

文章编号: 2095-4980(2015)01-0057-07

基于业务请求数据包长度的机会频谱接入算法

赵 彪^{1,2}

(1.信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2.国防信息学院 二系, 湖北 武汉 430001)

摘 要: 针对非时隙主用户网络, 研究了单个次用户在周期性感知框架下的机会频谱接入问题。通过建立次用户信道感知和接入模型, 提出了一种基于次用户请求业务数据包长度的机会频谱接入算法。该算法根据每个时隙分配给次用户业务数据包长度, 自适应调整机会频谱接入策略。仿真结果表明, 所提算法能够在干扰水平要求较高情况下, 提高次用户平均有效传输吞吐量的同时, 实现有效吞吐量与碰撞概率的折中; 同时当外部环境发生变化时算法具有较强的鲁棒性。

关键词: 机会频谱接入; 周期性感知; 请求数据包长度; 有效传输吞吐量; 碰撞概率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201501.0057

An opportunistic spectrum access algorithm based on request data packet length

ZHAO Biao^{1,2}

(1.Department of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China;
2.Department No.2, Academy of National Defense Information, Wuhan Hubei 430001, China)

Abstract: Opportunistic spectrum access for a single secondary user under periodic sensing framework is analyzed aiming for the unslotted primary user network. By constructing the secondary user channel sense and access model, an opportunistic spectrum access algorithm based on user request data packet length is proposed. The proposed algorithm could automatically modify the strategy of opportunistic spectrum access according to the service data packet length allocated by each slot. Experiment results show that the proposed algorithm can enhance the secondary users expect effective throughput under the condition of tight interference, and realize the tradeoff between effective throughput and collision probability. It behaves strong robustness against the exotic environment changes.

Key words: opportunistic spectrum access; periodic sensing; request data packet length; effective throughput; collision probability

无线业务的爆炸性增长使得如今无线通信系统不得不对频谱资源的严重匮乏, 6 GHz 以下的频谱资源已经分配殆尽^[1]。然而, 来自美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)调查报告及相关研究者的实际测量表明, 分配给授权用户的频谱资源在空间和时间上利用率较低^[2], 基于认知无线电的机会频谱接入技术(Opportunistic Spectrum Access, OSA)为缓解资源匮乏与浪费现象之间的矛盾提供了有力的技术支撑^[3]。近年来, OSA 的研究已在学术界受到高度重视, 在 OSA 系统中通常包含多个信道, 其关键是联合优化信道的感知和接入策略。然而在对主用户的碰撞干扰限制在一定水平之下, 联合优化感知和接入策略比较困难。主要难点有: a) 平行感知策略中, 每一个时隙中选择哪一个信道感知和接入; b) 在顺序感知框架下如何决定感知顺序以及控制感知过程实现传输碰撞、感知代价与期望回报之间的折中。针对以上 2 个难题, 相关理论决策框架已被广泛研究。根据应用场景不同, 有主要用来解决多用户系统中用户间相互干扰问题的博弈论模型^[4-5]、马尔科夫环境下, 用于多周期连续决策的马尔科夫决策模型^[6-7]以及解决未知环境先验知识条件下, 机会频谱接入问题的多臂赌博机模型^[8-9]。本文针对单个次用户在干扰受限下的频谱接入问题, 采用连续时间马尔科夫模型建模主用户的频谱占用情况。在非时隙主用户模型中, 由于主用户可以在任意时刻接入信道, 次用户在传输过程中, 如何在减少对主用户的干扰和提高自身的通信质量之间取得折中, 正受到研究者的广泛关注。文献[10]首次提出周期性信道感知策略, 在周期性感知框架下, 文中将主用户到达过程建模为连续时间马尔科夫过程, 文中以最大化吞吐量为

收稿日期: 2014-01-02; 修回日期: 2014-02-19

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目(2012AA711); 国家科技重大专项基金资助项目(2008ZX03006)

