

认知无线网络按需协同感知和信道分配

李保罡, 刘元安, 刘凯明

(北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘 要: 结合路由发现和维护过程中控制消息的广播特性, 提出将频谱协同感知和信道分配的交互信息部分融入路由控制消息的方法。认知用户的信息交互随按需路由发现过程而启动, 并在路由沿线建立协同感知节点簇, 利用路由维护消息对该节点簇进行维护。同时以认知网络容量最大化为目标, 提出将频谱协同感知和信道分配联合设计。仿真分析表明, 减少了认知用户的信息交互开销, 缓解了认知无线网络中控制信道的瓶颈影响, 对空闲频谱进行了高效再利用。

关键词: 认知无线网络; 协同感知; 控制信道; 信道分配; 路由发现

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)11-0104-07

On-demand cooperative spectrum sensing and channel allocation in cognitive wireless networks

LI Bao-gang, LIU Yuan-an, LIU Kai-ming

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Combining of the broadcast feature of control messages in the route discovery and maintenance process, a method to make the mutual information of the spectrum sensing and channel allocation into the route control messages was proposed. The information exchange of cognitive users is started by the route discovery process, and then creates the node cluster for cooperative sensing along the route path, which is maintained by the route maintenance messages. In order to maximize the network capacity of cognitive users, proposed jointly design of the spectrum sensing and the channel allocation. Simulation analysis showed that the overhead of information exchange for cognitive users reduce, and ease the bottleneck effects of the control channel in cognitive wireless networks, meanwhile efficiently re-use the idle spectrum.

Key words: cognitive wireless networks; cooperative sensing; control channel; channel allocation; route discovery

1 引言

认知无线网络 (CRN) 中包含多个认知节点, 能够利用环境认知来获得环境信息, 并对信息进行挖掘处理与学习, 为智能决策提供依据, 通过网络重构实现对无线环境地动态适应。由于认知用户

(SU) 占用了主用户 (PU) 未使用的频段, 为避免对主用户造成干扰, 认知用户必须能够准确探测出主用户的存在, 并在很短的时间内退出所占用的频谱。这就对 CRN 中的频谱感知和频谱接入提出了很高的要求。而利用周围其他认知用户的感知信息进行协同感知, 可以应对无线环境中的阴影和多径

收稿日期: 2011-08-01; 修回日期: 2011-11-09

基金项目: 国家重大专项 (2010ZX03005-001-03, 2010ZX03007-003-04); 国家自然科学基金资助项目 (60802033, 60873190); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (2009RC0308); 安全生产智能监控北京市重点实验室资助项目

Foundation Items: The National Major Projects of China(2010ZX03005-001-03, 2010ZX03007-003-04); The National Natural Science Foundation of China(60802033, 60873190); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2009RC0308); The Intelligent Safety Monitoring Project Supported by Beijing Key Laboratory

等因素造成的影响, 解决了单个认知用户的本地频谱检测不准确的难题。频谱接入技术则可以最大限度地提高空闲频谱的利用率, 并减少对主用户和认知用户造成的干扰。然而协同频谱感知和频谱接入都需要周围用户通过控制信道提供必要的参考信息, 因此控制信道的选择和使用成为这两项关键技术实施的瓶颈^[1]。

现有对 CRN 的研究中, 一般都是选择 ISM 频段或专用信道作为公共控制信道, 然而目前 ISM 频段已经变得很拥挤, 不可避免地要受到各种干扰, 另选一条专用信道会给本已频谱短缺的网络雪上加霜, 因此设计可靠高效的公共控制信道迫在眉睫。

协同频谱感知、频谱接入和路由技术三者之间并不是独立存在的。协同感知中的检测时间、检测周期和虚警概率等会影响空闲信道的数量和质量, 从而影响到认知用户频谱接入机会的多少, 进而影响认知网络的网络吞吐量^[2,3]。信道分配是否合理不仅影响到空闲频谱的使用效率, 还会影响节点之间的连通性, 从而影响路由路径的选择。而本文发现, 所有这些技术都是为认知用户的业务传输服务的, 只有业务发生时, 这些操作才变得有意义。

