

瑞利衰落环境中一种能量有效的多无线电信道搜索机制研究

黄川^{①②} 郑宝玉^① 李世唐^②

^①(南京邮电大学信号处理与传输研究院 南京 210003)

^②(福建师范大学数学与计算机科学学院 福州 350007)

摘要: 针对当前频谱搜索机制在能量有效方面的不足, 该文提出了一种在瑞利衰落条件下基于部分可测马尔科夫决策过程(POMDP)的多无线电信道搜索机制 MRCSS。该机制通过对瑞利衰落环境中信道状态建立 POMDP 模型来分析和推导出能效最佳信道, 并以此指导用户的信道选择。仿真结果表明该机制能较传统搜索机制更有效地减少感知时间和节省能耗, 从而达到提高频谱感知性能的目的。

关键词: 频谱感知; 瑞利衰落; 部分可测马尔科夫决策过程; 多无线电

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1193-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00775

Research on Energy Efficient Multi-Radio Channel Searching Scheme in Rayleigh Fading Environment

Huang Chuan^{①②} Zheng Bao-yu^① Li Shi-tang^②

^①(Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(School of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Due to the deficiencies of current schemes in the aspect of energy consumption efficiently, this paper proposes a novel Multi-Radio Channel Searching Scheme (MRCSS) based on Partially Observable Markov Decision Process (POMDP) in rayleigh fading environment. This scheme can obtain the optimum energy-efficient channel through analysis and derivation of channel state and thereby conduct unlicense users' channel selection. The simulation results show the proposed scheme can reduce the searching time and save the energy more efficiently than the classical methods, so as to improve the spectrum sensing performance.

Key words: Spectrum sensing; Rayleigh fading; Partially Observable Markov Decision Process(PDMDP); Multi-radio

1 引言

为了提高无线频谱资源利用率, 在软件无线电基础上发展而来的认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术成为当前研究的热点^[1]。而在作为 CR 技术核心的频谱感知技术(spectrum sensing)中, 如何设计一个快速、可靠和节能的信道搜索机制是频谱感知技术实现的一个关键。当前频谱感知技术中常用的信道搜索机制主要有随机搜索机制(Random Search Scheme, RSS)和串行搜索机制(Serial Search Scheme, SSS)^[2]。然而这两种搜索机制存在以下两方面的问题: 一是由于只配备一个无线电收发器(Radio Transceiver, RT), 使得信道搜索和信号收发必须在同一收发器上进行, 这将造成二者的不断

切换, 从而大大增加了检测时延^[3], 降低频谱感知速度; 二是这两种机制都没有考虑 CR 用户的能耗情况。

针对上述问题, 本文提出了一种针对瑞利衰落环境的基于部分可测马尔科夫决策过程(Partially Observable Markov Decision Processe, POMDP)模型的新型信道搜索机制——多无线电信道搜索机制(Multi-Radio Channel Searching Scheme, MRCSS)。该机制中, 每个 CR 用户节点配备两个 RT^[4], 其中一个具有感知能力, 用于频谱感知以及与认知基站的通信, 称为检测无线电; 而另一个能根据需求调整工作频率, 用于数据传输, 称为传输无线电。通过对信道状态建立 POMDP 模型, 检测无线电根据不同的信道状态进行有效预测, 并以此指导传输无线电的信道选择, 从而达到降低检测时延, 提高能量利用率的目的。

本文余下部分安排为: 第 2 节介绍网络模型的建立; 第 3 节介绍 MRCSS 机制的原理和具体实现

2009-05-22 收到, 2009-12-15 改回

国家自然科学基金(60972039)和江苏省科技厅自然科学基金重大项目(BK2007729)资助课题

通信作者: 黄川 chuanguang@fjnu.edu.cn

步骤;第 4 节通过仿真对比该机制与传统机制的性能;最后对全文进行总结。

2 网络模型

考虑认知无线网络^[5],整个网络由认知基站和 CR 用户节点两部分组成。认知基站主要作用是收集信道状态信息并根据需要将这些信息传送给 CR 用户。由于要考虑信道衰落对传输能耗的影响,因此这里的信道状态信息包括信道忙闲状态信息、信道衰落情况以及相应的状态转移概率等。为了使 CR 用户移动至该网络后,能与认知基站取得连接,假设 CR 用户的检测无线电使用事先定义的通用信道(common channel)与认知基站取得连接,并获取信道状态历史信息 H 。同时为了避免搜索全频段所带来的能耗和时延问题,设检测无线电在每个工作时段中可侦测的信道数为 n 个($1 \leq n < |C|$),其中 C 为网络中可用信道集。相应地,不同的信道具有不同的带宽,故设 $BW_i(i \in C)$ 表示信道 i 的带宽。