目标, 将干扰水平受限下的部分可观测马尔科夫决策(Partially Observable Markov Decision Process, POMDP)问题转化为有限状态下的马尔科夫决策过程, 最终将其转化为线性优化问题。在此基础之上, 文献[11]证明了文献[10]中无记忆启发式接入算法(Opportunistic Spectrum Access-Memoryless Access, OSA-MA)在干扰限制条件下的最优性。但两者均没有考虑次用户业务长度对算法性能的影响。基于次用户业务请求时长的机会频谱接入算法也有相关文献做了研究, 其中文献[12]基于次用户业务请求长度, 研究了多个次用户系统中的信道分配问题(下文称“严格约束”算法)。已知当前业务数据包请求时长, 在干扰水平要求较高条件下, 各个次用户从所有满足请求时长的信道中依次选择信道接入, 其判断是否接入信道的条件是: 业务包请求传输时间是否小于在该干扰水平下信道所能提供的最大传输时间。然而, 首先其假设认知用户在参与分配信道之前, 所有信道的空闲信息已经完全已知, 实际上在能量和硬件等条件的限制下, 认知用户每次只能感知一个信道并选择接入, 其他信道的空闲信息不能完全已知; 其次判断信道接入条件的保守性, 使得当数据包长度较大时, 接入机会明显降低, 造成吞吐量的下降。在以上文献的启发下, 借鉴有效传输容量^[13]思想, 本文引入了有效传输吞吐量作为评估指标, 用连续时间马尔科夫过程建模分析次用户的感知接入过程, 提出了基于次用户业务请求时长的机会频谱接入算法。算法在满足对主用户碰撞概率约束的条件下, 根据每个时隙分配给次用户业务数据包长度, 自适应调整机会频谱接入策略; 通过与“OSA-MA”算法以及“严格约束”算法对比, 本文算法能够实现有效传输吞吐量和碰撞概率之间的折中, 同时验证了算法对于外部环境的变化具有较好的鲁棒性。

1 系统模型与假设

1.1 主用户网络

本文中考虑主用户网络中包含 N 个相互独立、互不干扰的正交频段, 记为 $I=\{0,1,2,\dots,N-1\}$, 其信道带宽记为 B_i , $i \in I$, 各信道的传输信噪比 R_{SNi} , 主用户对信道的占用规律采用 ON-OFF 模型, $S_i=0$ 表示信道空闲, $S_i=1$ 表示信道被占用, 且其信道忙闲状态服从连续时间两状态的马尔科夫链, 停留 2 种状态的时间间隔分别服从参数为 λ_i^{-1} 和 μ_i^{-1} 的指数分布; 主用户网络采用非时隙传输结构, 即主用户可在任何时刻接入信道, 一旦主用户进入次用户正在传输的信道, 次用户立即中断传输, 切换到其他信道通信, 则授权频谱空闲时长的概率密度可表示为:

$$f_i(t) = \begin{cases} \lambda_i e^{-\lambda_i t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (\lambda_i > 0) \quad (1)$$

则由公式(1)知, 授权信道空闲时长大于一定时间 t_x 的概率为:

$$p_i(t \geq t_x) = \int_{t_x}^{+\infty} f_i(t) dt = e^{-\lambda_i t_x} \quad (2)$$

1.2 次用户感知接入模型

周期性感知框架见图 1, 一个时隙分为感知时间 τ 和传输时间 $T-\tau$, 次用户逐时隙感知信道, 且由于硬件条件的限制, 次用户每次只感知和修正当前信道状态, 其余信道状态与前一时隙相同。假设认知用户从 0 号信道开始, 按照升序逐一感知所有信道。 N 个时隙以后完成所有信道的整体感知。本文假设系统中只含有一个认知用户, 其收发机之间通过确认信息确定本次传输是否成功, 且确认信息总是能够成功发送。

本文采用无记忆接入(Memoryless Access, MA)策略思想, 即: 次用户只接入当前时隙下

所感知的信道, 感知为闲则以概率 1 接入该信道, 感知为忙则放弃接入, 等待下一时隙重新感知。文献[10]中无记忆接入策略为: 感知状态为闲时, 为了将对主用户的干扰水平控制在一定范围以内, 以一定概率接入该信道。概率值大小通过当前信道中主用户所能忍受的最大干扰水平确定。最终通过优化当前信道的接入概率获取最大的平均吞吐量。而本文中引入次用户业务请求长度, 只要当前信道感知结果为闲则以概率 1 接入信道, 然后根据次用户业务数据包长度自适应选择接入该信道的的时间。而文献[10]始终以 $T-\tau$ 作为本时隙次用户接入信道的的时间。

