

分布式认知无线网络中的主动频谱切换

蒋华¹, 马立川², 严定宇², 潘楠²

(1.空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077;

2.西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 主要研究分布式认知无线网络中的频谱切换, 并提出一种主动的频谱切换方案。认知用户通过感知结果与历史信息建立授权用户的活动模型, 预测频谱的使用情况。在不对授权用户产生干扰的前提下, 提前安排频谱切换。同时, 采用基于蚁群任务分工算法的频谱选择方法, 使得认知用户综合考虑通信参数, 实现认知用户的按需切换, 保证不间断的传输。仿真表明, 提出的方案能够提前执行切换, 并在较短的时间内完成业务量的传输, 同时具备较高的灵活性, 适用于分布式认知无线网络。

关键词: 分布式认知无线网络; 频谱切换; 频谱预测; 蚁群任务分工算法

中图分类号: TN929.52

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)Z2-0196-07

Proactive spectrum handoff in distributed cognitive radio networks

JIANG Hua¹, MA Li-chuan², YAN Ding-yu², PAN Nan²

(1.School of Telecommunication and Engineering, Air Force Engineering Univ., Xi'an 710077, China;

2.State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: Researches on the spectrum handover in distributed cognitive radio network, and the method of proactive spectrum handoff is proposed. The model is established by spectrum sensing and the information before which shows the law authorized user follows, to predict the usage of spectrum. The cognitive user can perform spectrum handoff in advance without interference on the authorized user. At the same time, the method of spectrum selection based on the task allocation algorithm of ant colony is proposed, considering more communication parameters, making cognitive user can perform spectrum handoff as required, to ensure the uninterrupted transmission. Simulation and analysis show that, the proposed scheme can perform spectrum handoff in advance, complete transmission of the traffic in a short time and have a high flexibility for distributed cognitive radio network.

Key words: distributed cognitive radio network; spectrum handoff; spectrum prediction; task allocation algorithm of ant colony

1 引言

认知无线电是继软件无线电之后无线通信技术的“下一个大事件”, 一经提出就得到了极大的关注。认知无线电工作在授权频段^[1], 其可用频谱资源是动态变化的, 在授权用户未使用的情况下, 在空域、时域或频域中出现的可以被利用的频谱称之为频谱空洞。认知用户“租用”授权频谱, 处于一种“伺机”的工作模式, 很大程度上受制于授权用户的行为。当授权用户出现并夺回认知用户当前所使用的某个信道时, 认知用户需要退出该信道并寻找其他可用频谱资源, 引发了频谱切换。

传统的频谱切换是在授权用户出现之后, 认知用户在感知时隙发现授权用户的信号而安排的切换, 容易对授权用户造成干扰。所以国内外现在研究的热点在于提前安排的频谱切换。文献[2]提出在动态的频谱环境, 通过对当前使用频谱的周期性检测, 形成对本信道授权用户行为模型的规律性记录, 从而对未来频谱的可用性做出准确预测, 实现切换时间的预判定。但是运用文中的切换方案有可能在每个通信时隙都要执行切换, 没有充分运用频谱预测的功能, 应该同时考虑认知用户与信道的状态。在需要进行频谱切换的时候, 对认知用户而言, 有可能存在多个空闲频段可供选择, 这就需要提出基

于认知无线网络特点的频谱选择算法。文献[3]提出采用马尔科夫链的接入模型分析的信道预留式频谱切换，周期性地检测并预留一定长度的频谱给认知用户作为临时的切换信道。结果表明在牺牲授权用户一定通信成功率的前提下可以大幅度降低认知用户的掉话率，但是采用的是静态的频谱分配方式，并不适合认知无线网络的动态频谱接入模式。

本文对频谱切换的关键技术，切换时间的判定以及目标频谱的选择算法展开了研究，提出一种主动频谱切换的方法，预先判定切换时间的同时，选择出适合认知用户通信的信道进行切换。通过仿真结果可以看出，认知用户采用本文提出的方法进行频谱切换，在不干扰授权用户的同时，基本能够做到智能切换，并在较短的时间内完成相应业务量的传输，具备较好的性能。