本文根据按需原则, 伴随路由发现启动各种控制开销的互传, 利用路由控制消息的广播特性, 将协同感知和信道分配过程部分融合到路由发现和维持的过程中, 并在路由路径沿线以路由节点为中心形成协同感知节点簇, 同时只针对活动路由节点进行频谱协同感知和信道分配, 以减少控制开销和活动认知用户的数量。将协同感知中空闲频谱的可用性作为信道分配的依据之一, 并联合邻居认知用户的信道使用情况, 以最大化认知网络的容量为目标, 实现对活动路由节点的信道分配。

2 相关工作

公共控制信道的设计对整个认知无线网络的性能影响重大, 因此近年来国内外已经开展了一些研究工作。Christian Doerr 等在文献[4]中利用群体智能方法动态的发现和和管理控制信道, 该方法不需要节点间交换合作信息, 具有独立发现和适应所处环境的特性, 并证明了将控制信道的分配问题比作多商品物流问题的可行性, 取得了与理论最优算法相近的性能。

Brandon F. Lo 等在文献[5]中基于相邻区域节

点频谱的同质性, 设计了一种分布式和启发式的控制信道可恢复方法, 通过自适应更新相邻节点的可使用频谱信息, 从中选出一个该区域公共的控制信道作为替换, 因为这种信道切换很短, 故实现了一种虚拟的不间断的公共控制信道。

Kaigui Bian 等在文献[6]中基于法定人数系统方法, 结合多信道 MAC 协议设计中的信道跳频思想, 建立了一个基于法定人数的信道跳频系统。该方法充分利用了认知无线网络中空闲频谱分布的不连续性以及由此带来的频谱特性的差异性, 达到了快速切换控制信道和确保控制信道的稳定性。

有关信道分配和路由联合设计的研究也已经不少。国内南通大学的顾金媛、章国安和包志华团队在文献[7]中提出了一种认知无线 Mesh 网络中联合多路径路由和信道分配的策略, 该方法根据所选路径情况设置交叉节点的中继功能, 同时以主用户历史占用每个信道的最少次数作为依据来选择信道。华中科技大学的程赓、程文青和杨宗凯团队在文献[8]中提出以端到端路径的累积时延为判据, 结合按需路由实现了频谱分配的方法。

然而有关频谱感知技术对认知用户影响的研究很少, 文献[2,3]重点阐述了合作感知的参数如检测时间、检测周期和虚警概率等与认知用户吞吐量之间的均衡设计。据本文所知, 对协同频谱感知、频谱接入和路由技术三者之间关系的联合研究更是未曾见报道。

3 网络模型及问题描述

假设认知无线网络中存在 U 个主用户, W 个认知用户, 授权给主用户的频谱可以分成 F 个非重叠信道。因为这里主要讨论公共控制信道的高效利用问题, 故假设存在一个公共控制信道, 不讨论公共控制信道的建立过程。

考虑采用一个简单图 $G=(V, E)$ 来表示认知无线网络, 其中 V 表示 SU 的集合, E 为链路集合。假设传输层采用 IEEE 802.11 标准, 每个认知节点 $u \in V$ 都存在一个通信距离 d_{tr} 和一个干扰距离 d_{ir} , 一般情况下有 $d_{tr} > 2d_{ir}$, 这里为简便取节点的干扰距离是通信距离的 2 倍, 即干扰范围取为两跳距离范围。

本文主要研究将协同感知、信道分配和路由发现过程的控制信息进行合并, 以高效利用公共控制信道, 同时为合理利用空闲信道, 信道分配的原则应该是认知用户的接入对主用户网络和认知用户

网络产生的干扰尽量小，同时自身所接入的信道容量最大化。下面将从路由协议、数据融合算法和信道分配算法 3 个方面进行详述。

4 频谱感知的路由协议

本文以广泛应用的 AODV 按需路由协议为例，主要对路由请求阶段、路由应答阶段、路由维护阶段进行修改，以实现主用户和认知用户频谱感知的路由协议 (SA-AODV, spectrum-aware AODV)。其他路由协议也可做类似修改来实现本文设计思想。

