

文章编号: 1672-2892(2010)04-0489-06

## 基于时间估计的动态频谱接入算法

孙顺乔, 倪卫明

(复旦大学 通信科学与工程系, 上海 200433)

**摘要:** 基于先验知识模型, 设计了基于信道剩余空闲时间估计的动态频谱接入算法: 每个次用户根据感知历史维护信道剩余空闲时间的估计向量并周期进行更新, 每个时隙开始时次用户选择剩余空闲时间估计最大的信道接入。对动态频谱接入算法的适应性进行了分析, 并求得次用户的最优传输时间长度。仿真结果表明, 在给定的参数下, 新算法的信道利用率比其他算法提高约 5%-10%, 同时对主用户的干扰保持最低。

**关键词:** 感知无线网络; 动态频谱接入; 信道剩余时间估计; 算法适应性; 最优传输时间

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

## Dynamic spectrum access algorithm based on the estimation of channel time

SUN Shun-qiao, NI Wei-ming

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** Based on the anterior knowledge model, a Dynamic Spectrum Access(DSA) algorithm was proposed according to the Channel Remaining Idle Time(CRIT) estimation. Each Secondary User(SU) maintained an estimation vector of the CRIT and upgraded it periodically. At the beginning of each time slot, SU chose a channel with the largest CRIT estimation to access. The adaptability of the DSA algorithm was analyzed and the optimal transmission time for the SU was obtained. Simulation results show that the new algorithm has 5%-10% higher channel utilization efficiency than other ones under certain channel parameters while making the lowest interference to Primary Users(PU).

**Key words:** cognitive radio networks; Dynamic Spectrum Access; Channel Remaining Idle Time estimation; algorithm robustness; optimal transmission time

随着无线网络用户的增长, 无线频谱资源变得越来越匮乏, 感知无线电<sup>[1]</sup>的提出被认为是解决频谱资源匮乏问题的有效方法, 它允许次用户动态地利用主用户系统中空闲的频谱。次用户一般采用 Listen-before-Talk, 即先感知再接入的策略<sup>[2-3]</sup>。次用户可以利用感知的历史数据来估计频谱空闲的分布规律等, 作为次用户决策时的先验知识<sup>[4-5]</sup>。基于这些先验知识, 次用户可以预测频谱未来空闲的情况, 帮助次用户提早做出跳转的决策。在基于先验知识的算法中, 文献[6]根据感知历史设计了一种动态频谱接入算法, 每个时隙次用户选择具有最大收益的信道接入, 信道的收益函数定义为信道空闲的概率与带宽的积, 但基于部分可观察马尔可夫过程的算法复杂度较高。文献[7]提出了一种基于信道剩余空闲时间估计的接入算法, 估计量取为信道空闲概率与信道统计平均空闲时间的积, 但分析表明该算法在信道空闲时间远大于信道时隙时预测准确性降低。本文利用感知得到的先验知识设计了一种新的基于信道剩余空闲时间估计的动态频谱接入算法。

### 1 基于估计的接入算法

#### 1.1 系统模型

假设主用户网络中有  $N$  个信道, 每个信道可看成在 ON 与 OFF 2 个状态之间交替的更新过程。ON 状态表示主用户占用信道, 此时次用户不可接入信道; OFF 状态表示信道空闲, 此时次用户可以接入信道, 如图 1 所示。

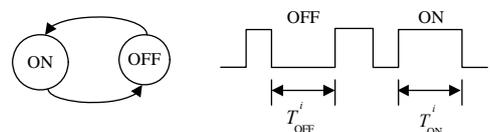


Fig.1 Alternative ON/OFF channel model  
图1 交替ON/OFF信道模型

信道  $i(1 \leq i \leq N)$  的忙碌和空闲状态的持续时间  $T_{ON}^i$  和  $T_{OFF}^i$  是随机变量, 服从指数分布, 参数为  $\lambda_i$  和  $\mu_i$ 。信道平均空闲为  $E[T_{OFF}^i] = \frac{1}{\lambda_i}$ , 平均忙碌时间为  $E[T_{ON}^i] = \frac{1}{\mu_i}$ , 信道忙碌的平均概率为  $P_B^i = \frac{E[T_{ON}^i]}{E[T_{ON}^i] + E[T_{OFF}^i]} = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i}$ , 信道空闲的平均概率为  $P_I^i = 1 - P_B^i = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i}$ 。

假设在感知无线网络中, 假设主用户系统没有分时隙, 而次用户网络是分时隙的系统。每个时隙  $t$  开始时次用户进行感知, 感知时间为  $T_s$ , 若感知信道空闲则发起传输, 传输时间为  $T_d$ , 接收机若正确接收则反馈 ACK 信号给发射机。用  $k_i \in \{0(\text{no ACK}), 1(\text{ACK})\}$  表示第  $i$  信道上次用户是否收到 ACK。假设 ACK 理想传输且传输时间可以忽略, 则时隙长度为  $T = T_s + T_d$ 。收到 ACK 则表明在  $T_d$  时间内没有主用户到来, 传输成功, 如图 2(a)所示, 则此时隙内的信道利用率为  $\eta(t) = \frac{T_d}{T}$ , 对主用户的冲突率为  $P_c(t) = 0$ 。若发射机没有收到 ACK, 表示  $T_d$  时间内有主用户到来, 发生了冲突, 而具体的冲突又有 3 种可能, 如图 2(b)~2(d)所示, 计算得到每种情况下的冲突时间  $T_{\text{collision}}$ , 则此时隙内的冲突率为  $P_c(t) = T_{\text{collision}}/T$ , 在发生冲突的情况下, 认为次用户的信道利用率为  $\eta(t) = 0$ 。

