

认知 mesh 网络服务区分的动态频谱接入策略

李瑞芳^{1,2}, 刘泉^{1,2}, 李仁发³

(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 宽带无线通信与传感器网络湖北省重点实验室, 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: 动态频谱接入策略是实现认知无线网络高效利用频谱的关键。与传统认知无线网络不同, 认知 mesh 网络中不同 QoS 需求的多类型业务共同接入, 为适应这一特点, 提出服务区分的动态频谱接入策略。策略依据业务的 QoS 需求确立优先级, 针对不同优先级业务采取不同的信道接入方案, 实时业务依据最优传输延迟期望选择接入信道集合, 在减小传输延迟的同时降低数据传输过程授权用户出现的概率, 普通业务选择最理想传输成功概率的信道, 降低信道切换概率。理论与实验结果表明, 与传统的认知网络频谱接入策略相比, 提出的策略能提供不同业务的服务区分, 满足实时业务的低延迟需求, 降低数据传输的中断率, 同时在授权信道空闲率与网络负载较大时吞吐量性能较优。

关键词: 认知 mesh 网络; 动态频谱接入; 服务区分

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)03-0069-08

Differentiated services dynamic spectrum access strategy for cognitive wireless mesh network

LI Rui-fang^{1,2}, LIU Quan^{1,2}, LI Ren-fa³

(1. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Key Lab of Broadband Wireless Communications and Sensor Networks, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. Embedded Systems & Networking Laboratory, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Dynamic spectrum access (DSA) is an important design aspect for cognitive radio network. Common access of multi-type services having different quality of service (QoS) requirements is the important characteristic of cognitive wireless mesh network. Differentiated service (DS) is the key to realize the high efficiency use of spectrum resources and to guarantee the high quality transmission of services. In order to satisfy the demand for multi-type services, a differentiated services dynamic spectrum access strategy was proposed. In this strategy, the unlicensed user traffic was divided into three priority classes. The DSA scheme uses different access mechanisms for the three classes of unlicensed users. The real-time traffic selects available channel set according to the shortest expected delay to reduce the transmission time and the probability of appearance of licensed user during data transmission process. The general traffic selects the channel of largest successful transmission probability to avoid spectrum handoff. The theoretical and experimental results show that, when compared with the traditional cognitive networks DSA strategy, the proposed strategy is able to guarantee different QoS for the various services, shorter transmission delay for higher priority services, reducing the probability of transmission interruption and better throughput performance when the vacancy rate of licensed channel is major and heavy network load.

Key words: cognitive wireless mesh network; dynamic spectrum access; differentiated services

收稿日期: 2012-07-10; 修回日期: 2012-12-25

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)

Foundation Items: 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)

1 引言

认知无线 mesh 网络 (CogWMN, cognitive wireless mesh network) 在现有无线 mesh 网络的基础上引入认知无线电技术, 使网络具有认知周围频谱环境的能力, 并能根据周围环境的变化智能地调整无线资源, 解决无线频谱资源稀缺的问题, 是下一代网络的热点技术之一^[1]。

与传统认知无线网络不同, 多种类型业务共同接入 mesh 骨干网是认知 mesh 网络应用的重要特点, 不同类型的业务服务质量 (QoS, quality of service) 需求各不相同。如何高效利用频谱资源, 为包括多媒体在内的各种业务提供高质量服务是需要解决的重要问题。因此, 针对不同的业务类型提供服务区分是认知 mesh 网络迫切需要解决的问题。频谱接入作为认知 mesh 网络介质访问控制层 (MAC, media access control) 的核心研究内容, 管理物理层感知获得的频谱资源, 解决网络中节点以怎样的规则共享频谱资源, 直接关系到业务传输的 QoS 保障, 是认知无线电技术能否高效应用于无线 mesh 网的关键因素之一。

本文针对认知 mesh 网络中多类型业务传输 QoS 需求各异的特点, 基于频谱聚合技术, 提出服务区分的动态频谱接入策略 (DS-DSA, differentiated services dynamic spectrum access strategy), 实现认知 mesh 网络中多种业务的区分服务, 保障高优先业务传输的带宽及时延需求。