4.1 路由请求阶段

当源节点 S 要给目的节点 D 发送数据分组，但路由表中没有到达 D 的路由时，S 会发起一个路由发现过程。源节点在整个网络中广播路由请求消息 (RREQ)，激起各个认知节点间的频谱信息交换过程。每个认知节点可以利用认知射频接口，周期性地感知主用户的频谱信号并作出本地判决，以及一跳范围内其他认知节点的信道使用情况。因此在传统 RREQ 消息内容的基础上，添加如下频谱信息：本节点感知的主用户频谱信息表 S_local，本地判决出的主用户空闲频谱信息表 B_local，本节点一跳范围内认知节点的信道使用表 C_one，如表 1 所示。其中主用户各空闲频谱的可用概率 $P(H_0)$ 放于 B_local 中，该参数通过统计单位时间内该空闲频谱上主用户出现的时间长短来计算。为了保证路由和频谱信息的最新并执行信道分配，设置目的节点唯一标识为 1，这样 RREQ 到达目的节点才可以回复路由应答消息 (RREP)。

表 1 携带频谱信息的 RREQ 帧格式

传统 RREQ 信息	S_local	B_local	C_one
------------	---------	---------	-------

中间认知节点收到 RREQ 消息后，首先将该邻节点纳入本节点的协同感知节点簇，并取出频谱信息，添加或更新本节点的协同感知主用户频谱信息备处理表 S_coop，主用户空闲频谱信息表 B_coop，以及本节点两跳范围内认知用户信道使用表 C_two。然后，比较 RREQ 中的 ID 号和源地址以及判据值等，决定是转发还是丢弃。

这样，利用 RREQ 消息的广播机制，每个认知节点都对其传播范围内的邻节点广播 RREQ 消息，如图 1 所示，节点 A 能够获得虚线框内 4 个节点的 RREQ 消息。这样每个认知节点即可获得周围邻节点感知的频谱信息，包括各个邻节点周围一跳内的

认知节点的信道使用信息，从而建立本中间节点的 3 张频谱信息表：S_coop、B_coop 和 C_two。

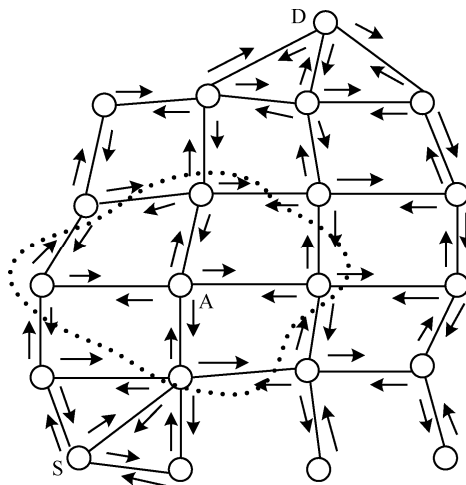


图 1 RREQ 消息交换过程

4.2 路由应答阶段

目的节点 D 收到来自源节点 S 的 RREQ 请求消息后，沿着所选择的最佳路径回复路由应答消息 (RREP)，其中需携带本节点分配好的信道索引 C_local，本节点的两跳范围内认知用户信道使用表 C_two。

中间认知节点收到 RREP 消息后，首先将下游邻节点的 C_local 和 C_two 与本中间节点的 C_two 进行综合，即可得到该中间节点与下游邻节点间通信链路的两跳范围干扰链路表 C_inte，如表 2 所示。

表 2 通信链路的两跳范围干扰链路表 C_inte

信道号	用户数
channel 1	number1
channel 2	number2
channel 3	number3
...	...