2 频谱预测模型及切换时间预判

2.1 频谱预测模型的建立

经过一段时间的观察，认知用户存储了一定数量的授权用户活动信息，总结出授权用户的活动规律，因为授权用户占用信道的时间是连续且渐进无偏的，所以采用最大似然估计法对负指数分布的速率参数进行估计，并实时更新对速率参数估计值，以便逐步逼近真实值，增加预测结果的准确性。

设认知用户在本地探测到 OFF 状态的持续时间 $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，ON 状态的持续时间 $y_i = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 。则 OFF 状态持续时间的速率参数 λ_{OFF} 满足最大似然函数

$$L(\lambda_{\text{OFF}}) = \prod_{i=1}^n \lambda_{\text{OFF}} e^{-\lambda_{\text{OFF}} x_i} = \lambda_{\text{OFF}}^n e^{-\lambda_{\text{OFF}} \sum_{i=1}^n x_i}$$

$$\frac{d \ln L}{d \lambda} = \frac{n}{\lambda} - \sum_{i=1}^n x_i = 0$$

认知用户对授权用户 OFF 持续时间速率参数的最大似然估计值与认知用户对授权用户 ON 持续时间速率参数的最大似然估计值分别为

$$\hat{\lambda}_{\text{OFF}} = \frac{1}{x} \quad \hat{\lambda}_{\text{ON}} = \frac{1}{y}$$

根据排队论的相关知识，业务请求的到达过程满足离散泊松随机过程，业务请求到达时间间隔服从连续负指数分布。则状态 OFF 的持续时间 X_i 服从速率参数为 $1/\lambda_{\text{OFF}}$ 的负指数分布，状态 ON 的持

续时间 Y_i 服从速率参数为 $1/\lambda_{\text{ON}}$ 的负指数分布。

$$f(x_i) = \begin{cases} \lambda_{\text{OFF}} e^{-\lambda_{\text{OFF}} x_i}, & x > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$f(y_i) = \begin{cases} \lambda_{\text{ON}} e^{-\lambda_{\text{ON}} y_i}, & y > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

信道的可用率

$$\eta_i = \frac{EX_i}{EX_i + EY_i} = \frac{\lambda_{\text{ON}}}{\lambda_{\text{ON}} + \lambda_{\text{OFF}}}$$

根据更新理论，得出授权用户转移概率

$$P_{00}^i = 1 - \eta_i + \eta_i e^{-(\lambda_{\text{ON}} + \lambda_{\text{OFF}})\Delta t}$$

$$P_{10}^i = 1 - \eta_i - (1 - \eta_i) e^{-(\lambda_{\text{ON}} + \lambda_{\text{OFF}})\Delta t}$$

其中， Δt 代表上一感知时隙到下一感知时隙的时间间隔，即认知用户的感知—传输周期长度。

2.2 剩余空闲时长的计算

在切换过程中，可用资源的稳定性，即认知用户能够占有该资源的持续时间，是一个影响切换次数的重要因素。

由图 1 所示，授权用户从 0 状态转移到 0 状态的概率以及从 1 状态转移至 0 状态的概率分别为

$$P_{00}^i = 1 - \eta_i + \eta_i e^{-(\lambda_{\text{ON}} + \lambda_{\text{OFF}})\Delta t}$$

$$P_{10}^i = 1 - \eta_i - (1 - \eta_i) e^{-(\lambda_{\text{ON}} + \lambda_{\text{OFF}})\Delta t}$$