2 相关工作

动态频谱接入策略是实现认知无线网络高效利用频谱资源的关键, 许多研究者提出了适合认知网络的频谱接入策略, 但其关注的重点主要在于通过提高频谱利用率实现吞吐量的提升。文献[2]依据 ECMA-392 标准 MAC 协议, 提出 TV 频段的优先竞争接入 PCA 策略和信道预留 CRP 协议; POMDP 协议^[3]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; 文献[4]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; COMNET 方案^[5]提出了认知 mesh 网络的频谱感知与共享机制, 通过在竞争退避窗口进行频谱感知, 通过能量估计确定信道切换与分配

方案。

然而对于认知 mesh 网络多业务类型共存的特点, 如何实现不同 QoS 需求业务的区分接入是关键。目前提供服务区分的频谱接入策略研究成果较少, 文献[6]基于非连续 OFDM 思想提出 3 种优先级频谱分配策略, 提供认知网络吞吐量和频谱利用率; 文献[7]研究认知 ad hoc 网络的信道接入竞争机制, 通过邻居节点确认频谱利用机会, 建立竞争机制降低时延, 为实时业务提供资源预留; 文献[8]将研究的重点放在不同优先级业务的信道切换策略, 通过子信道预留机制实现高优先业务的区分服务。与这些文献不同的是, 本文关注认知 mesh 网络多种类型业务共同接入特点, 实现区分服务, 在保障高优先级业务带宽需求的同时, 实现快速接入降低延迟, 并提高各类业务的传输成功概率。

3 系统描述

3.1 前提假设

本文提出的频谱接入策略基于如下假设。

1) 每个节点任一时刻只能工作在一个信道上, 但不同节点可同时工作在不同信道上。

2) 协议使用 1 个非授权信道作为控制信道, 认知信道对该信道的访问不会干扰授权用户。

3) 认知节点通过软件无线电支持频谱聚合, 将分散的、信道容量小的频谱段聚合为完整的、信道容量较大的频谱。比如采用正交频分复用技术, 通过开启或关闭 OFDM 子载波, 灵活聚合当前感知到的空闲频段^[9,10]。

4) 认知用户机会式地访问授权用户未完全占用的频谱, 且认知用户可以通过扫描一定的频谱范围来获得正常通信所必须的信道集合。

5) 为分析方便, 本文假设完全感知, 即不考虑感知误差 (虚警与误报) 的影响。同时, 假设感知与信道聚合的时间相对数据传输时间足够短, 这期间不会有授权业务出现或者离开。

3.2 认知 mesh 网络业务分类

认知 mesh 网络存在多种类型业务接入, 不同的业务 QoS 需求不同, 并且有些业务需要满足多个 QoS 需求, 比如最大传输时延、最小传输速率以及最大容忍分组丢失率等, 本文主要关注业务传输时延及传输速率, 依据业务特点及对传输信道的要求, 如表 1 所示将业务分为 3 类。

表 1 认知 mesh 网络业务分类

类型	传输 QoS 需求	业务举例
1	最小传输速率 最大传输时延	VoIP
2	最大传输时延	MPEG
3	无 QoS 需求	FTP、E-mail

3.3 认知用户工作模型

每个终端有 2 个半双工收发器，即控制收发器和数据收发器，控制收发器控制信道交换控制信息，获取数据信道接入的权利，数据收发器动态地切换到获得的数据信道传输数据。控制信道是非授权信道，用来解决信道冲突和分配数据信道的问题，数据信道是授权信道，通过感知“频谱空洞”获得可用信道，用来传输数据与 ACK。认知用户周期性地感知信道并侦听控制信道，获取可用信道集合，当有业务需要发送时，通过在控制信道竞争获取信道接入权，切换至数据信道进行业务传输。

4 策略描述

4.1 信道理想传输成功概率

不失一般性，笔者将授权用户使用信道行为建模成 2 个状态的连续时间马尔可夫模型，1 状态表示授权用户正在使用信道，相对应地 0 状态表示信道空闲，允许 CR 用户接入该信道，如图 1 所示。信道在转移到状态 1 之前在 0 停留的时间是参数为 λ 的指数变量，而在回到状态 0 之前停留在状态 1 的时间是参数为 μ 的指数变量，显然这是一个齐次马尔可夫过程。