2.1 信道模型

在主用户网络中,主用户占用信道的方式总是分时隙的,由此可假设一个信道在不同时隙中被主用户或其他 CR 用户占用的情况是一个 Markov 过程,且在同一时隙内信道的频谱特性不变^[6]。对于 CR 用户来说,信道状态分为信道忙闲状态和信道能耗级别。针对信道忙闲状态,采用两状态 Markov 模型^[6]。设 A 表示信道忙闲状态集合,有 $A = \{0(\text{忙}), 1(\text{空闲})\}$ 。设 $A(t)$ 表示各个信道在时隙 t 内所处的忙闲状态,记为 $A(t) = \lambda_0(t)\lambda_1(t)\cdots\lambda_{C_1}(t)$,其中 $\lambda_i(t)$ ($\lambda_i(t) \in A$) 为信道 $i(i \in C)$ 在时隙 t 中所处的忙闲状态,则 $A(t) \in A^{|C|}$ 。

2.2 能耗模型

在 CR 用户节点能量有限的条件下,除了考虑某个时隙中信道是否可用,还需考虑各个信道不同的衰落级别对 CR 用户传输能耗的影响,且设信道是否已被占用与其所处的衰落级别是相互独立的。假设 CR 用户在时隙 t 开始时刻剩余能量为 $En(t)$,而下一时隙开始时刻为 $En(t+1)$,则 $\Delta En = En(t) - En(t+1)$ 表示时隙 t 内 CR 用户的能耗。CR 用户在一个时隙中能量的消耗 $\Delta En(t)$ 主要包括 3 个部分:(1)CR 用户在休眠状态下的能耗,即当前 CR 用户没有数据需要收发或没有可用信道的情况下所处的状态,这里假设 CR 用户一直都有数据需要发送,从而 $e_{\text{sleep}} = 0$;(2)CR 用户侦测信道的能耗,这里假设 CR 用户侦测每一个信道所需的能耗均为常数 e_{sensing} ;(3)在时隙 t 中 CR 用户在衰落信道上传输数据的能耗,表示为 $e_{tx}(t)$,这里假设 CR 用户的传输速率一定。从而每个时隙内 CR 用户的能

耗为

$$\Delta En(t) = En(t) - En(t+1) = e_{tx}(t) + ne_{\text{sensing}} \quad (1)$$

式(1)中 n 为 CR 用户侦测信道的个数。为了有效地描述瑞利信道的衰落情况,采用文献[7]的方法将信道构建成一阶有限状态 Markov 信道(FSMC)模型。在该模型中,信道衰落情况按照接收到的瞬时信噪比 γ 量化为 $K(K \geq 2)$ 个状态,其中假设量化门限为 $\{\Gamma_k\}$, $k = 0, 1, \dots, K$, 且 $\Gamma_0 = 0$, $\Gamma_K = +\infty$ 。若接收信号的信噪比 γ 满足 $\Gamma_k < \gamma < \Gamma_{k+1}$, 那么此时信道处于第 k 个状态(衰落级别)。相应地,每一个信道衰落级别对应一个能耗级别,即用户在信道上传输数据所需的能耗也分为 K 个级别(级别 $1 > \dots > \text{级别 } K$)。根据 FSMC 模型,可令 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_K\}$ 表示一个 K 状态平稳 Markov 链的状态空间,则对于信道 i , $\{e_i(t), e_i(t) \in E, t = 0, 1, 2, \dots\}$ 为平稳 Markov 过程。而对于时隙 t 中各个信道所处的衰落级别有 $E(t) = e_0(t)e_1(t)\cdots e_{C_1}(t)$, 则 $E(t) \in E^{|C|}$ 。同时采用等概率法^[8]选取信噪比门限,从而使信道停留在某一状态 e_k 的平稳概率 π_k 是相等的,且有

$$p_k = p(e_k) = \pi_k = 1/K, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (2)$$

在 FSMC 模型中, Markov 链的一步转移概率可以通过电平通过率(LCR)来确定^[7]。由此信道状态历史信息 H 包括信道处于忙闲状态的次数和能耗级别划分以及各状态间转移概率。

2.3 POMDP 模型

对于 CR 用户来说,主用户网络环境并不是全部可知的,这里的环境主要指的是主用户网络中所有可用信道的信道状态信息,包括忙闲状态、能耗级别以及带宽、调制和编码方式等。同时由于感知过程中虚警和漏检现象的存在,使得 CR 用户对信道状态的感知结果并不一定准确,从而可能导致 CR 用户在频谱接入判决过程中出错而造成对主用户的干扰和能量的浪费。针对这种未知性和不确定性,结合上述模型,采用 POMDP 模型建立 CR 用户信道预测模型以指导其进行信道选择。