其中， Δt 代表上一感知时隙到下一感知时隙的时间间隔，即认知用户的感知—传输周期长度。

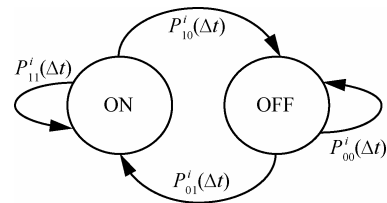


图 1 频谱 ON/OFF 状态转移

根据状态转移图，可得信道下一通信时隙繁忙的概率

$$P_{01}^i(\Delta t) = 1 - P_{00}^i(\Delta t)$$

$$P_{11}^i(\Delta t) = 1 - P_{10}^i(\Delta t)$$

那么信道 i 在下一阶段的空闲概率为

$$P_i = \begin{cases} P_{00}^i = \frac{\lambda_{\text{OFF}} + \gamma_i e^{-(\lambda_{\text{ON}} + \lambda_{\text{OFF}})\Delta t}}{\lambda_{\text{ON}} + \lambda_{\text{OFF}}}, & L_i = 0 \\ P_{10}^i = \frac{\lambda_{\text{OFF}} - \lambda_{\text{OFF}} e^{-(\lambda_{\text{ON}} + \lambda_{\text{OFF}})\Delta t}}{\lambda_{\text{ON}} + \lambda_{\text{OFF}}}, & L_i = 1 \end{cases}$$

其中, L_i 为上一阶段信道 i 的状态。

根据空闲概率的计算公式以及概率论的相关知识, 可以计算不同信道的剩余空闲时长。

$$T_i = \frac{P_i}{\lambda_{\text{OFF}}} = \begin{cases} P_{10} \frac{1}{\lambda_{\text{OFF}}} \\ P_{00} \left(\frac{1}{\lambda_{\text{OFF}}} - (n+1)\Delta t \right) \end{cases}$$

其中, $n=0,1,\dots$, P_i 为信道 i 在下一通信时隙的空闲概率大小。通过这种方法认知用户可以计算出不同信道的空闲剩余时间, 并存储在空闲信道剩余时长列表中。

2.3 切换时间的判定

频谱预测过程中的时间预判定是认知用户在感知信息处理之后进行的切换判定准则, 决定着认知用户何时进行信道切换。由于同一认知用户在不同信道上的传输速率是不一样的, 这与信息的编解码方式、认知用户的发射功率以及信道的衰落大小(信噪比)、信道容量都有一定的关系。认知用户可以根据需要传输的业务量以及传输速率计算在不同信道上传输所需的时间, 并存储在传输需求时间列表中。

切换时间的判定是频谱切换中的关键技术, 认知用户通过比较空闲信道剩余时长列表和认知用户对不同信道的传输需求时间列表中对应的项目, 可以提前判断是否需要执行频谱切换。认知用户切换时间预判定方法流程, 主要包括信息感知, 空闲信道剩余时长列表、传输需求时间列表的建立与更新, 切换判定等流程。判定流程如图 2 所示。

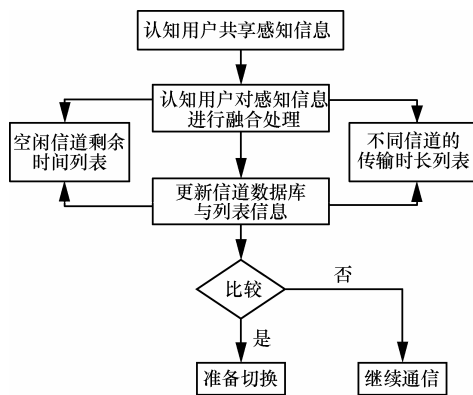


图 2 切换时间的预判定方法

3 目标信道选择算法

认知无线网络中的认知用户识别环境以获得可用频带, 然后在可用频带上传输数据分组,

类似地, 蚂蚁中的蚂蚁个体通过信息素识别环境以检测相应的任务, 然后由较能胜任这些任务的个体去执行。任务在没有中央控制的情形下被分配和调节是蚁群任务分工算法的应用意义。而分布式认知无线网络具备此算法的应用场景, 所以利用蚁群的任务分工模型可以建立一个有效的认知无线网络的频谱切换模型。2 个模型的映射关系如表 1 所示。

表 1	对应关系
蚁群任务分工模型	认知无线网络频谱切换模型
蚁群中的个体	认知用户
蚁群中的任务	选择目标信道
刺激强度	空闲剩余时间
反应门限	传输所需时间

1) 蚁群中的蚂蚁个体映射成分布式认知无线网络中的认知用户。蚁群是一个大型的分工合作群落, 所以蚁群可以映射为分布式认知无线网络, 而具有认知功能的认知用户可以假设成为蚂蚁个体, 具备一定的智能。