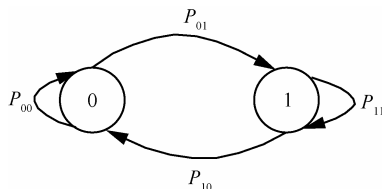


图 1 授权信道利用模型

由柯尔莫哥洛夫方程可得到 t 时间段内授权信道的转移概率为

$$\begin{cases} p_{00}(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} \\ p_{01}(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} [1 - e^{-(\mu + \lambda)t}] \\ p_{11}(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} + \frac{\mu}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} \\ p_{10}(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} [1 - e^{-(\mu + \lambda)t}] \end{cases} \quad (1)$$

信道空闲概率为

$$p_{\text{off}} = \frac{p_{10}(t)}{p_{10}(t) + p_{01}(t)} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (2)$$

认知用户周期性地感知授权信道，获取可用信道集合，每个节点维持一个数据信道利用列表 (DCUL, data channel usage list)，包括信道指标 i 、信道带宽 B_i 、信道空闲率 $p_{\text{off},i}$ 、信道邻居节点占用状态 $S_{t_{\text{Neigh},i}}$ 、信道理想传输成功概率 p_i^k 。即数据信道利用列表 $\text{DCUL}[i, B_i, p_{\text{off},i}, S_{t_{\text{Neigh},i}}, p_i^k]$ 。

定义 1 信道理想传输成功概率 p_i^k ，信道 i 传输业务 k 的理想成功概率（忽略竞争失败的影响），即信道 i 空闲且在认知用户竞争接入与数据传输的过程中授权用户不出现的概率。

$$p_i^k = p_{\text{off},i} \cdot p_{00,i}(t_{\text{con},i}^k + t_{\text{data},i}^k)$$

其中， $t_{\text{con},i}^k$ 代表认知用户传输业务 k 在控制信道上竞争接入的时间， $t_{\text{data},i}^k$ 代表认知用户在数据信道 i 传输业务 k 数据分组的时间， $p_{00,i}(t)$ 代表在感知信道为空闲的状态下， t 时间内信道仍为空闲（即授权用户不出现）的概率。由式(1)和式(2)可知，信道 i 传输业务 k 的理想传输成功概率为

$$p_i^k = \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \cdot \left[\frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} + \frac{\lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} e^{-(\mu_i + \lambda_i)(t_{\text{con},i}^k + t_{\text{data},i}^k)} \right]$$

4.2 业务区分信道接入方案

为提供认知 mesh 网络中多种不同业务进行区分服务，对表 1 所示 3 种业务进行区分信道接入，如图 2 所示。具体方案描述如下。

1) 最高优先级业务：此类业务对最小传输速率与最大传输时延均有严格限制。当认知节点有此类业务需要发送时，在接入信道之前，首先判定感知所获得的空闲信道集合是否满足业务 k 传输带宽需求 R_k ，如不满足则继续感知信道。

高优先级业务采取信道聚合方案。设选择可用信道集合中的 m 条信道聚合 (i_1, i_2, \dots, i_m) ，信道聚合判断依据为满足带宽需求的前提下，最小化业务传输延迟期望，即

$$\begin{aligned} & \text{minimize } E[T^{k,m}] \\ & \text{Subject to } \begin{cases} \sum_{j=1}^m B_j > R_k \\ E[T^{k,m}] < \tau_k \\ m \leq M_F \end{cases} \end{aligned}$$

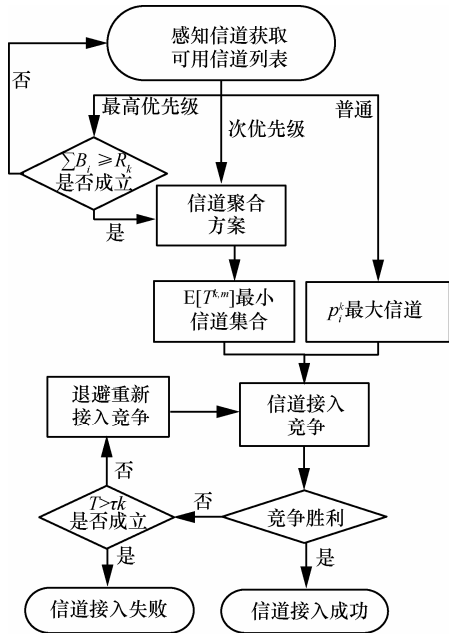


图 2 业务区分信道接入方案

其中， M_F 代表在频谱聚合技术与节点硬件的限制下，一个认知用户最多能使用的聚合信道数。 τ_k 为业务 k 的最大时延限制。 $E[T^{k,m}]$ 为同时使用 m 个信道传输业务 k 的延迟期望。