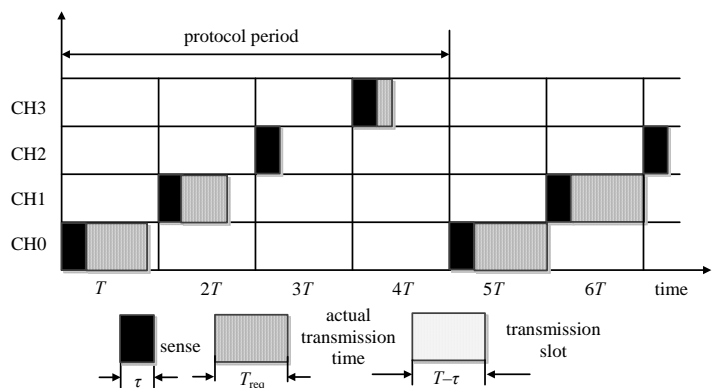


Fig.1 Sensing and transmission structure for $N=4$
图 1 次用户感知、接入时隙结构图($N=4$)

2 感知活动分析

周期性信道感知框架下,主用户占用信道的马尔科夫规律分析如下:对于含有 N 个信道的主用户网络, t 时刻的信道状态为 $\mathbf{S}(t)=[S_0(t),S_1(t),\dots,S_{N-1}(t)]^T$,定义次用户感知结果为 $\boldsymbol{\Theta}(k)=[\Theta_1(k),\Theta_2(k),\Theta_3(k),\dots,\Theta_{N-1}(k)]^T$,其中 $\Theta_i(k)$ 为信道 i 在时隙 k 的感知状态,一个协议周期内,次用户完成对所有信道的感知。假设当前所在时隙为 k , $I_k=[kT,(k+1)T](k \in 0,1,2,\dots,N)$ (起始时隙为 I_0), T 为其协议周期,则当前被感知的信道为 $q=k \bmod N$ 。在周期性感知机制下可以得到:

$$\Theta_i(k)=\begin{cases} S_i(kT) & i=k \bmod N \\ \Theta_i(k-1) & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

由假设模型可知,2 个主用户相继到达和离开的时间间隔服从参数为 $\lambda_i^{-1}, \mu_i^{-1}$ 指数分布,主用户占用任意信道 i 的状态 $S_i(t)$ 可建模为连续时间的两状态马尔科夫过程,其状态转移速率矩阵为:

$$\mathbf{Q}_i=\begin{bmatrix} -\lambda_i & \lambda_i \\ \mu_i & -\mu_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

由其状态转移概率矩阵可表示为^[14]:

$$\mathbf{P}_i(t)=\exp(\mathbf{Q}_i t)=\begin{bmatrix} 1-v_i(1)[1-e^{-(\lambda_i+\mu_i)t}] & v_i(1)[1-e^{-(\lambda_i+\mu_i)t}] \\ v_i(0)[1-e^{-(\lambda_i+\mu_i)t}] & 1-v_i(0)[1-e^{-(\lambda_i+\mu_i)t}] \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $v_i(0)$ 和 $v_i(1)$ 为信道 i 处于空闲状态和忙碌状态的稳态概率:

$$v_i(0)=\frac{\mu_i}{\lambda_i+\mu_i}, \quad v_i(1)=\frac{\lambda_i}{\lambda_i+\mu_i} \quad (6)$$

下面给出在当前时隙 k 下任意信道 i ($i \in 0,1,2,\dots,N-1$) 的连续空闲概率表达式,在当前时隙 k ,给定观测状态 θ 下,任意信道 i 的空闲概率表达式:

$$\begin{aligned} P_{\text{free}}(i,k,\theta) &= P(S_i(t)=0, \forall t \in T_x(i,k) | \Theta(k)=\theta) [0,1]= \\ &= P(S_i(t)=0, \forall t \in T_x(i,k) | S_i(\phi(i,k)T)=\theta_i) \\ &= P(S_i(t)=0, \forall t \in T_x(i,k) | S_i(kT)=0, S_i(\phi(i,k)T)=\theta_i) * P(S_i(kT)=0, | S_i(\phi(i,k)T)=\theta_i) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $T_x(i,k)$ 表示信道 i 连续空闲的时间,即在这段时间内主用户不出现在该信道; θ 表示当前时隙 k 时认知用户的观测向量取值,表示最后一次感知信道 i 的时隙编号, θ_i 为 i 信道的感知结果; T 表示传输周期。如果只接入本时隙感知的信道,由公式(2)和公式(5)可知, $P_{\text{free}}(i,k,\theta)$ 可重写为:

$$P_{\text{free}}(q,k,\theta)=v_q(0)e^{-\lambda_q T_x(i,k)} \quad (8)$$

公式可以理解为当前 k 时隙下由感知结果估测当前信道的空闲概率大小, $e^{-\lambda_q T_x(i,k)}$ 表示转移到当前空闲的条件下(时隙开始处)持续空闲 $T_x(i,k)$ 的概率。