2) 蚁群中要执行的某项任务映射成分布式认知无线网络中进行切换的目标信道。假设认知用户现在的任务就是去选择一个目标切换信道, 那么当然可以类比成到底是哪个认知用户选择哪个空闲频谱作为目标切换信道。

3) 与任务有关的刺激强度映射成信道的剩余空闲时间。不同的信道上的授权用户活动状态是不相同的, 从而导致不同信道的剩余空闲时间互不相同, 剩余空闲时间越长, 刺激越大, 符合正比关系。

4) 蚁群中的蚂蚁个体对某项任务的反应门限映射成认知用户在不同信道通信所需的传输时间。同一认知用户在不同信道上所需的传输时间是不同的, 同时, 不同的认知用户在同一信道上所需的传输时间也是不同的, 所以这个反映门限是一个可变的门限, 与认知用户和信道都有关系。

因此, 可以根据任务执行概率引入频谱选择概率, 使得认知用户选择合适的频带切换。认知用户的频谱选择概率如下

$$T_{ji} = \frac{T_i^n}{T_i^n + \alpha l_{ji}^n + \beta L_{ij}^n}$$

其中, α 、 β 分别为影响 l_{ji} 和 L_{ij} 的正的常量系数。经过一段时间的观察后, 未来频谱的可用信息可以

通过预测得到, T_i 为信道 i 的空闲剩余时间, l_{ji} 为认知用户 j 在信道 i 上所需的传输时间, L_{ji} 是一个学习因子, 使认知用户学习信道或者遗忘信道, 起到调节的作用。

认知用户按频谱选择概率的大小对不同信道进行排序, 并选择概率最大的信道作为目标切换信道。当环境或者认知用户的传输业务量有任何变化时, 每个认知无线电用户计算频谱选择概率的公式, 使得认知无线电系统很容易适应环境或认知用户需求的即刻变化, 不用控制中心和任何协调就可以实现分布式认知无线网络中动态的频谱选择。

4 主动频谱切换方案

分布式认知无线网络中的主动频谱切换的流程如图 3 所示, 切换中主要包括认知用户初始化、频谱感知、切换频谱判定、执行切换、数据通信等步骤, 以下是具体的主动频谱切换方案。

