless Communications and Networking[C]. San Diego, USA, 2010.15-19.
- [8] CHEN L, IELLAMO S, COUPECHOUX M. Opportunistic spectrum access with channel switching cost for cognitive radio networks[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. 2011.1-5
- [9] FAKHREDDINE G, HONG-CHUAN Y, REDHA M R. Opportunistic spectrum access in cognitive radio based on channel switching[A]. Proceedings of 7th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications[C].

(CROWNCOM), 2012.

- [10] 冯文江, 唐丹丹, 夏育才. 认知无线电网络中多属性动态频谱接入机制[J]. 通信学报, 2011, 32(11):1-8.

FENG WJ, TANG D D, XIA Y C. Multi-attribute dynamic spectrum access mechanism in cognitive radio networks[J]. Journal on Communications, 2011, 32(11):1-8.

- [11] SHUKLA A, WILLAMSON B, BURNS J, *et al.* A study for the provision of aggregation of frequency to provide wider bandwidth Services[EB/OL].<http://www.ofcom.org.uk/research/technology/overview/speclib/specagg/2006>.

- [12] LUO T, MOTANI M, SRINIVASAN V. Cooperative asynchronous multichannel MAC: design, analysis, and implementation[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(3):338-52.

- [13] 李瑞芳, 罗娟, 李仁发. 适于无线多媒体传感器网络的 MAC 层退避算法[J]. 通信学报, 2010, 31(11):107-116.

LI R F, LUO J, LI R F. Backoff algorithm in MAC layer for wireless multimedia sensor networks[J]. Journal on Communications, 2010, 31(11): 107-116.

- [14] ZHANG X, SU H. CREAM-MAC: cognitive radio-enabled multichannel MAC protocol over dynamic spectrum access networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1): 110-123.

#### 作者简介:



李瑞芳 (1978-), 女, 湖南邵东人, 博士, 武汉理工大学讲师, 主要研究方向为无线通信, 认知无线网络等。



刘泉 (1963-), 女, 云南腾冲人, 武汉理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信号处理和信号检测理论及应用等。



李仁发 (1957-), 男, 湖南郴州人, 博士, 湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为嵌入式计算, 无线网络、CPS、虚拟与仿真等。