3 基于次用户业务请求数据包长度的自适应机会频谱接入算法

3.1 有效传输吞吐量定义

本文中定义有效传输吞吐量是指单位时隙内次用户能够传输的平均业务总量,用 R 表示:

$$R=\frac{1}{N}\sum_{q=0}^{N-1}P_{\text{free}}(q,k,\theta)*R_l(k) \quad (9)$$

式中 $R_l(k)$ 为次用户在 k 时隙需要发送的数据包长度。本文的优化目标是在次用户对主用户的干扰限制在一定条件下,提高次用户传输的平均有效吞吐量的同时,实现有效吞吐量与对主用户碰撞干扰的折中。所以下面分析次用户对主用户干扰,次用户对主用户的干扰产生于 2 个方面: a) 由于次用户本身感知错误的影响,原本忙碌的信道被检测为空闲,进而依据算法接入信道引起与主用户发生碰撞; b) 主用户可以任意时间接入信道而不用考虑次用户的存在,一旦接入,次用户正在使用的信道即会发生与主用户的碰撞。本文假设认知用户可以准确感知主用户的信道状态,只需考虑第 2 种情况下的干扰问题。定义 $P_c(q)$ 为次用户在传输过程中选择信道 q 与主用户碰撞的概率,假设信道在每个时隙中被选中的机会相同,则次用户在时隙 k 选中 q 信道的平均碰撞概率:

$$P_c(q) = \frac{1}{N} v_q(0) \frac{1 - e^{-\lambda_q T_x(q,k)}}{1 - v(0)e^{-\lambda_q T}} \leq \delta(q), \quad q \in (0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (10)$$

式中： $\delta(q)$ 表示主用户在信道传输时 q 所能忍受的最大干扰水平； $\frac{1}{N}v_q(0)$ 表示次用户在信道 q 传输的概率(次用户每个时隙只接入一个信道，故其概率需乘 $\frac{1}{N}$)； $1 - e^{-\lambda_q T_x(i,k)}$ 表示在给定信道空闲的条件下主用户在次用户传输时间 $T_x(q,k)$ 内接入信道 q 传输的概率。当2个事件同时发生时，即会产生碰撞。 $1 - v(0)e^{-\lambda_q T}$ 为主用户在无条件的概率情况下，在一个传输时隙出现的概率。那么本文的优化目标可以用下式表示：

$$\begin{cases} \max R = \frac{1}{N} \sum_{q=0}^{N-1} P_{\text{free}}(q, k, \theta) R_i(k) \\ \text{st. } P_c(q) = \frac{1}{N} v_q(0) \frac{1 - e^{-\lambda_q T_x(q,k)}}{1 - v_q(0)e^{-\lambda_q T}} \leq \delta(q) \quad \forall q \in (0, 1, 2, \dots, N-1) \end{cases} \quad (11)$$

由公式(11)可知，当下方不等式取等号时，可得到在当前时隙下选择信道 q 接入，满足主用户干扰水平的最大连续空闲时间 T_q^* ，由于 $T_q^* \leq T - \tau$ ，可得：

$$T_q^* = \min \left\{ \frac{\ln \left[\frac{1 - N\delta(q)(1 - v_q(0)e^{-\lambda_q T})}{v_q(0)} \right]}{-\lambda_q}, T - \tau \right\} \quad (12)$$

3.2 算法描述与实现

假设每个时隙，次用户都会分配一定长度的数据包，模型假设部分已经给出各授权信道的带宽为 B_i ，各信道具有相同的传输信噪比 $R_{SN,i}$ ，由香农公式可知各信道的信道容量 $C_i = B_i \log(1 + R_{SN,i})$ ，即数据包在各个信道的传输速率为 C_q ，那么数据包在信道上的传输时间可表示为：

$$t_{\text{req}}(q, k) = R_i(k) / C_q = R_i(k) / B_q \log(1 + R_{SN,q}) \quad (13)$$