$$E[T^{k,m}] = (t_{con}^{k,m} + t_{data}^{k,m}) / p^{k,m} \quad (3)$$

其中， $p^{k,m}$ 为使用 m 个聚合信道传输业务 k 的理想传输成功概率。

$$p^{k,m} = \prod_{i=1}^m \left\{ \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \left[\frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} + \frac{\lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} e^{-(\mu_i + \lambda_i)(t_{con}^{k,m} + t_{data}^{k,m})} \right] \right\} \quad (4)$$

2) 次优先级业务: 此类业务对传输时延有严格的限制。当认知节点有此类业务需要发送时，同样采取信道聚合方案，依据为满足时延限制的前提下，最大化信道理想传输成功概率。

3) 低优先级业务: 当认知节点有此类业务需要发送时，节点选择可用信道列表中理想传输成功概率(p_i^k)最大的信道进行接入竞争。

此外，由于认知用户周期性感知授权信道，在获取可用信道集合的同时对空闲信道的邻居节点使用情况进行侦听，即在节点维持的数据信道利用列表(DCUL)中标示信道的邻居节点占用状态 $S_{t_{Neigh},j}$ ，采用先侦听后使用的方式，有效降低在控制信道竞争时邻居节点信道的冲突问题。

5 性能分析

5.1 数据传输延迟近似分析

笔者对时延限制的高优先级业务数据传输延

迟进行分析。假设网络中授权信道的条件一致，即信道带宽、授权用户利用率等指标相同，且单个授权信道不能满足高优先级业务的带宽与传输需求。同时假设信道竞争阶段的时间 $t_{con,i}^k \ll t_{data,i}^k$ ，忽略信道切换与 ACK 传输时间的影响。由于使用信道聚合能显著提高信道的传输能力，减少延迟，但同时多个信道同时使用增加了对授权用户的干扰，一旦聚合信道中的任一信道出现授权用户，则需要切换信道，这在一定程度上增加了传输延迟，并且当信道空闲概率较低时，授权用户在传输过程中出现的概率越大，导致延迟增加显著。由此，实时业务的频谱接入方案优化问题转化为寻求最佳的聚合信道数目，满足数据传输阶段授权用户出现概率小的同时，使传输时间最短，优化问题可描述为

$$\min E[T^{k,m}] \approx \frac{t_{data} / m}{\left(\frac{\mu}{\mu + \lambda} \right)^m \left[\frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t_{data} / m} \right]^m} \quad (5)$$

对 DS-DSA 策略中有时延限制的实时业务与普通业务进行比较。在信道条件一致的假设下，实时业务采用选取最佳聚合信道数的策略进行接入，即选取最佳 m 值，使 $E[T^{k,m}]$ 最小，而非实时业务采取直接选取单个信道进行接入，即传输时延的期望为 $m=1$ 对应的 $E[T^{k,1}]$ 。忽略控制信道上认知节点信道接入竞争的影响，实时业务单次成功传输实现的速率是非实时业务的 m 倍，传输时间是其 $1/m$ 。实时业务与普通业务的传输延迟的期望比较为

$$\frac{E[T^m]}{E[T^1]} = \frac{p_{00}(t_{data})}{mp_{off}^{m-1} p_{00}(t_{data} / m)^m}$$

5.2 吞吐量分析

认知节点感知获得可用信道集合，依据 DS-DSA 策略选择 $m(m \geq 1)$ 个数据信道进行接入，收发节点对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。分析系统饱和吞吐量，由于在接入竞争前侦听邻居信道使用状态，因此仅存在如下 4 种情况。