POMDP 模型是对 Markov 决策过程(Markov Decision Program, MDP)模型的推广和延伸^[9]。一个典型 POMDP 模型可用 6 元组表示为 $\langle S, A, T, R, Z, O \rangle$ 。本文中 S 为系统中有限信道状态集合,包括信道忙闲状态和能耗级别,有 $S = \{(\lambda, e), \lambda \in A^{|C|}, e \in E^{|C|}\}$, 而对于时隙 t , 有 $S(t) = s_1(t)\cdots s_{C_1}(t)$, 其中 $s_i(t)$ 表示信道 i 在时隙 t 内所处的信道状态,则 $s_i(t) = (\lambda_i(t), e_i(t))$; A 为 CR 用户对可用信道采取的有限行为的集合,有 $A = \{a_1(\text{不搜索}), a_2(\text{搜索})\}$; T 表示信道忙闲状态转移函数,记为 $T(s, a, s')$, 其表

达式如式(3)所示; R 为瞬时收益函数, 用 $R(s, a)$ 表示; Z 为用户对信道状态的有限观测状态集合, 相应地包括信道忙闲状态和能耗级别, 记为 (Z_A, Z_E) ; O 为观测函数, 记为 $O(s', a, z)$, 表示在当信道状态更新后 CR 用户观测到的信道状态, 其表达式如式(4)所示。

$$T(s, a, s') = \Pr(S(t+1) = s' | S(t) = s, A(t) = a) \quad (3)$$

$$O(s', a, z) = \Pr(Z(t+1) = z | S(t+1) = s', A(t) = a) \quad (4)$$

由于信道忙闲状态与能耗级别是相互独立的, 故式(3), 式(4)可变为

$$\begin{aligned} T(s, a, s') &= T(\lambda, a, \lambda')T(e, a, e') \\ &= \Pr(A(t+1) = \lambda' | A(t) = \lambda, A(t) = a) \\ &\quad \cdot \Pr(E(t+1) = e' | E(t) = e, A(t) = a) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} O(s', a, z) &= O(\lambda', a, z_{\lambda'})O(e', a, z_{e'}) \\ &= \Pr(Z_A(t+1) = z_{\lambda'} | A(t+1) = \lambda', A(t) = a) \\ &\quad \cdot \Pr(Z_E(t+1) = z_{e'} | E(t+1) = e', A(t) = a) \end{aligned} \quad (6)$$

上式中 $\lambda, \lambda' \in A^{C|}$, $e, e' \in E^{C|}$ 。如前所述, 主用户网络中各个可用信道的实际状态对于 CR 用户来说是未知的, 必须通过感知检测来获取, 但又存在着不确定性, 故可采用信念状态(belief status)空间 B 来表示信道状态的概率分布, 且有

$$B = \left\{ b : \sum_{s \in S} b(s) = 1.0, b(s) \geq 0, s \in S \right\} \quad (7)$$

其中 $b(s)$ 表示信道处于状态 s 的概率, 且 $b(s) = b(\lambda, e)$ 。由于信道忙闲状态与能耗状态是相互独立的, 故有 $b(s) = b(\lambda)b(e)$ 。根据 Bayes 法则得在 $t+1$ 时隙信念状态更新的表达式:

$$\begin{aligned} b_{t+1}(s) &\triangleq \tau(b_{t+1}, a_t, z_{t+1}) \\ &= \frac{O(\lambda', a, z_{\lambda'}) \sum_{\lambda \in A} T(\lambda, a, \lambda') b_t(\lambda)}{\sum_{\lambda \in A} O(\lambda', a, z_{\lambda'}) \sum_{\lambda \in A} T(\lambda, a, \lambda') b_t(\lambda)} \\ &\quad \cdot \frac{O(e', a, z_{e'}) \sum_{e \in E} T(e, a, e') b_t(e)}{\sum_{e \in E} O(e', a, z_{e'}) \sum_{e \in E} T(e, a, e') b_t(e)} \end{aligned} \quad (8)$$

对于任意时隙 t , 信念状态是一个充分统计量^[10]。由于是多信道环境, 则 CR 用户需要根据当前时隙频谱侦测的结果来推断下一时隙各个信道的情况, 从而为下一时隙选择出最佳信道以供工作无线电使用, 即选择该信道在下一时隙能得到最大瞬时收益, 因此有

$$c^* = \arg \max_{c \in C} R_c(b_t, a_t) \quad (9)$$

其中 $R_c(b_t, a_t)$ 为信道 c 在时隙 t 内得到的瞬时收益。CR 用户总是希望能消耗最少的能量而获得最大的带宽收益, 因此有如下定义:

定义 信道 c 在时隙 t 内得到的瞬时收益 $R_c(b_t, a_t)$ 为该时隙中 CR 用户消耗每单位能量所获得的信道带宽, 且有

$$R_c(b_t, a_t) = \frac{b(\lambda_c(t) = 1)BW_c}{b(e_c(t) = e_k)e_k + n_s e_s} \quad (10)$$