式中 $t_{\text{req}}(q, k)$ 表示数据包在当前时隙下传输需要花费的时间。本文算法将业务实际请求时间 $t_{\text{req}}(q, k)$ 与信道在碰撞约束条件下所能提供的最大空闲时间比较，一旦小于能够提供的最大空闲时间，意味着在 $t_{\text{req}}(q, k)$ 时间内就可以把该时隙的数据包发送完成，相应的最优接入概率、发送成功率、与主用户的碰撞概率均用 $t_{\text{req}}(i, k)$ 替换公式(8)、公式(10)和公式(11)中的 $T_x(q, k)$ 求得。如果数据包所请求时间长度 $t_{\text{req}}(q, k) > T_q^*$ ，不做任何改变，计算本时隙碰撞概率和有效传输吞吐量，本时隙没有传输完成的数据包累积到下一时隙传输。如此一来，由于所研究场景多为无限突发业务(如WLAN, VoIP等非时隙突发传输业务)，其数据包长度长短不一，请求业务时间也因此不同，基于数据包请求时间的频谱接入算法能够根据数据包长度自适应改变传输策略，降低与主用户碰撞概率的同时提高单位时隙内的有效传输吞吐量，同时也能够降低频谱切换的次数。下文给出算法执行的具体流程。

1) 初始化：初始化主用户的业务参数 λ 和 μ ，信道个数 N ，各信道的传输带宽 B_i ，传输信噪比 $R_{SN,i}$ ，以及主用户所能容忍的最大干扰水平 δ ，感知周期 T 和感知时间 τ 初始数据包长度 R_i 为0，初始信道状态为 θ 。

2) 将本时隙到达数据包长度与上时隙剩余数据包累加作为当前时隙的数据包长度，由此计算在当前信道传输的请求时间 $t_{\text{req}}(q, k)$ 与碰撞约束条件下所允许最大空闲时间比较 T_q^* 。

3) 如果 $t_{\text{req}}(q, k) \leq T_q^*$ ，用 $t_{\text{req}}(q, k)$ 代替公式(10)、公式(12)和公式(11)中的 T_q^* ，传输成功(收到确认信息)，则计算接入有效传输吞吐量和实际碰撞概率。如果 $t_{\text{req}}(q, k) > T_q^*$ ，说明本次数据包不能全部发送，则不做替换，传输成功后统计本时隙内数据包的发送长度，将剩余数据包长度累积到下一时隙发送。本时隙传输结束，返回步骤2)，继续下一时隙传输。

4) 重复步骤2)~步骤3)，直至 N 个时隙后，算法结束。计算一个协议周期(NT)内的平均有效传输吞吐量。

4 仿真结果与分析

本部分使用MATLAB环境，仿真实验验证所提算法的有效性。作为参考，本文还仿真了“OSA-MA”算法、“严格约束”算法。图中各点均是蒙特卡洛实验1000次计算得到，参考文献[10]设置 $\lambda_i^{-1} = 4.2$ ms, $\mu_i^{-1} = 1$ ms, 时隙长度 $T = 5$ ms, 感知时间 $\tau = 2.5$ ms, 信道个数 $N = 6$ ，通过设置相应的信道带宽和传输信噪比，使各信道的传输容

量分布在 100 kbit/s~300 kbit/s 之间, 本文随机设置的各信道 C 值为: $[2.2, 1.5, 3.0, 2.8, 2.1, 2.4] \times 10^5$ bit/s。次用户每个时隙分配的业务长度服从几何分布, 其参数 P 设为 0.02, 仿真对比结果见图 2。

图 2 中有效传输吞吐量随着干扰水平的增加而增大, 因为干扰水平增大, 则系统所能提供的最大持续空闲时间都会增加, 其有效传输吞吐量增加。“严格约束”算法由于大多不能满足其接入信道条件, 会选择放弃信道接入, 该时隙相应的接入有效吞吐量就为 0, 所以其平均有效吞吐量较低。本文算法与“OSA-MA”算法走势基本相同, 最终随着干扰水平的增大, 都会以“OSA-MA”算法中接入概率为 1, 本文算法中相应的最大提供时间为 $T-\tau$ 结束, 最终趋于定值。不同的是“OSA-MA”算法接入概率为 1 时对应 δ 值约为 0.05, 比本文算法小(约为 0.08), 所以在前期干扰水平增大的过程中, 其收敛到定值的速度较快, 相应的吞吐量也大, 一旦两者均趋于定值后, 对于同一数据包, 当分组数据包较小时, 本文算法完成传输所要求的持续空闲时间较少, 相应的传输成功概率较高, 则平均有效传输吞吐量高于“OSA-MA”算法。