此外，根据 RREP 的单播特性，该中间节点转发 RREP 消息，周围邻节点包括上下游路由节点收到 RREP 消息后，获知该路由即将建立，而且存在路由节点在自己的一跳范围内，故需要自己提供本地感知的频谱信息，以帮助该路由节点进行准确地频谱感知。因此在路由路径沿线，以各个路由节点为中心形成多个协同感知节点簇，在后续路由活动的一段时期内进行频谱感知协作。协同感知节点簇的形成如图 2 所示，虚线框内为以该路由节点为中心的协同感知节点簇。然后，按照协同感知的

数据融合算法对数据进行处理，得到本中间节点周围的空闲频谱信息。最后，按照信道分配算法为该中间节点分配信道。

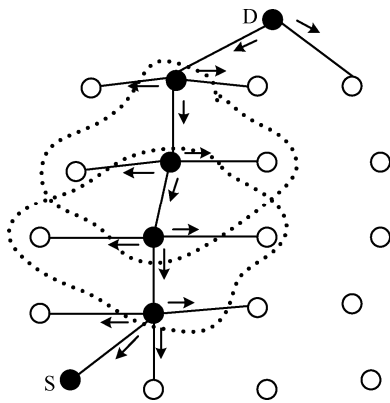


图 2 协同感知节点簇的形成

4.3 路由维护阶段

路由节点周期性广播 Hello 消息，除了传统的对相邻节点进行连接确认后，本文还给它附加协同感知节点簇的维护功能。因为 CRN 中路由节点和非路由节点的移动性以及周围环境的变化，需保持活动路由节点一跳范围内的认知节点经常被选择更新，以在协同感知节点簇内保持一定数量有效的协作节点。Hello 消息中除传统的内容外，需携带该路由节点的 C_local 和 C_two。收到 Hello 消息的认知节点需回复一个 Hello 消息应答帧，其内容包括该认知节点的 C_one，以备路由节点切换信道时使用。此外，收到 Hello 消息的上游路由邻节点需更新该节点与下游邻节点通信链路的 C_inte。

当某路由节点的信道不可用时，需要进行信道切换，信道分配完成后发起一个 Hello 广播，将本路由节点信道变更的结果通过 Hello 消息通知周围邻节点。

如果一定时间内某协同感知节点簇内的节点，没有收到任何该中心路由节点发送来的信息，则认为该中心路由节点已经失效，该协同感知节点簇内的成员自动解散。同时该中心路由节点的上游节点核实是否有活动路由使用该链路，以决定是否尝试路由本地修复。

可见，频谱信息的传递主要包括以下几个阶段：首先由路由请求过程发起，RREQ 消息中携带感知的频谱信息，在全网内进行频谱信息的交换；然后在路由回复阶段，RREP 消息中携带频谱信息，在最佳路由由路径沿线形成以各个路由节点为中心的协同感知节点簇；最后在路由维护阶段，Hello

消息对协同感知节点簇进行维护。

5 数据融合算法

在路由发现过程启动之前，各个认知节点可以周期性地对主用户频谱状态进行本地估计，以便为某些频谱预测算法提供数据；当协同感知节点簇伴随路由发现建立后，在各个路由节点处则需利用协同感知节点簇内成员的频谱感知信息对主用户的频谱状态进行估计。协同感知中的数据融合方法很多，基于文献[2,9]，这里采用性能较好的基于 Neyman-Pearson 定理的软判决融合。因为本文重点不在具体的数据融合算法推导，所以这里主要阐述数据融合算法中的部分相关内容，具体推导可参见所引文献。

图 3 所示为本文所采用的周期性频谱检测的帧格式，由位于帧前半部分的频谱检测时间 τ 和后半部分的数据传输时间 $T-\tau$ 两部分组成。

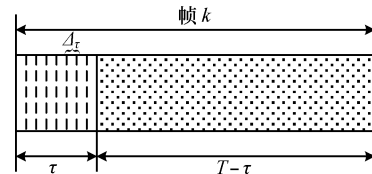


图 3 周期性频谱感知的帧结构

假设存在 N 个能量检测样本， $i=1,2,\dots,N$ ，认知用户的接收信号用 $y(i)$ 来表示，则频谱感知主要是在下面 2 个假设中判断主用户频谱的状态：

$$\begin{aligned} H_0: & y(i) = n(i) \\ H_1: & y(i) = hx(i) + n(i) \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $x(i)$ 是主用户的发射信号， h 是主用户发射机和认知用户接收机之间的信道系数， $n(i)$ 是均值为 0，方差为 σ_n^2 的高斯白噪声。