1) 控制信道空闲，空闲概率为 p_{idle} ，空闲时间为 σ 。

2) 节点在控制信道竞争胜利，且在数据信道传输成功（即授权用户不出现），竞争胜利概率为 p_s ，授权用户不出现概率为 p_{00} ，时间为 T_s 。

3) 节点在控制信道竞争胜利, 在数据信道传输过程中授权用户出现, 竞争胜利概率为 p_s , 授权用户出现概率为 p_{01} , 时间为 T_s 。

4) 节点在控制信道竞争失败, 竞争失败概率为 $(1-p_{idle}-p_s)$, 时间为 T_f 。

则认知节点在公共控制信道进行信道接入竞争的平均时间为

$$T_{con} = p_{idle}\sigma + p_s p_{00} T_s + p_s p_{01} T_s + (1 - p_{idle} - p_s) T_f$$

$$= p_{idle}\sigma + p_s T_s + (1 - p_{idle} - p_s) T_f$$

由此, 业务 k 贡献的归一化吞吐量为

$$S_k = \frac{p_s p_{00}^k (t_{data}^k) T_s}{p_{idle}\sigma + p_s T_s + (1 - p_{idle} - p_s) T_f} \cdot \sum_{i=0}^{m_k} R_i$$

其中, R_i 为信道 i 的传输速率, m_k 为认知节点传输高优先级业务 k 的预约信道数目, $p_{00}^k (t_{data}^k)$ 代表认知节点在数据信道传输业务 k 时授权用户不出现的概率。比较高优先级业务 k 与普通业务 1 的吞吐量可得

$$\frac{S_k}{S_1} = \frac{p_{00}^k (t_{data}^k) \sum_{i=0}^{m_k} R_i}{p_{00}^1 (t_{data}^1) R_j}$$

在数据信道条件完全一致的情况下可得

$$\frac{S_m}{S_1} = \frac{m p_{00} (t_{data} / m)^m}{p_{00} (t_{data})}$$

6 仿真实现与分析

本文采用 MATLAB 与基于 NS2 的 CRCN Simulator^[11]对提出的 DS-DSA 策略进行仿真, 其中, 应用 MATLAB 工具对策略的最佳信道数 m 的选取进行仿真分析, NS2 工具对网络中各类型业务采用不同策略时的性能 (包括时延、吞吐量、分组丢失率) 进行仿真比较, 网络中认知用户分布在一个 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的矩形仿真区域内, 节点的传输范围为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, 公共控制信道竞争采用 CSMA/CA 协议, 仿真时间 100 s, 仿真 10 次取平均值。

6.1 实时业务最佳聚合信道数 m 分析

首先对实时业务采用聚合信道接入方案, 分析最佳聚合信道数目 m , 对比在授权信道不同空闲率的情况下, 聚合信道数量所对应的传输时延期望, 仿真得到如图 3 所示结果。图中分别比较了在授权用户信道空闲概率为 0.6~0.9 的情况下, 数据传输时延期望与聚合信道数之间的关系。由图分析可知, 随着聚合信道数目 m 的增加, 时延下降, 当下降到最低点之后, 随着 m 的增加, 时延快速增长。

这是因为 m 较小时, 增加一个聚合信道, 能显著减少业务在数据信道的传输时间, 而当增加到一定程度时, 业务传输时间的减少趋势变缓, 而增加聚合信道导致授权用户在数据传输时间出现的概率显著提高, 因此, 传输时延的期望随之增加。