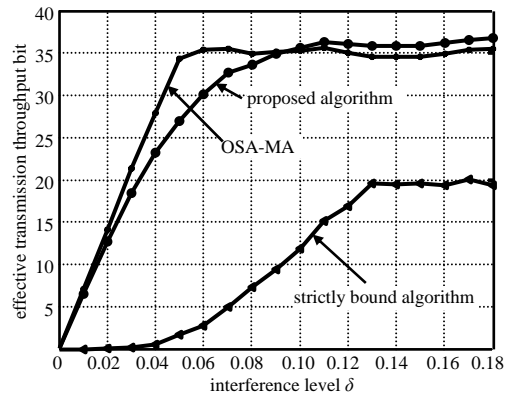


Fig.2 Effective transmission throughput comparison
图 2 有效传输吞吐量对比图

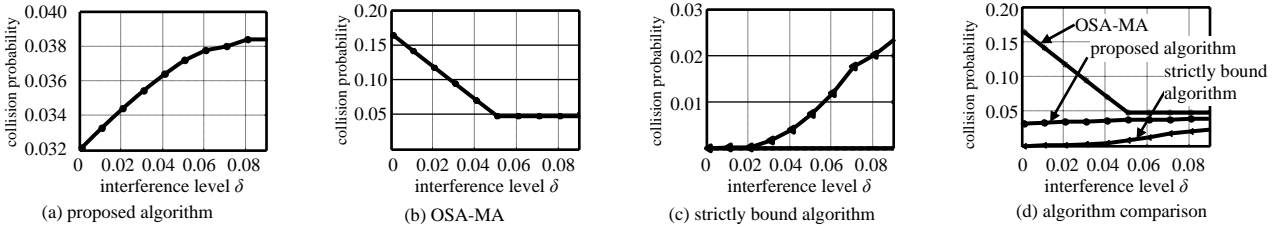


Fig.3 Collision probability comparison
图 3 次用户与主用户实际碰撞概率对比

为了进一步验证上面的分析, 图 3 给出了 3 种算法中次用户与主用户的碰撞概率随干扰水平的变化曲线。由于“OSA-MA”算法没有考虑数据包长度, 始终以 $T-\tau$ 作为持续空闲时间计算相应的成功发送概率, 在干扰水平较小时, 容易引起与主用户的碰撞, 当 $\delta=0.05$ 时, 接入信道概率为 1, 碰撞概率为定值。本文算法和“严格约束”算法在分组数据包确定的情况下, 干扰水平越高, 信道所提供的持续空闲时间越长, 碰撞概率就会变大, 但远小于“OSA-MA”算法的碰撞概率。由于“严格约束”算法采取较为保守的接入策略, 一旦系统提供时间不满足其传输要求, 就放弃信道接入, 相应的有效传输吞吐量为 0, 也就不存在碰撞。所以其平均碰撞概率比本文算法低。三者碰撞概率最终分别在其“最佳” δ (使相应的碰撞概率为定值的干扰水平)到来之后趋于定值, 且小于干扰水平。值得注意的是, 本文提供算法的碰撞概率始终在干扰水平以下, 且由图 2 可知其相应的有效传输吞吐量也较大。