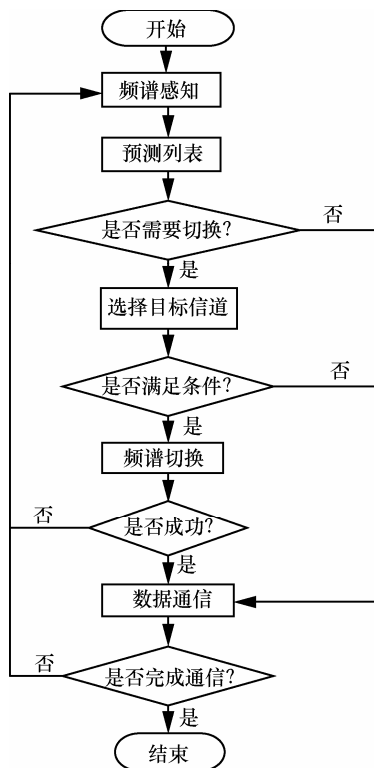


图 3 主动频谱切换算法流程

1) 认知用户初始化

认知用户属于首次接入网络, 其并未对频谱存在任何使用信息, 信道数据库信息初始化为 0, 空

闲信道剩余时间列表和认知用户对不同信道的传输需求时间列表分别初始化为 T_0 和 $CR_j(l_0)$ 。

2) 频谱感知

频谱感知过程包括以下步骤。

①所述认知用户接入信道后, 在感知静默期对本地信道和邻居信道的状态进行频谱感知。

②所述认知用户之间通过控制信道可以共享感知信息, 每个认知用户收集可用频谱的使用信息。

③所述认知用户将所述感知信息与聚集的其他可用频谱的状态信息进行融合处理, 并存储在信道数据库中。

④经历 t_1 时间的观察后, 从信道的角度出发, 认知用户利用信道数据库中的信息建立空闲信道剩余时间列表。

⑤从认知用户的角度出发, 预测同一认知用户在不同信道上所需时长 l_{ji} , 建立认知用户 j 对不同信道 i 的传输需求时长列表。

⑥在每个感知静默期 t_2 , 认知用户根据最新的感知结果更新信道数据库信息。其中, 感知静默期 $t_2 = t_1 + m\Delta t (m = 0, 1, 2, \dots)$, Δt 为认知用户的感知-传输周期 $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$, 认知用户的感知时长 Δt_1 , 传输时长 Δt_2 ; 需要更新不同信道授权用户的空闲时间期望值 $1/\lambda_{OFF}$ 和繁忙时间的期望值 $1/\lambda_{ON}$, 进而更新空闲信道剩余时长列表; 同理, 令 $l_{ji} = l_{ji} - m\Delta t$, 更新认知用户在不同信道的传输需求时间列表。

3) 判断是否切换频谱, 其中, 比较空闲信道剩余时长列表和认知用户 CR_1 对不同信道的传输需求时间列表中对应的项目, 判断本地信道 $l_{ji} - T_i \geq 0$, 若是, 则需要切换, 转至步骤 4); 否则, 转至步骤 6)。

4) 按频谱选择概率从大到小对候选信道进行排序, 选择具有最大频谱选择概率且满足门限值 $T_{ij} > 0.5$ 的信道 i 作为目标切换信道: $i = \arg \max_i T_{ij}$, 其中, T_{ij} 为信道选择概率值, 若存在可用信道 i 满足上述条件, 则进行频谱切换, 转至步骤 5); 否则, 转至步骤 6)。

5) 认知用户根据计算结果执行频谱切换, 其中包括:

①认知用户 CR_1 根据判断结果在下一通信时期切换到目标信道;

②认知用户 CR_1 通过控制信道通知与其通信的 CR_2 切换到相同的信道;

③若切换成功, 令 $L_{ij} = L_{ij} - \varepsilon_1$, 转至步骤 6); 若切换失败, 令 $L_{ij} = L_{ij} + \varepsilon_2$, 转至步骤 2), 其中, ε_1 和 ε_2 分别为学习常数和遗忘常数。

6) 在通信期继续进行数据通信, 经历 Δt_2 判断是否完成通信, 若是, 转至步骤 7); 否则, 返回步骤 2); 其中, Δt_2 为授权用户可容忍的最大干扰长度(认知用户的通信长度)。

7) 一次业务结束, 等待下次业务。

5 仿真分析

假设在分布式认知无线网络中, 存在 2 个认知用户在“租用”的频谱上进行通信。认知用户通过感知信息和历史经验信息建立起授权用户的活动模型, 达到对未来频谱进行预测的目的, 邻居节点可以交互共享其他信道的状态信息。其中 ON/OFF 持续时间的速率参数满足 $[\mu_{\min}, \mu_{\max}]$ 上的均匀分布。本文采用 Matlab 进行仿真, 其中表 2 为仿真所需参数设置, 表 3 为不同切换方法的对比。

表 2 仿真参数设置

参数	值
感知时间	50 ms
传输时间	450 ms
切换时延	50 ms
信道数目	20
授权用户传输模式	$1/\lambda_{\text{ON}}$ 与 $1/\lambda_{\text{OFF}}$ 服从 $[\mu_{\min}, \mu_{\max}]$ 上的均匀分布
仿真时间	10 000 s
信道数量	5~20
认知用户	2~10
梯度	2
学习因子	2
学习常数	0.2
遗忘常数	0.1
常量系数	2
α 、 β	1