式(10)中 $n_s (n_s \leq n)$ 为感知无线电在一个时隙内感知侦测到信道的数目。在 POMDP 模型中, 策略 π 指的是从信念空间 B 到行为空间 A 的映射。而本文中策略 π 表示 CR 用户在当前信道信念状态情况下针对不同信道采取不同行为所获得的瞬时收益。进一步来说, CR 用户总是希望能在有限时隙 T 内所获得的累积收益期望最大, 即存在最佳策略 π^* :

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} E_{\pi} \left[\sum_{t=1}^T R_c(b_t, a_t) \right] \quad (11)$$

在 POMDP 模型中, 执行策略 π^* 而获得的最佳期望累积收益可用值函数 $V^*(b)$ 表示为

$$\begin{aligned} V^*(b_{t+1}) &= \max_{c \in C} \left[R_c(b_t, a_t) + \sum_{z_{t+1} \in Z} \Pr(z_{t+1} | b_t, a_t) V^* \right. \\ &\quad \left. \cdot (\tau(b_{t+2}, a_{t+1}, z_{t+1})) \right], \quad t = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\Pr(z_{t+1} | b_t, a_t)$ 为信念状态转移概率, 有

$$\Pr(z_{t+1} | b_t, a_t) = \sum_{s \in S} O(s', a_t, z_{t+1}) \sum_{s \in S} T(s, a_t, s') b(s) \quad (13)$$

3 MRCSS 机制

为了达到 CR 用户消耗最少的能量而获得最大的带宽回报的目标, 本文基于上述 POMDP 模型提出一种旨在能耗有效的动态信道搜索机制——多无线电信道搜索机制 MRCSS。下面将具体描述该机制的操作过程。

首先, 可用信道信念状态空间 B 是 $2^{C|} \times K^{C|}$ 维的, 因此要计算出最大收益是很困难的, 但针对信道是独立同分布的情况, 可得如下定理。

定理 假设 n 个独立同分布信道, 有 $\Psi(t) = [\psi_1(t), \dots, \psi_n(t)]$, 其中 $\psi_i(t)$ 为信道 i 在某个时隙 t 开始时刻所处的状态, 且有 $\psi_i(t) = (\lambda_i(t), e_i(t))$, 则 Ψ 是信道状态 S 的充分统计量。

证明略。

根据上述定理, POMDP 模型中信念状态空间 $B = \{b(S(t)), t=1, \dots, T\}$ 可简化为 $B = \{b(s_k(t)), k=1, \dots, n, t=1, \dots, T\}$, 从而信念空间维度由 $2^n \times K^n$ 降为 $n \times n$, 从而大大降低了机制的计算复杂度。

如前所述, 由认知基站根据对信道状态的长时间观测来获得信道状态历史信息 H , 从而计算出信道状态的初始分布。根据能耗模型, 认知基站采用

等概率法来取得信道能耗状态的初始分布。而对于信道忙闲状态初始分布, 可设 θ_i 为在某个时隙 t 内信道 i 状态为空闲的概率, 即 $b(\lambda_i(t) = 1) = \theta_i$, 而状态为忙的概率为 $b(\lambda_i(t) = 0) = 1 - \theta_i$, 则在 T 个时隙中, 信道 i 状态为空闲出现次数为 γ_i , 且服从二项式分布 $b(\gamma_i; T, \theta_i)$, 其中 γ_i 可从信道状态历史信息 H 中获得。根据 Bayes 法则, 有 θ_i 对 h 的条件概率密度为

$$f(\theta_i | h) = \frac{q(\theta_i) \binom{T}{\gamma_i} \theta_i^{\gamma_i} (1 - \theta_i)^{T - \gamma_i}}{\int_0^1 q(\theta_i) \binom{T}{\gamma_i} \theta_i^{\gamma_i} (1 - \theta_i)^{T - \gamma_i} d\theta_i} \quad (14)$$

其中 $q(\theta_i)$ 为 θ_i 的先验分布。对于 CR 用户来说, 信道 i 处于空闲或忙状态是等可能的, 故先验分布 $q(\theta_i)$ 为 $[0, 1]$ 上的均匀分布, 则有

$$f(\theta_i | h) = \frac{\theta_i^{\gamma_i} (1 - \theta_i)^{T - \gamma_i}}{\int_0^1 \theta_i^{\gamma_i} (1 - \theta_i)^{T - \gamma_i} d\theta_i} \quad (15)$$

用 θ_i 对 h 的条件期望 $E\{\theta_i | h\}$ 来估计信道状态为空闲的概率为

$$b(\lambda_i(t) = 1) = E\{\theta_i | h\} = \frac{\gamma_i + 1}{T + 2} \quad (16)$$