图 4 和图 5 中, 当固定干扰水平 $\delta=0.07$ 后, 图 4 中 OSA-MA 算法接入概率为定值 1(干扰超过 0.05), 相应的碰撞率为定值, 其有效吞吐量随 P 值的增大, 呈下降趋势。本文算法在固定干扰水平后, P 值较小时, 相应的数据包长度较长, 请求时间较多, 其相应的接入成功率就会越小, 但有效吞吐量是成功率与本时隙所发送数据包长度的乘积共同作用的结果, 其有效吞吐量仍旧很高(数据包长度占主要影响因素)。随着 P 值增大, 其有效吞吐量逐渐变小, 碰撞概率逐渐变低, 最终趋于定值。“严格约束”算法随 P 值变化趋势刚好相反, 这与“严格约束”算法选择信道接入的判断条件有关, 当数据包长度较大时, 其过多采用保守策略, 放弃接入机会。随着数据包长度的减小, 开始逐渐选择满足信道条件的信道接入, 所以其吞吐量逐渐增加, 碰撞概率也有上升趋势。需要指出, 由图 5 中的对比图可以看出, 本文算法在碰撞概率上虽然略大于“严格约束”算法(二者

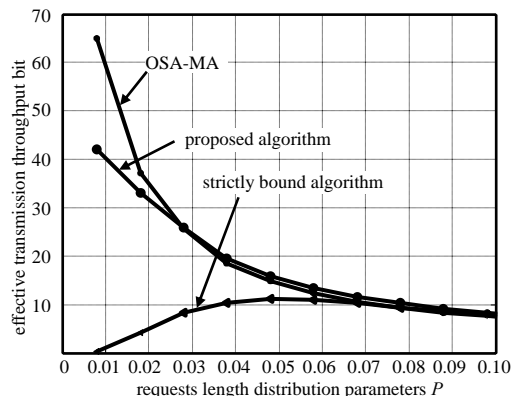


Fig.4 Effective transmission throughput vs. P
图 4 有效吞吐量随参数 P 变化对比图

均在干扰水平以下),但随着数据包长度的变化,其有效吞吐量明显高于依靠牺牲频谱接入机会减少碰撞概率的“严格约束”算法。同时,本文算法在吞吐量上与采用(以牺牲碰撞概率为代价获得较高的吞吐量收益)“激进”策略“OSA-MA”相当,但其碰撞概率明显小于“OSA-MA”算法。实现了平均有效吞吐量与碰撞概率之间的折中。

最后,为了验证本文所提算法的有效性和稳定性,本文仿真了当次用户所处环境变化时,算法在有效传输吞吐量和碰撞概率上的变化。

由图6可看出,当干扰水平较小时,有效吞吐量不随主用户到达强度 λ 的变化而变化,当干扰水平逐渐变大时,随着 λ 在10%范围内的浮动,有效吞吐量只有约1 bit左右的差距。

图7为碰撞概率随干扰水平的变化曲线:随 λ 在5%范围内的浮动,碰撞概率浮动范围仅为0.0018左右(约为4.7%),而其碰撞概率仍然远小于当前主用户所能忍受的干扰水平。所以,本文算法在外部环境发生变化时仍具有较好的接入性能,体现了算法的鲁棒性。