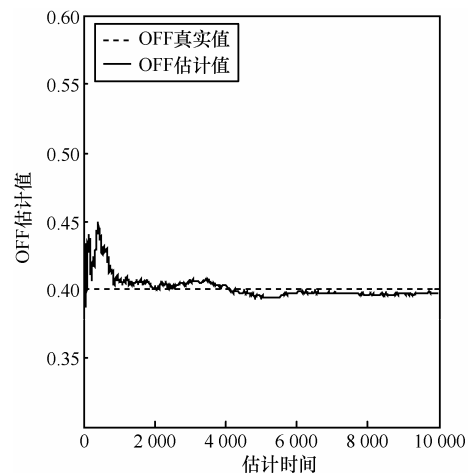
表 3 切换方案对比

切换方法	方案描述
方案 1	提前切换 ($I_{it} - T_i \geq 0$), 选择剩余空闲时间最长的信道
方案 2	提前切换 ($T_i \neq T_{\max}$), 选择剩余空闲时间最长的信道
方案 3	应急切换, 在感知到的空闲信道中随机选择
方案 4	应急切换, 选择空闲概率最大的信道
方案 5(主动频谱切换)	提前切换 ($I_{it} - T_i \geq 0$), 选择频谱选择概率最大的信道

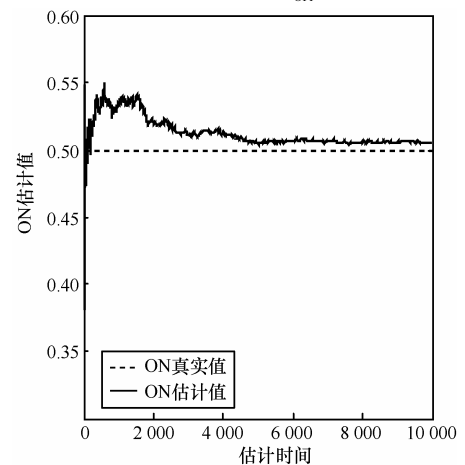
5.1 最大似然估计

首先对速率参数进行最大似然估计, 估计结果将用于后续的方案。

从图 4 中可以看出, 在估计时间开始的阶段, 由于指数分布的无记忆性, 估计值存在较大的抖动, 随着时间的推移, 估计值逐渐收敛到真实值。但是估计值与真实值之间始终存在着一定的误差, 这是由于认知用户感知—传输周期的模式造成的。通过缩短认知用户的感知—传输周期可以适当减少误差, 但是过短的感知—传输周期会造成认知用户工作模式频繁的转换, 给系统带来没有必要的开支, 所以在参数设定上, 本文选定在授权用户可以忍受的范围内, 且开支相对较少的感知—传输周期。通过仿真图和以上分析可以得出, 对速率参数的估计采用最大似然估计合情合理, 且数据源的有效性保证了接下来对预先频谱切换和其他频谱切换算法仿真结果的正确性。



(a) 认知用户对授权用户 λ_{OFF} 的估计值



(b) 认知用户对授权用户 λ_{ON} 的估计值

图 4 认知用户对授权用户 λ_{ON} 、 λ_{OFF} 的估计

5.2 主动频谱切换仿真

把授权用户建立成服从负指数分布的 ON/OFF 模型,假设认知用户在 1 000 s 的时刻接入该分布式认知无线网络中的频段,并采用本文提出的主动频谱切换方案在不同频谱之间进行切换,得以完成固定业务量的传输。如图 5 为认知用户主动频谱切换的示意。

图 5 中显示认知用户运用本文提出的方案在不同信道上进行频谱切换,基本能够按照理论分析的结果在授权用户回来之前进行切换,在第 3 次和第 5 次完成了明智的频谱切换,即切换到了剩余空闲时间更长的信道。

但是遇到授权用户突然回来的状况,认知用户只能进行应急切换,即在感知到授权用户的信号后才能执行切换。这是由于预测模型是对频谱状态的估计,不能完全符合授权用户实际的活动状态。同时由于认知用户感知—传输的工作模式,导致观测到的行为模式滞后于授权用户的真实活动。所以一定范围内的误差是不可避免的,但是应用此算法使得认知用户在通信过程中完成了很好的切换,在尽量不对授权用户产生干扰的情况下基本能够做到智能切换。