衡量频谱感知性能的 2 个重要指标是检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 。其中，检测概率 P_d 是当主用户活动且检测结果为 H_1 时的概率，而虚警概率 P_f 是当主用户不活动但检测结果为 H_1 时的概率。当使用能量检测法时，基于二元假设检验原理，可以得到 P_d 和 P_f 的表达式^[2]如下：

$$P_d = Q\left(\left(\frac{\varepsilon}{\sigma_n^2} - \gamma - 1\right) \sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma + 1}}\right) \quad (2)$$

$$P_f = Q\left(\left(\frac{\varepsilon}{\sigma_n^2} - 1\right) \sqrt{\tau f_s}\right) \quad (3)$$

其中, γ 表示认知用户接收机的瞬时信噪比, ε 为判决门限, f_s 为检测频率, $Q(\cdot)$ 是标准高斯互补分布函数。将式(2)代入式(3)替换 ε , 得到给定检测概率 $\overline{P_d}$ 下的虚警概率为

$$P_f = Q(\sqrt{2\gamma+1}Q^{-1}(\overline{P_d}) + \sqrt{\tau f_s \gamma}) \quad (4)$$

对于各个认知节点的本地数据融合阶段, 可以采用不同时间的独立测量样本方法^[2], 以便利用时间分集增益来提高检测水平, 如图 3 所示, 将检测时间 τ 再分成多个独立的子检测时间 $\Delta\tau$ 即可; 对于多个用户协同感知阶段, 则可应用 Neyman-Pearson 定理, 得到最优线性合作频谱检测方法。其中, 体现各个用户对最终判决贡献多少的加权系数可以表示为

$$w_j = \frac{h_j^*}{\sum_{i=1}^M |h_i|^2} \quad (5)$$

其中, w_j 为认知用户 j 的加权系数, M 为协同感知的认知用户数量, h_j 是主用户发射机和认知用户 j 接收机之间的信道系数。利用该加权系数也可以对各合作节点本地判决的一些信息进行加权利用, 如主用户空闲信道可用概率 $P(H_0)$, 即

$$P(H_0) = \sum_{j=1}^M w_j P_j(H_0) \quad (6)$$

通过上面的数据融合判决, 可以在本地或中心节点得到主用户频谱的忙闲状态。而依据通信链路两跳范围内邻居认知用户信道使用表, 统计共享每个信道的认知用户数量, 可以推断各空闲信道的认知用户负载轻重情况。综合这 2 种情况, 就可以得到各个信道上主用户和认知用户的使用情况, 从而为下一步的信道分配提供基础。

6 信道分配算法

传统无线网络中各个用户可以公平地竞争信道, 而认知无线网络中拥有信道优先权的主用户的出现随时可能会中断认知用户正在传输中的业务。此外, 认知用户的接入也可能会造成已有认知用户网络的性能下降。所以从保护主用户通信角度, 可以选择在满足一定检测概率 P_d 要求的前提下, 虚警概率 P_f 尽量小的信道。从认知用户网络角度, 在干扰范围内共享某空闲信道的邻居认知用户越少, 可以减少流内干扰和流间干扰, 避免对现有认知用户造成过多干扰。从主用户对认知网络的影响角度, 主用户不出现概率即信道可用概率 $P(H_0)$ 越大, 说

明知用户获得的传输机会越大。从各个认知用户自身角度, 频谱感知阶段的检测时间 τ 过长, 会缩短认知用户的数据传输时间。将这些对吞吐量的影响因素综合起来, 可以得到认知用户选择信道 v_j 时的可获得吞吐量为

$$C_{avl}^j = \frac{T-\tau}{T} C_j (1-P_f) P(H_0) \quad (7)$$

其中, C_j 为根据香农公式算出的理论信道容量, $(1-P_f)P(H_0)$ 为认知用户在该信道可获得的传输机会概率, $T-\tau$ 为除去认知用户感知静默期后的实际数据传输时间。