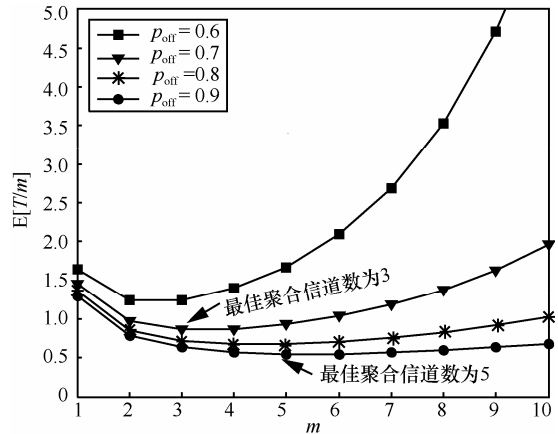


图 3 聚合信道数与传输延迟期望的对应关系

图 4 比较了在不同信道空闲率的情况下, 最佳聚合信道数目 (图中圆点线条所示, 纵坐标对应右边 y 轴)。在实验设定的参数下, 空闲概率 0.5、0.6 时对应的最佳聚合信道数 m 为 2, 0.7 对应 m 为 3, 0.8 对应 m 为 4, 0.9 对应 m 为 5。同时, 图 4 对比了采用聚合信道接入方案与单信道接入方案 (图中方框点和三角点线条, 纵坐标对应左边 y 轴), 在不同空闲率的情况下对应的传输延迟期望可以看出, 采用多信道聚合接入方案能显著降低延迟。此外, 随着空闲概率的增加, 最佳 m 值也随之增加, 相对应的传输延迟期望也减小, 这是因为当空闲概率增加时, 聚合信道数 m 增加导致的授权用户出现概率增加的幅度减小, 相对应的延迟增加变缓。

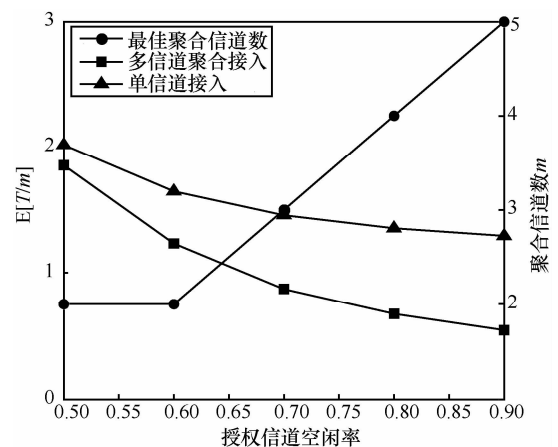


图 4 信道空闲率—最佳聚合信道数与传输延迟

6.2 传输延迟与服务区分分析

实验设定整个网络中授权信道的总数 N 为 20，网络中节点总数为 50，节点均匀分布在部署区域，授权信道条件一致， μ 与 λ 分别为 0.7 与 0.3，即信道空闲概率 p_{off} 为 0.7，认知节点有 QoS 要求的实时业务与非 QoS 业务接入，比较本文提出 DS-DSA 策略与一般认知网络频谱接入策略（即 Cog-DSA）协议，DS-DSA 对 QoS 需求高的业务通过决策达到最佳传输延迟期望的聚合信道数后，竞争接入信道开始传输，非 QoS 业务接入最佳理想传输成功概率的信道，Cog-DSA 协议只要得到可供业务传输的数据信道即进入竞争信道接入阶段，比较这二者的端到端延迟性能与 DS-DSA 策略的区分服务性能。由图 5 可以看出，采用本文提出的 DS-DSA 策略能实现 QoS 业务的快速传输，减少端到端时延。当 p_{off} 为 0.7 时，最佳接入信道聚合数 m 为 3，而实验仿真显示 QoS 业务的时延近似为非 QoS 业务的 1/3，这与理论分析所得出的结论基本一致。此外，采用 Cog-DSA 策略对实时业务与非实时业务采用无区分对待，时延相对比 DS-DSA 策略中的非 QoS 业务较低，但比 QoS 业务时延大很多，这是由于在 DS-DSA 策略中，QoS 业务采用最优聚合接入，在同一时间段占用的信道数较多，从而造成非 QoS 业务接入时延增加。

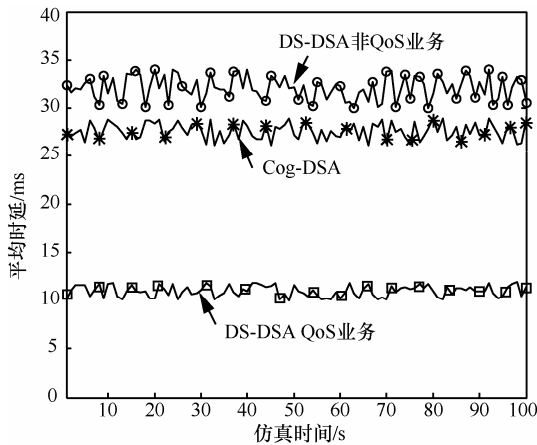


图 5 平均时延及区分服务性能比较

6.3 数据传输中断率性能分析

本文提出的 DS-DSA 策略对不同 QoS 需求的业务依据传输延迟期望最优与理想传输成功概率最优进行信道接入，在降低数据传输延迟的同时，减少数据传输过程中授权用户的概率，从而避免过多信道切换导致的传输延迟。下面比较在信道条件各