由于信念空间的定义可知 $b(\lambda_i(t) = 0) = (T - \gamma_i + 1)/(T + 2)$ 。从而可得对信道信念状态初始分布的估计。

同样根据信道状态历史信息 H , 可以估计出信道忙闲状态的转移概率。设 $p_i^{\lambda\lambda'}$ 为信道 i 的忙闲状态从 λ 转移到 λ' 的转移概率, 则有向量 $\mathbf{P}_i = (p_i^{\lambda\lambda'}, \lambda, \lambda' \in A)$ 。相应地, 在 T 个时隙中信道 i 的忙闲状态从 λ 到 λ' 的转移次数向量为 $\phi_i = (\phi_i^{\lambda\lambda'}, \lambda, \lambda' \in A)$ 。针对不确定环境中多项式参数的转移概率, \mathbf{P}_i 服从 Dirichlet 分布^[11], 有 $(p_i^{\lambda\lambda_1}, \dots, p_i^{\lambda\lambda_{|A|}}) \sim \text{Dir}(\phi_i^{\lambda\lambda_1}, \dots, \phi_i^{\lambda\lambda_{|A|}})$ 。则用该分布的期望值估计信道 i 忙闲状态的转移概率, 其表达式为

$$T_i(\lambda, a, \lambda') = E(P_i) = \frac{\phi_i^{\lambda\lambda'}}{\sum_{\lambda'' \in A} \phi_i^{\lambda\lambda''}} \quad (17)$$

当信道状态转移后, 转移次数向量 ϕ_i 更新为 $\phi_i^{\lambda\lambda'} = \phi_i^{\lambda\lambda'} + 1$, 其余不变。

$$\tau(\lambda, a, z_{\lambda'}) = \begin{cases} \frac{p_d [p_{00}^a b(\lambda = 0) + p_{10}^a b(\lambda = 1)]}{p_d [p_{00}^a b(\lambda = 0) + p_{10}^a b(\lambda = 1)] + p_f [p_{01}^a b(\lambda = 0) + p_{11}^a b(\lambda = 1)]}, & z_{\lambda'} = \lambda' = 0 \\ \frac{(1 - p_f) [p_{01}^a b(\lambda = 0) + p_{11}^a b(\lambda = 1)]}{(1 - p_d) [p_{00}^a b(\lambda = 0) + p_{10}^a b(\lambda = 1)] + (1 - p_f) [p_{01}^a b(\lambda = 0) + p_{11}^a b(\lambda = 1)]}, & z_{\lambda'} = \lambda' = 1 \\ \frac{p_f [p_{01}^a b(\lambda = 0) + p_{11}^a b(\lambda = 1)]}{p_d [p_{00}^a b(\lambda = 0) + p_{10}^a b(\lambda = 1)] + p_f [p_{01}^a b(\lambda = 0) + p_{11}^a b(\lambda = 1)]}, & z_{\lambda'} = 0, \lambda' = 1 \\ \frac{(1 - p_d) [p_{00}^a b(\lambda = 0) + p_{10}^a b(\lambda = 1)]}{(1 - p_d) [p_{00}^a b(\lambda = 0) + p_{10}^a b(\lambda = 1)] + (1 - p_f) [p_{01}^a b(\lambda = 0) + p_{11}^a b(\lambda = 1)]}, & z_{\lambda'} = 1, \lambda' = 0 \end{cases} \quad (22)$$

考虑到对信道忙闲状态检测的时延问题, 采用具有简单快速特性的能量检测方法^[6]来检测信道。同时考虑是在瑞利衰落信道环境中, 故其平均检测率 p_d 和虚警率 p_f 分别为^[12]

$$p_d = e^{-\frac{\lambda}{2\sigma^2}} \sum_{i=0}^{N/2-2} \frac{\left(\frac{\lambda}{2\sigma^2}\right)^i}{i!} + \left(\frac{2\sigma^2 + a\bar{\gamma}}{a\bar{\gamma}}\right)^{N/2-1} \cdot \left[e^{-\frac{\lambda}{2\sigma^2 + a\bar{\gamma}}} - e^{-\frac{\lambda}{2\sigma^2}} \sum_{i=0}^{N/2-2} \frac{\left(\frac{\lambda a \bar{\gamma}}{2\sigma^2(2\sigma^2 + a\bar{\gamma})}\right)^i}{i!} \right] \quad (18)$$

$$p_f = \frac{\Gamma\left(\frac{N}{2}, \frac{\lambda}{2\sigma^2}\right)}{\Gamma(N/2)} \quad (19)$$