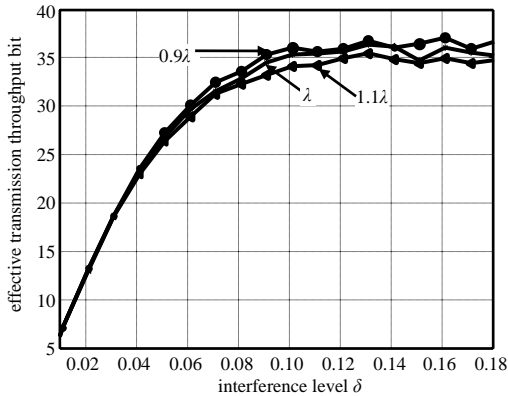


Fig.6 Changes in effective throughput with λ
图6 不同到达强度 λ 下有效吞吐量

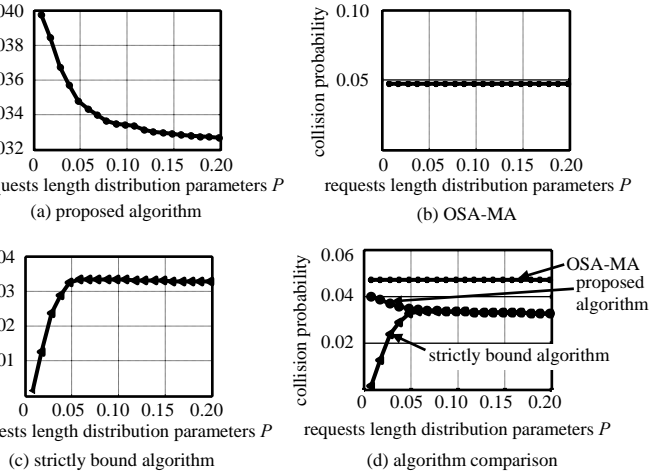


Fig.5 Collision probability vs. P
图5 碰撞概率随参数 P 变化对比图

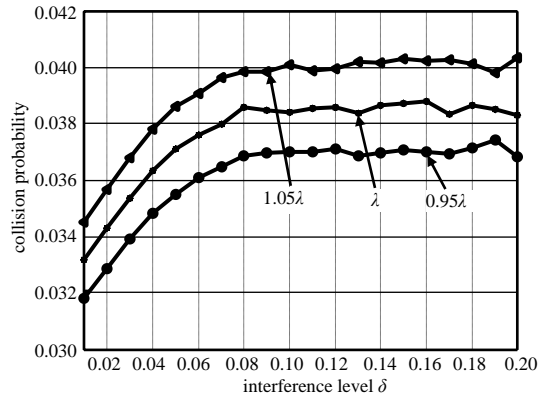


Fig.7 Changes in collision probability with λ
图7 不同到达强度 λ 下碰撞概率

5 结论

在周期性感知框架的基础上,本文基于次用户请求业务数据包长度,研究了非时隙主网络中单个次用户的机会频谱接入策略问题。通过建立次用户的感知接入模型,以有效传输吞吐量为判断接入收益指标,本文所提算法可使次用户根据其所分配业务数据包长度,自适应调整接入策略,进而在满足对主用户碰撞限制条件的同时提高平均传输有效吞吐量。通过仿真对比,本文算法能够实现平均吞吐量与碰撞概率的折中,同时算法对所处外部环境变化具有较强的鲁棒性。

参考文献:

[1] XU Yuhua, Anpalagan Alagan, WU Qihui, et al. Decision-theoretic distributed channel selection for opportunistic spectrum access: strategies, challenges and solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1689–1713.

[2] Federal Communications Commission. Spectrum policy task force[R]. Washington: ET Docket, 2002(02–135): 215.

[3] Yucek T, Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1): 116–130.

[4] Akkarajitsakul K, Hossain E, Niyato D, et al. Game theoretic approaches for multiple access in wireless networks: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(3): 372–395.

- [5] Trestian R, Ormond O, Muntean G. Game theory-based network selection: solutions and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(4): 1212–1231.
- [6] YIN Sixing, CHEN Dawei, ZHANG Qian, et al. Prediction-based throughput optimization for dynamic spectrum access[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(3): 1284–1289.
- [7] CHEN Y, ZHAO Q, Swami A. Distributed spectrum sensing and access in cognitive radio networks with energy constraint[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(2): 783–797.
- [8] LIU K Q, ZHAO Q. Distributed learning in multi-armed bandit with multiple players[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(11): 5667–5681.
- [9] LIU K, ZHAO Q, Krishnamachari B. Decentralized multi-armed bandit with multiple distributed players[ED/OL]. [2010–09]. <http://http://web.ece.ucdavis.edu/~qzhao/LiuEtal10Allerton.pdf>.
- [10] ZHAO Q, Geirhofer S, TONG L, et al. Opportunistic spectrum access via periodic channel sensing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(2): 785–796.
- [11] LI X, ZHAO Q, GUAN X, et al. Optimal cognitive access of Markovian channels under tight collision constraints[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(4): 746–756.
- [12] 任丙印, 王大鸣, 崔维嘉, 等. 基于碰撞概率约束的认知系统子信道分配算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(2): 228–233. (REN Bingyin, WANG Daming, CUI Weijia, et al. Subcarrier allocation algorithm of CR system based on collision probability constraints[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(2): 228–233.)
- [13] 张晶, 朱洪波. 基于跨层优化的机会频谱接入算法[J]. 通信学报, 2010, 31(11): 188–194. (ZHANG Jing, ZHU Hongbo. Opportunistic spectrum access algorithm based on cross-layer optimization[J]. Journal on Communications, 2010, 31(11): 188–194.)
- [14] 刘次华. 随机过程[M]. 4版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008. (LIU Cihua. Random Process[M]. 4th ed. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology Press, 2008.)

作者简介:



赵 彪(1988–), 男, 安徽省阜阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为机会频谱接入技术. email: 18634129418@163.com.