异的情况下，DS-DSA 与 Cog-DSA 策略数据传输中断率性能。假设系统存在如表 2 所示属性各不相同的授权信道。

信道	μ	λ	p_{off}
1	0.40	0.10	0.80
2	0.30	0.10	0.75
3	0.30	0.20	0.60
4	0.90	0.10	0.90
5	0.65	0.35	0.65
6	0.50	0.50	0.50
7	0.10	0.40	0.20
8	0.20	0.30	0.40

图 6 中方点标识线所示为采用 Cog-DSA 策略进行信道接入时，数据传输阶段中断传输的概率（即授权用户出现概率），可以看出随着传输数据分组数的增加，Cog-DSA 策略的中断概率明显增大，而 DS-DSA 策略在信道接入之前判断信道的理想成功传输概率与传输延迟期望，选择最优信道进行接入，有效降低了数据传输过程的中断概率，同时综合考虑传输延迟的期望，随着数据分组大小的增大，中断概率增大的趋势相对 Cog-DSA 策略明显减缓。

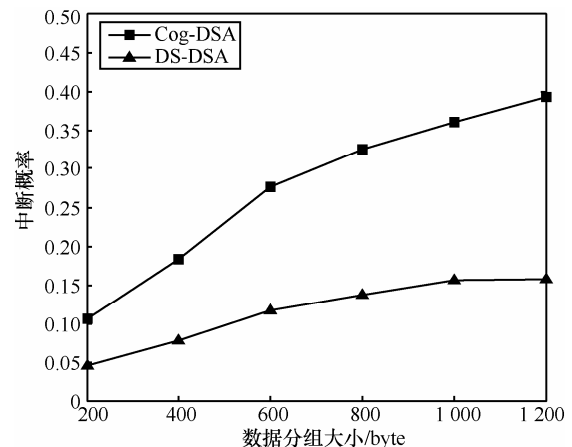


图 6 数据传输中断率比较

6.4 吞吐量性能分析

下文分信道条件一致与信道条件各异 2 种情况比较 DS-DSA 与 Cog-DSA 2 种接入策略的吞吐量性能。

1) 信道条件一致的情况下, 观察吞吐量随信道空闲概率的变化。比较图 7 所示的曲线可知, 在信道空闲概率较小($p_{\text{off}} \leq 0.5$)的情况下, DS-DSA 策略中高优先级业务的吞吐量与普通业务大致相同, 这是由于在信道空闲率较小情况下, 采用最优延迟期望判决聚合信道数 m 为 1, 因此网络中所有业务的吞吐量基本一致。而当信道空闲率增大时, 高优先级业务采用最优信道聚合方案且 $m \geq 2$, 确定了信道聚合集合后, 在控制信道花费相同的时间实现了 m 个数据信道的接入, 因此相对于普通业务有了大幅度提高, 且随着空闲概率的增大, 提高的幅度更大。同时, 相对于 Cog-DSA 策略, 本文提出的策略在信道空闲概率较小时吞吐量要略小, 而在授权信道空闲率较大时, 吞吐量性能较优。