其中 λ 为信噪比检测门限, N 为样本总数, $\bar{\gamma}$ 为平均信噪比。 $\Gamma(\cdot)$, $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 分别为完全与非完全 Gamma 分布。由于 CR 用户对信道忙闲状态的观测存在着不确定性, 从而观测概率 $O(\lambda', a, z_{\lambda'})$ 为

$$O(\lambda', a, z_{\lambda'}) = \Pr(z_{\lambda'} | \lambda', a) = \begin{cases} p_d & z_{\lambda'} = 0, \lambda' = 0 \\ p_f & z_{\lambda'} = 0, \lambda' = 1 \\ 1 - p_d & z_{\lambda'} = 1, \lambda' = 0 \\ 1 - p_f & z_{\lambda'} = 1, \lambda' = 1 \end{cases} \quad (20)$$

由此, 信道忙闲状态信念转移概率为

$$\Pr(z_{t+1} = z_{\lambda'} | b(\lambda(t) = \lambda), a_t) = \sum_{\lambda' \in A} O(\lambda', a_t, z_{\lambda'}) \sum_{\lambda \in A} T(\lambda, a_t, \lambda') b(\lambda(t) = \lambda) = \begin{cases} p_d [p_{00}^a b(\lambda = 0) + p_{10}^a b(\lambda = 1)] + p_f [p_{01}^a b(\lambda = 0) + p_{11}^a b(\lambda = 1)], & z_{\lambda'} = 0 \\ (1 - p_d) [p_{00}^a b(\lambda = 0) + p_{10}^a b(\lambda = 1)] + (1 - p_f) [p_{01}^a b(\lambda = 0) + p_{11}^a b(\lambda = 1)], & z_{\lambda'} = 1 \end{cases} \quad (21)$$

其中 $p_{\lambda\lambda'}^a$ 为信道忙闲状态的转移概率 $T(\lambda, a, \lambda')$ 。根据式(21)可推得信道忙闲状态信念状态的更新表达式为

根据能耗模型, 若当前时隙信道 i 所处能耗级别为 e_k , 则下一时隙信道最可能处于的能耗级别的概率为

$$p(e_i(t+1)) = p(e_i(t) = e_k) \cdot \max(p_{k,k-1}, p_{k,k}, p_{k,k+1}) \quad (23)$$

由此可得下一时隙的最佳信道, 即收益最大的信道为

$$c^* = \arg \max_{c \in C} R_c(b, a, e) \\ = \arg \max_{c \in C} \frac{b_c(\lambda' = 1)BW_c}{p(e_c(t+1))e_c(t+1) + n_s e_s} \quad (24)$$

CR 用户根据式(24)得到的下一时隙最佳信道 c^* 调整传输无线电到该频段上以用于下一时隙的数据传输。

4 仿真及性能分析

首先采用 Jake 模型产生瑞利衰落数据, 其参数设置为: 最大多普勒频移为 $f_m = 10$ Hz; 信息比特速率为 9.6 kbps, 采用 QPSK 调制方法, 故符号传输速率为 4.8 kbps; 信道衰落状态数 $K=8$, 则信道停留在某一状态的平稳概率为 $p_k = 0.125$, 从而各状态 SNR 门限值和各个状态之间转移概率如表 1 所示。

在表 1 中, 各个衰落状态间转移概率的理论值和仿真数据是相近的, 这与文献[7]的结果是相近的。同时根据各状态 SNR 门限设能耗级别相应为 $E = \{e_k = k, k=1, 2, \dots, K\}$, 其中 $e_k = k$ 表示信道处于第 k 个能耗级别, 且该级别的能耗为 k 个单位。设用户搜索一个信道所需的能耗为 $e_s = 0.3$ 个单位。设慢衰落环境中平均检测率 $p_d = 0.9$, 则漏检率 p_m 为 0.1, 且设参数 $\sigma^2 = 1$, $a = 2$, $N = 5$, $\bar{\gamma}$ 为 10 dB, 则可得到虚警率 $p_f = 0.0033$ 。

根据上述 Jake 模型生成 $|C|$ 个瑞利衰落信道, 然后根据二项式分布生成信道忙闲状态, 接着推出能耗级别转移概率, 信道忙闲状态初始分布和信道忙闲状态转移概率。最后采用这些参数更新信念状态, 并计算得到瞬时收益最大的信道。同时改进 RSS 和 SSS 机制, 允许 RSS 机制在每个时隙中可随机检测 n 个信道, 称为 n 步随机搜索机制(n -Step

Random Search Scheme, n SRSS); 而 SSS 机制在每个时隙中也可按信道序号检测 n 个信道, 称为 n 步串行搜索机制(n -Step Serial Search Scheme, n SSSS)。仿真共进行 10000 次, 结果取其平均值。