考虑到 q_j 个认知用户共享该信道对信道容量的影响, 新认知用户加入后最终可获得吞吐量为

$$C_{final}^j = \frac{C_{avl}^j}{q_j+1} = \frac{T-\tau}{T(q_j+1)} C_j (1-P_f) P(H_0) \quad (8)$$

对于多用户协同感知, 将式(5)引入式(4), 消去式(7)中的 P_f 得到

$$C_{final}^j = \frac{T-\tau}{T(q_j+1)} C_j \left[1 - Q \left(\sqrt{2\gamma \sum_{i=1}^M |h_i|^2} + 1 Q^{-1}(\overline{P_d}) + \sqrt{\tau f_s \gamma \sum_{i=1}^M |h_i|^2} \right) \right] P(H_0) \quad (9)$$

当 $q_j=0$ 时, 即没有邻居认知用户共享此信道, 此时新用户可以获得全部可获得吞吐量。

所以在主用户和认知用户的共同影响下, 新接入认知用户应选择空闲信道中最终可获得吞吐量最大的信道, 即形成如下最优化问题

$$\underset{j \in CH_{idle}}{\text{Maximize}} (C_{final}^j) \quad (10)$$

其中, CH_{idle} 为根据数据融合算法和表 S_coop 计算出的主用户空闲信道集。当空闲信道数较少时, 上述最优化问题可以采用穷举法求解; 当空闲信道数较多时, 可以通过分步限制信道负载轻重门限、信道可用概率门限等来减少信道数量, 以减轻计算量。

此外, 当可用空闲信道数缺乏或已有空闲信道负载较重时, 可以通过适当降低给定的检测概率来降低虚警概率, 或调整检测时间, 以增加空闲信道数量。

当已分配的主用户空闲频谱变得不可用时, 认知用户需终止信息传输进行退避。根据所属协同感知节点簇提供的信息重新对本节点进行信道分配, 并通过 Hello 消息告知该簇内成员, 完成频谱切换。

7 仿真及性能分析

为了验证本文所提出的按需协同感知和信道分配方法的有效性，采用系统归一化控制开销和认知用户系统吞吐量作为评测性能指标。网络环境设置如下：一个(1 500m×1 500m)的无线网络，50 个认知用户随机分布在该区域里，共有 8 个非重叠主用户信道，每个信道带宽均为 1Mbit/s。设定节点传输距离为 250m，干扰距离为 550m。假设随机产生 2~10 条 CBR 数据流，速率均为 256kbit/s。系统虚警概率设为 0.1，每帧持续时间 $T=40\text{ms}$ ，频谱检测时间 $\tau=3\text{ms}$ ，PU 在每个信道上以一定概率随机出现，故每个节点对某个信道的可用概率设为 (40%，60%，80%)。假设每个认知用户接收机处的瞬时信噪比均为 -10dB。仿真时间 1 000s，所有数据取自 10 次仿真结果的平均值。因为本文重点不在数据融合的具体算法，故简化了数据融合部分仿真的复杂度。

设定信道可用概率为 80%，在仿真时间内归一化控制开销的对比情况如图 4 所示。传统的 AODV 和频谱协同感知的控制开销都低于本文所提算法 (SA-AODV) 所带来的控制开销。分布式频谱分配算法因为需要频谱信息的多次交换，才能达到最优分配方案，必然引入大量开销，在这里没有可比性，故省略该部分。然而仅 AODV 和频谱协同感知两部分曲线的加和就已经与 SA-AODV 相当，例如在信源点数为 6 时，二者加和 $3.4\%+4.4\%=7.8\%$ 已经超过 SA-AODV 的 5.4%。