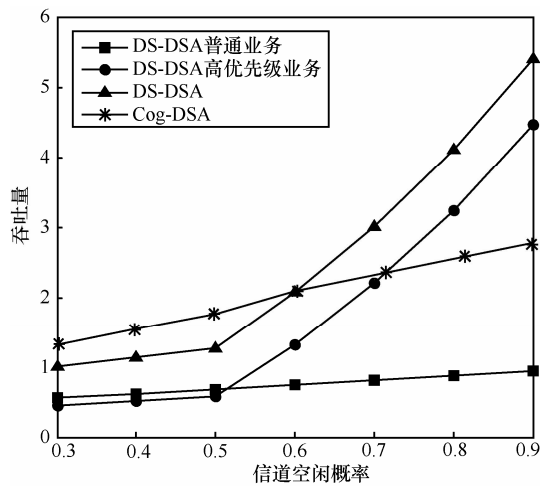


图 7 信道条件一致情况下的吞吐量分析

2) 信道条件各异 (信道条件如 6.3 节中表 2 所示) 情况下, 观察吞吐量随负载 (即数据分组大小) 的变化。由图 8 可知, 在网络负载较小的情况下, DS-DSA 策略中的高优先级业务与普通业务、DS-DSA 策略与 Cog-DSA 策略吞吐量性能基本相当, 而随着网络负载的增加, DS-DSA 中的普通业务与 Cog-DSA 策略吞吐量增加的趋势减缓, 这是由于单个数据信道实现的传输速率有限, 同时又受到授权用户的影响。而 DS-DSA 策略中的高优先级业务由于采用最优信道聚合方案进行传输, 在网络负载高的情况下实现多个信道快速传输, 在降低延迟的同时增加了网络的吞吐量, 从而使 DS-DSA 策略的总吞吐量变大。由此可知, 在信道各异的情况下, DS-DSA 策略在网络负载较大时, 相比 Cog-DSA 吞吐量性能较优。

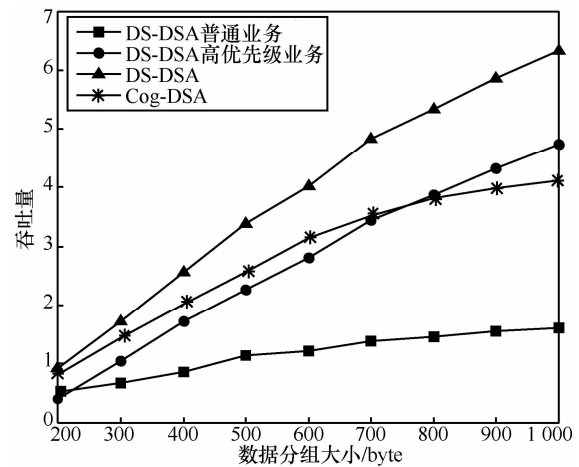


图 8 信道条件各异情况下的吞吐量分析

7 结束语

频谱接入策略是实现认知无线网络高效利用频谱的关键, 本文针对认知 mesh 网络中不同 QoS 需求业务共同接入的特点, 提出服务区分的信道接入策略。DS-DSA 策略依据认知用户传输的业务类型确定信道接入方案, 对优先级高的实时业务依据传输时延期望选择最优的信道接入集合, 在保障实时需求的同时, 降低数据传输过程中授权用户出现的概率; 对普通业务依据理想传输成功概率选择最优信道进行接入, 保障业务传输成功概率。通过理论分析与实验仿真验证了策略的延迟、区分服务、传输中断率以及吞吐量四方面的性能。

此外, 本文重点关注多类型业务频谱接入的区分策略, 控制信道竞争接入的服务区分将在接下来的研究工作中进行关注。

参考文献:

- [1] BOUABDALLAH N, ISHIBASHI B, BOUTABA R, *et al.* Performance of cognitive radio-based wireless mesh networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(1):122-135.
- [2] MAC and PHY for Operation in TV White Space[S]. 2009.
- [3] 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.
- [4] 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 Communica-*

tions, 2012, 33(6):73-81.

- [5] CHOWDHURY F R, AKYILDIZ I F. Cognitive wireless mesh networks with dynamic spectrum access[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2008, 26(1):168-181.
- [6] GHOSH C, CHEN S D, AGARWAL P, *et al.* Priority-based spectrum allocation for cognitive radio networks employing NC-OFDM transmission[A]. Proc IEEE Military Commun Conf[C]. Boston, MA, 2009. 1-5.
- [7] WANG L C, CHEN A D, WEI S L. A cognitive MAC protocol for QoS provisioning in ad hoc networks[J]. Phys Commun, 2010, 3(2): 105-118.
- [8] TUMULURU V K, WANG P, NIYATO D. Performance analysis of cognitive radio spectrum access with prioritized traffic[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(4):1895-1906.
- [9] WANG Y, REN P, DU Q. A channel-aggregation diversity based MAC protocol in power-constrained cognitive ad hoc networks[A]. Proc of 2011 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)[C]. Houston, TX, USA, 2011.1-6.
- [10] KIM H, SHIN K G. Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing (IEEE T-MC), 2008, 7(5):533-545.
- [11] <http://stuwweb.ee.mtu.edu/~ljialian/index.htm>.

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、认知无线电网络。



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。



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。