5.3 算法性能比较

在仿真中,假设认知用户采用不同的切换机制进行频谱切换,分别比较不同切换方案的性能(如图 6 所示)。采用信道利用率、授权用户干扰率、

认知用户总的通信时间、认知用户的切换次数作为仿真的对比指标。

通过仿真结果可以看出,在信道利用率这个指标上,采用方案 3、4 的认知用户在通信过程中不可避免地会被授权用户的活动打断,导致频谱利用率较低;采用方案 2 的认知用户由于频繁的执行切换,增加了不必要的切换开支,使得频谱利用率相比传统的方案 3、4 而言不升反降,这也是本文研究主动频谱切换的原因。采用主动频谱切换方案的认知用户可以做到在适当的时机提前安排切换,并使得认知用户在目标信道的选择方法上应用了蚁群任务分工算法,实现了认知用户的按需选择,有效通信时间变长,提高了频谱利用率。通信时间与切换次数这 2 个指标有一定的联系,因为本文提出的主动频谱切换方案把不同信道的传输速率各不相同这一点考虑其中,所以在选择目标频谱这一点上,综合考虑了影响认知用户通信的多个指标,使得认知用户在较短的时间内完成固定业务量的传输,切换次数也相应减少。从对授权用户干扰率的仿真图中可以看出,在方案 2 中存在干扰率更低的情形,但结合切换次数参数发现,这是以牺牲切换次数为代价的,折中考虑,还是采用本文提出的主动频谱切换算法的性能更好。