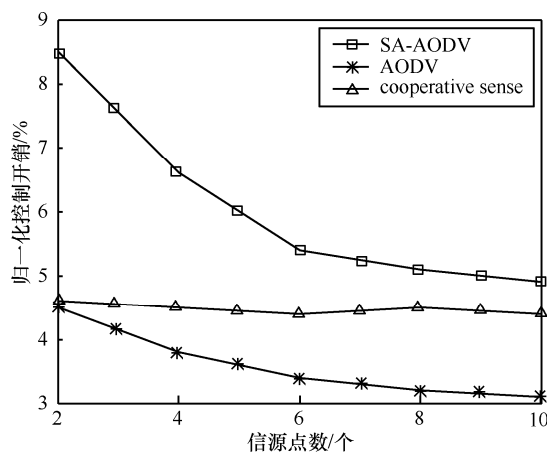


图 4 归一化控制开销对比

从图 5 中可以看到，信道可用概率对认知用户的系统吞吐量的影响很大。当 CBR 数据流为 4 条

时，信道可用概率 40% 的系统比 80% 的系统吞吐量相差了近一倍。信道可用概率越低，说明主用户的出现次数越多，所以认知用户必须多次重新选择信道，这必然会影响到认知用户的业务传输，从而引起吞吐量的降低。此外，CBR 数据流的增多，也使得紧缺的信道资源面临更大的竞争，甚至干扰范围内多个认知用户共享一个信道的现象更普遍，所以吞吐量的增长开始放缓。

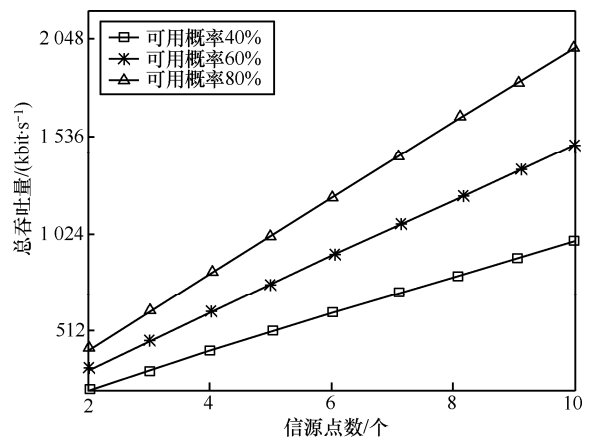


图 5 可用概率对吞吐量的影响

在图 6 中，设定信道可用概率为 80%，4 条 CBR 数据流，认知用户的系统吞吐量伴随频谱的检测时间变化，其曲线出现了一个峰值 660kbit/s，随后逐渐降低。这说明存在一个最佳检测时间，可以达到频谱检测性能和认知用户吞吐量的最佳折中。因为检测时间的降低必然引起虚警概率的提高，从式(3)中也可以印证这一点。然而在式(8)中，检测时间和虚警概率又共同影响着吞吐量。

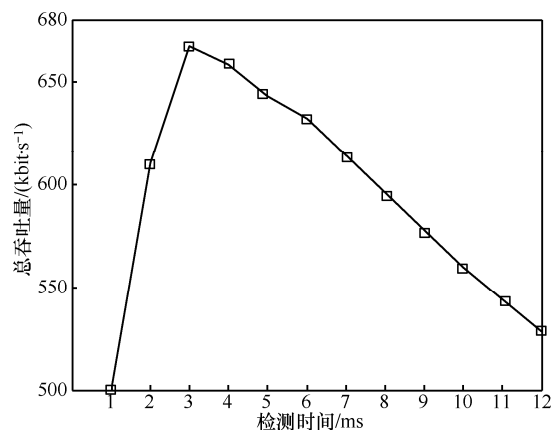


图 6 检测时间对吞吐量的影响

在图 7 中，设定信道可用概率为 80%，可用信道数变化同样会引起认知用户的系统吞吐量变化。

因为信道数减少, 则会有更多的认知用户共享同一个信道, 见式(8), 会引起信道容量下降很快。同时当信道变得不可用时, 多个认知用户都会受到影响, 重新信道分配对业务的中断也会影响系统吞吐量。