设网络中可用信道数 $|C|=12$, 节点每个时隙中可侦测的信道 $n=3$, 并设每个信道的带宽均为 1 Mbps。图 1 为经过 30 个时隙后 3 种机制的累积收益。从图中可看出, 在第 30 个时隙中, MRCSS 机制的累积收益相较于 n SRSS 和 n SSSS 机制有约 50% 提高, 而后两种机制的累积收益相近, 由此说明随着时隙的增加, 相较于传统搜索机制, MRCSS 机制能使用较少的能耗代价而获得较大的信道带宽, 从而提高信道搜索的能耗有效性。图 2 表明在无线环境中当可用信道数增加时 ($|C|=3, 12, 20$), MRCSS 机制所获得的累积收益也相应的增加, 从而说明该机制能更好适应于多信道环境。

图 3 为不同搜索信道能耗条件下 3 种机制性能的对比。从图中可看出, 由于搜索信道能耗的增加, 从而导致累积收益的降低, 这表明虽然在每个时隙中用户总是希望能搜索尽可能多的信道以获得较完全的信道状态信息, 但是这样做导致用户可能还没有找到合适信道就耗光能量。图 4 为在信道具有不同带宽的情况下 3 种机制的性能对比。图中的相同带宽指的是每个信道带宽仍为 1 Mbps, 而不同带宽指的是 $|C|=12$ 个信道其带宽分别为 1~12 Mbps (步长为 1), 同时所需传输数据分别为 10、30、50、80 和 100 Mb。图中当信道带宽相同时, MRCSS 机制传输完成 100 M 的数据总共需要平均 104.75 个时隙, 而 n SRSS 和 n SSSS 机制分别需要 187.1 和 188.65 个时隙; 而当信道带宽不同时, MRCSS 机制仅需要 12.56 个时隙, n SRSS 和 n SSSS 机制则分别需要 27.61 和 29.62 个时隙。该图表明无论各个信道的带宽是否相同, 用户采用 MRCSS 机制来传输完指定数据量所需的时隙数都要明显低于 n SRSS 和 n SSSS 机制, 从而说明 MRCSS 机制比传统信道搜索机制能更有效地降低时间消耗。

表 1 SNR 门限值和各状态间转移概率

	理论值			仿真值		
	$p_{k,k-1}$	$p_{k,k}$	$p_{k,k+1}$	$p_{k,k-1}$	$p_{k,k}$	$p_{k,k+1}$
$\Gamma_0 = 0$	—	0.9933	0.0067	—	0.9958	0.0042
$\Gamma_1 = 1.3097$	0.0067	0.9849	0.0084	0.0042	0.9883	0.0075
$\Gamma_2 = 2.8216$	0.0084	0.9826	0.0090	0.0067	0.9850	0.0083
$\Gamma_3 = 4.6099$	0.0090	0.9824	0.0087	0.0075	0.9833	0.0092
$\Gamma_4 = 6.7985$	0.0087	0.9835	0.0078	0.0083	0.9833	0.0083
$\Gamma_5 = 9.6202$	0.0078	0.9861	0.0061	0.0075	0.9875	0.0050
$\Gamma_6 = 13.5970$	0.0061	0.9901	0.0038	0.0050	0.9917	0.0033
$\Gamma_7 = 20.3956$	0.0038	0.9962	—	0.0033	0.9967	—