6 结束语

认知无线网络是一种特殊的网络形式,而频

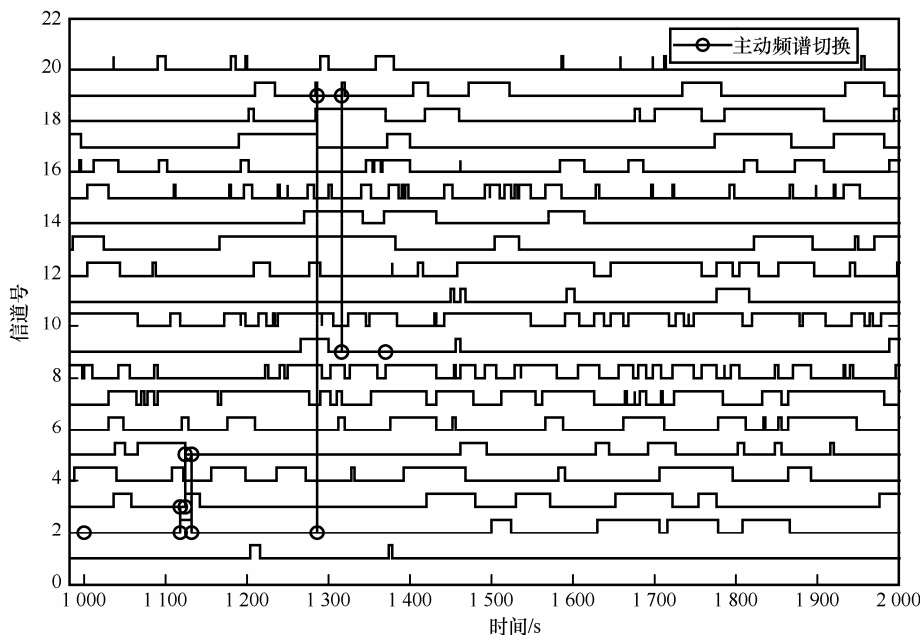


图 5 主动频谱切换示意

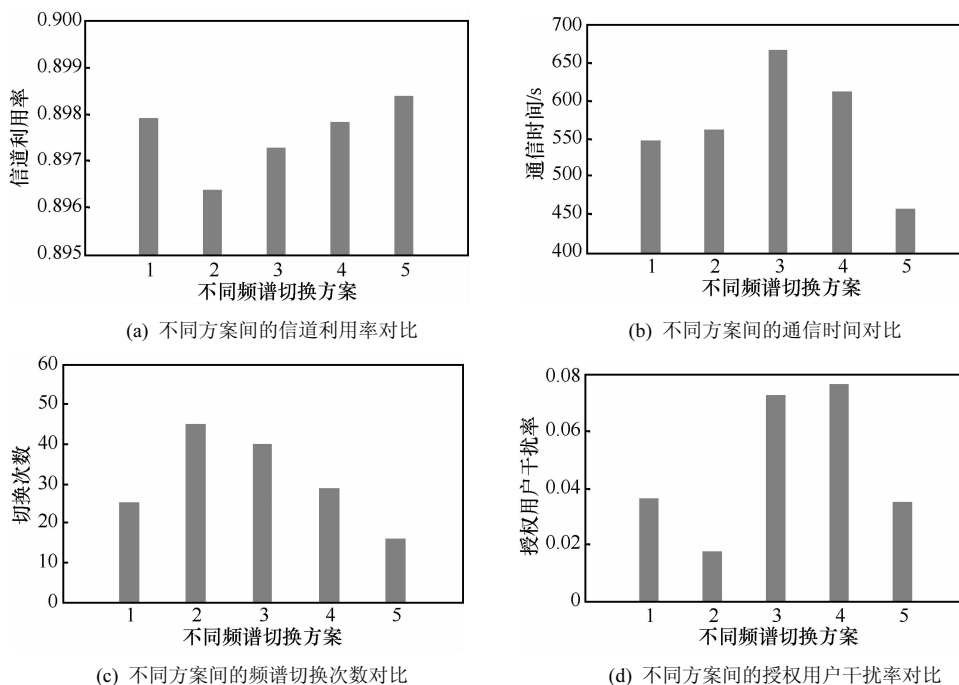


图 6 不同切换方案性能指标对比图

谱切换也是不同于传统网络切换的转换模式。本文对分布式认知无线网络中的频谱切换进行了研究，根据对信道的预测达到切换时间的预判，同时采用基于蚁群任务分工算法的频谱选择算法，提出一种分布式认知无线网络中的主动频谱切换方案，突破传统的频谱切换方法，可以提前切换到适合通信的频段。通过仿真可以看出，本文提出的方案对授权用户干扰较小，提高了信道利用率的同时，大大减少了切换开销。且在频谱选择上的灵活性较高，适用于分布式认知无线网络。

参考文献:

[1] MITOLA J, MAGUIRE G Q, *et al.* Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, (6): 13-18.
 [2] YANG L, CAO L, ZHENG H. Proactive channel access in dynamic spectrum networks[J]. Physical Communication, 2008, 1(2): 103-111.
 [3] WANG L C, ANDERSON C. On the performance of spectrum handoff for link maintenance in cognitive radio[A]. 3rd International Symposium on ISWPC 2008[C]. 2008. 670-674.
 [4] CHRISTIAN I, MOH S, CHUNG I, *et al.* Spectrum mobility in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(6): 114-121.
 [5] KIM H, SHIN K G. Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(5): 533-545.
 [6] YOON S U, EKICI E. Voluntary spectrum handoff: a novel approach to spectrum management in CRNs[A]. 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. 2010.1-5.

[7] ZHANG Y. Dynamic spectrum access in cognitive radio wireless networks[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. 2008.4927-4932.
 [8] SONG Y, XIE J. Common hopping based proactive spectrum handoff in cognitive radio Ad Hoc networks[A]. 2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)[C]. 2010.1-5.
 [9] ATAKAN B, AKAN O B. Biologically-inspired spectrum sharing in cognitive radio networks[A]. Wireless Communications and Networking Conference[C]. 2007.43-48.
 [10] ZHAO Z, PENG Z, ZHENG S, *et al.* Cognitive radio spectrum allocation using evolutionary algorithms[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(9): 4421-4425.

作者简介:



蒋华 (1972-), 女, 湖南益阳人, 空军工程大学副教授, 主要研究方向为网络信息安全。

马立川 (1988-), 男, 山东潍坊人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为无线通信网络安全和信任管理机制。

严定宇 (1990-), 男, 湖南岳阳人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信网络安全。

潘楠 (1987-), 女, 河北承德人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为认知无线网络网络安全。