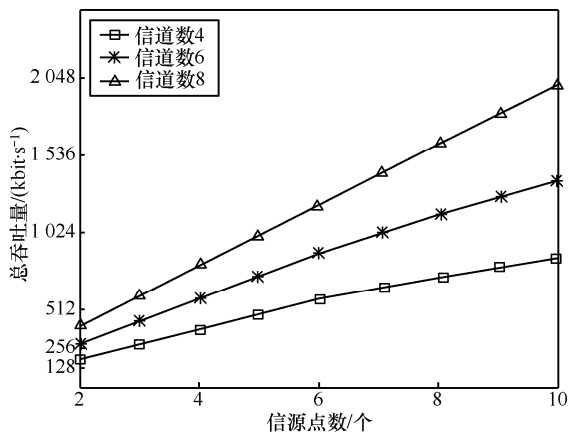


图 7 信道数对吞吐量的影响

8 结束语

本文将认知用户间的频谱信息交互与路由发现和维持过程中的信令交互同时进行, 路由发现过程的启动激发认知用户间的频谱信息的交互, 在 RREQ 消息中携带频谱感知信息, 在全网内进行频谱信息的交换, 利用 RREP 消息的单播机制在最佳路由路径沿线形成以各个路由节点为中心的协同感知节点簇, Hello 对协同感知节点簇进行维护。同时提出了最大化认知用户吞吐量的信道分配算法。通过仿真表明, 公共控制信道的设计大大减少了系统控制开销, 主用户的出现概率、检测时间、虚警概率和认知用户数等都对认知用户的吞吐量造成影响, 印证了本文所提方案的正确性。

参考文献:

[1] LIANG Y C, CHEN K C, LI G Y. Cognitive radio networking and communications: an overview[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011,60(7): 3386-3407.

[2] LIANG Y C, ZENG Y, EDWARD C Y P. Sensing-throughput trade-off for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4), 1326-1337.

[3] PEI Y, HOANG A T, LIANG Y-C. Sensing-throughput tradeoff in cognitive radio networks: how frequently should spectrum sensing be carried out?[A]. IEEE Personal Indoor Mobile Radio Communications,

PIMRC[C]. 2007.

[4] CHRISTIAN D, DOUGLAS C S, DIRK G. Dynamic control channel assignment in cognitive radio networks using swarm intelligence[A]. IEEE GLOBECOM proceedings[C]. 2008. 1-6.

[5] LO B F, AKYILDIZ I F, ABDULLAH M. Efficient recovery control channel design in cognitive radio ad hoc networks[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2010, 59 (9), 4513-4526.

[6] BIAN K, PARK J M, CHEN R. Control channel establishment in cognitive radio networks using channel hopping[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29 (4), 689-703.

[7] 顾金媛, 章国安, 包志华. 认知无线 mesh 网络联合多路路由和信道分配策略[J]. 计算机科学, 2011, 38 (5), 45-48.

GU J Y, ZHANG G A, BAO Z H. Joint multi-path routing and channel assignment strategy for cognitive wireless mesh networks[J]. Computer Science, 2011, 38 (5), 45-48.

[8] 程赓, 李昀照, 刘威. 认知无线网络路由及频谱分配联合策略研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30 (3), 695-698.

CHENG G, LI Y Z, LIU W. Joint routing and spectrum assignment in cognitive radio networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30 (3), 695-698.

[9] MA J, ZHAO G D, LI Y G. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2008, 7 (11), 4502-4507.

[10] HILLENBRAND J, WEISS T A, JONDRAL F K. Calculation of detection and false alarm probabilities in spectrum pooling systems[J]. IEEE Commun Lett, 2005, 9 (4), 349-351.

作者简介:



李保昱 (1980-), 男, 河北保定人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为协作认知技术及无线 Mesh 网络。

刘元安 (1963-), 男, 四川乐至人, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信、信息安全。



刘凯明 (1978-), 男, 湖北潜江人, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为宽带无线通信、无线自组织网络及网络融合等。