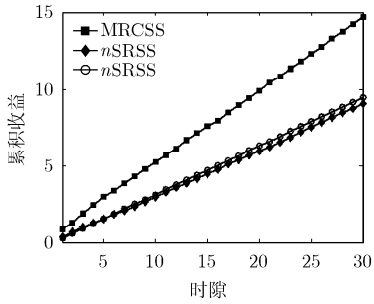


图 1 3 种机制性能对比

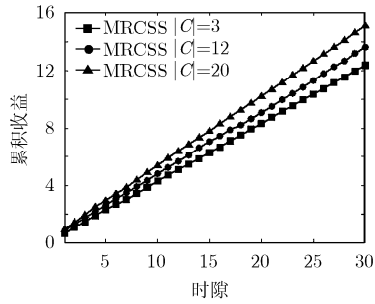


图 2 不同|C|情况下 MRCSS 性能对比

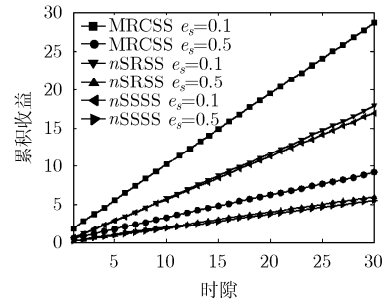


图 3 不同检测能耗情况下的对比

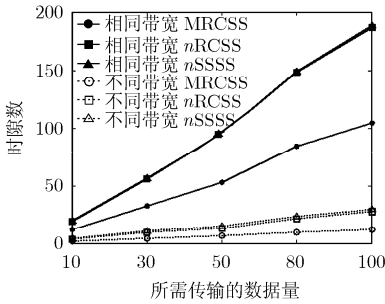


图 4 相同带宽和不同带宽情况下的比较

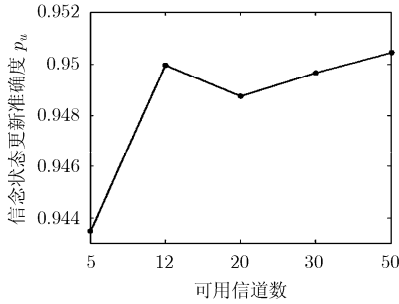


图 5 信道数目不同情况下 p_u 值

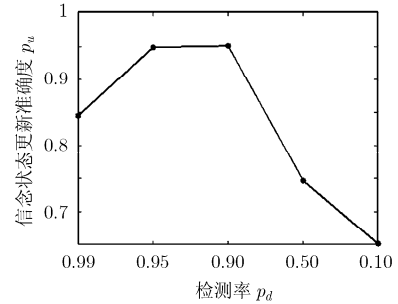


图 6 检测率不同情况下 p_u 值

图 5 和图 6 表明在不同可用信道数和检测率 p_d 的情况下，信念状态更新后用户判断下一时隙信道忙闲状态的准确性，这里称为信念状态更新准确度，用 p_u 表示。从图 5 可看出，随着可用信道数目增加， p_u 也略有增加(从约 0.94 到约 0.95)，从而进一步说明 MRCSS 机制更能适应于多信道的无线环境。通常情况下，检测率升高，虚警率也会随之升高，因此如图 6 所示，当检测率 p_d 为 0.99 时，虚警率可达到 0.2969，而此时信念状态更新准确度 p_u 仅为 0.8489；而当 p_d 为 0.95 和 0.90 时， p_u 可达到约为 0.95；而后随着 p_d 的降低， p_u 也随之降低。由此说明如何取得检测率和虚警率的一个折中对于信念状态更新后用户对信道忙闲状态判断的准确性有着极大的影响。

5 总结

一个快速、可靠和节能的信道搜索机制是衡量一个认知无线电系统性能优劣的关键所在。本文针对瑞利衰落环境，提出了一种基于 POMDP 模型的多无线信道搜索机制 MRCSS。该机制通过对信道状态建立 POMDP 模型来预测下一时隙可使用的最佳信道，从而使得 CR 用户能以最小的能耗代价来获取最大的信道带宽。仿真表明 MRCSS 机制的性能，包括检测时延和能量利用率，都较传统的 nSRSS 和 nSSSS 机制的性能有较大的改善。考虑到每个时隙中可搜索的信道数目对信道搜索机制性能的影响，如何根据具体环境设计自适应搜索信道数

是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] Mitola J III. Cognitive radio architecture evolution [J]. *Proceeding of the IEEE*, 2009, 97(4): 626-641.
- [2] Luo L and Roy S. Analysis of search schemes in cognitive radio [C]. *IEEE 4th Annual Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad hoc Communications and Networks (SECON)*, San Diego, USA, June 18-21, 2007: 647-654.
- [3] TCI 8067 Spectrum Processor Data Specification. Webpage: <http://www.tcibr.com/PDFs/8067webs.pdf>, 2000.
- [4] Hou Y T, Shi Y, and Sherali H D. Spectrum sharing for multi-hop networking with cognitive radios [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1): 146-155.
- [5] Akyildiz I F, Lee W Y, and Chowdhury K R. CRAHNs: Cognitive radio Ad hoc networks [J]. *Ad hoc Networks*, Elsevier, 2009, 7(5): 810-836.
- [6] Zhao Q, Tong L, and Swami A, et al. Decentralized cognitive mac for opportunistic spectrum access in Ad hoc networks: A POMDP framework[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(3): 589-600.
- [7] Wang H S and Moayeri N. Finite-state markov channel — A useful model for radio communication channels [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1995, 44(1): 163-171.
- [8] Wang H S and Chang P C. On verifying the first-order markovian assumption for rayleigh fading channel [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1996, 45(2): 353-357.

- [9] Kaelbling L P, Littman M L, and Cassandra A R. Planning and acting in partially observable stochastic domains [J]. *Artificial Intelligence, Elsevier*, 1998, 101(1): 99-134.
- [10] Smallwood R and Sondik E. The Optimal Control of Partially Observable Markov Processes over a Finite Horizon. *Operations Research* [M]. Maryland: INFORMS, 1971: 1071-1088.
- [11] Stephane Ross, Joelle Pineau, and Sebastien Paquet, *et al.* Online planning algorithms for POMDPs [J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2008, 32(1): 663-704.
- [12] Digham F F, Alouini M S, and Simon M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(1): 21-24.
- 黄 川: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为无线网络与通信信号处理.
- 郑宝玉: 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线网络与通信信号处理、智能信号处理、量子信息处理等.
- 李世唐: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为网络编码、信息论等.