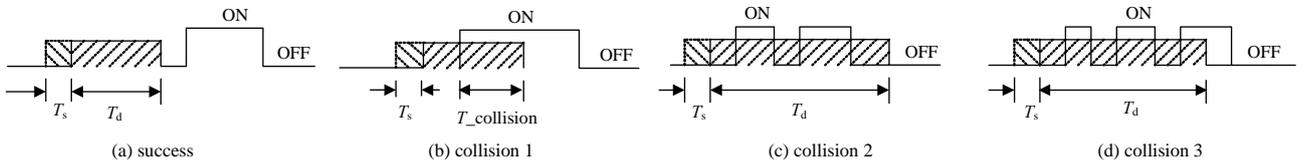


Fig.2 Four SU transmission situations

图 2 次用户传输的 4 种可能情况

经过  $M$  个连续时隙, 可以得到次用户的累积信道利用率和对网络中所有信道上主用户造成的累积冲突率。本文的设计目标是在满足对主用户的平均冲突率低于规定阈值的要求下, 最大化次用户的平均信道利用率, 即:

$$\begin{cases} \text{Maximize: } \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M \eta(t) \\ \text{Subject to: } \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M P_c(t) \leq \xi \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\xi$  为主用户网络可以接受的最小干扰阈值。

### 1.2 估计模型

实际中每个信道上的忙碌和空闲时间的分布参数是随着时间缓慢变化的, 但可以假定信道参数在一段小的时间区间内近似不变。基于观察历史, 次用户可以周期采用最大似然或者贝叶斯估计方法来估计信道的忙碌和空闲时间的分布参数<sup>[5]</sup>, 这些分布参数和感知历史就成为次用户做决策时的先验知识, 估计模型框图如图 3 所示。在不同的信道参数模型下, 不同预测方法性能不同, 次用户需要在每个时隙  $t$ , 根据已得到的先验知识决定采用哪种预测方法来估计第  $i(1 \leq i \leq N)$  信道下一个时隙的剩余空闲时间  $\hat{T}_R^i(t+1)$ , 等新时隙开始时次用户选择具有最大剩余空闲时间的信道  $j$  接入, 即:

$$j = \arg \max_{1 \leq i \leq N} \{ \hat{T}_R^i(t+1) \} \quad (2)$$

### 1.3 估计方法

文献[7]中提出的 Constant Estimation(C-E)方法中, 信道剩余空闲时间估计表示为信道下个时隙空闲的概率  $P_{\text{idle}}^i$  与信道的平均空闲时间  $\frac{1}{\lambda_i}$  的乘积, 即:  $\hat{T}_R^i(t) = P_{\text{idle}}^i \frac{1}{\lambda_i}$ 。其中  $P_{\text{idle}}^i = \Pr(S^i(t + \Delta t) = 0 | S^i(t) = d_i) = P_{d_i 0}^i(\Delta t)$ ,  $d_i$  是信道  $i$  在  $t$  时隙时的感知结果,  $d_i \in \{0(\text{idle}), 1(\text{busy})\}$ ,  $\Delta t$  为从上次感知到现在时隙经过的时间, 可以认为是轮询感知周期。在交替指数分布的信道模型下, 由文献[4]得到:

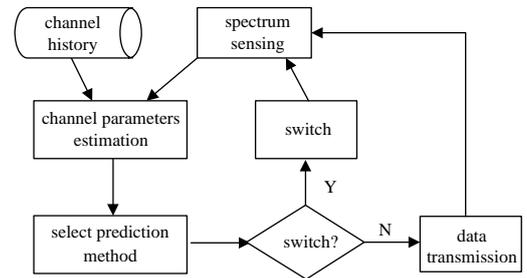


Fig.3 DSA architecture based on estimation

图 3 基于估计的动态频谱接入框图

$$P_{\text{idle}}^i = \begin{cases} P_{00}^i(\Delta t) = (1 - P_B^i) + P_B^i e^{-(\lambda_i + \mu_i)\Delta t}, & d_i = 0 \\ P_{10}^i(\Delta t) = (1 - P_B^i) - (1 - P_B^i) e^{-(\lambda_i + \mu_i)\Delta t}, & d_i = 1 \end{cases} \quad (3)$$

在这个表达式中, 信道空闲的条件概率  $P_{00}^i(\Delta t)$  可以看成是信道的平均空闲概率  $1 - P_B^i$  为不变量再加上一个扰动项组成, 扰动项的物理意义是  $\Delta t$  时间内信道状态发生一次或者多次跳变并且最终为空闲的概率<sup>[8]</sup>。当  $\frac{1}{\lambda_i}, \frac{1}{\mu_i} \gg \Delta t$  时, 利用  $e^{-x}$  函数在零点的一阶泰勒展开近似有:

$P_{00}^i(\Delta t) \approx (1 - P_B^i) + P_B^i(1 - (\lambda_i + \mu_i)\Delta t) = 1 - \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i}(\lambda_i + \mu_i)\Delta t = 1 - \lambda_i\Delta t \approx 1$ ; 当  $\frac{1}{\lambda_i} \gg \Delta t$  但  $\frac{1}{\mu_i}$  不满足时,  $P_B^i = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i}$  很小, 且  $e^{-(\lambda_i + \mu_i)\Delta t} < 1$ , 则一样可得  $P_{00}^i(\Delta t) \approx 1$ 。实际上只需当  $\frac{1}{\lambda_i} \geq 10\Delta t$  时就有  $P_{00}^i(\Delta t) \in [0.9, 1)$ , 因而当  $\frac{1}{\lambda_i} \gg \Delta t$  时,  $\Delta t$  时间内发生信道状态跳变的概率很低, 此时 C-E 方法对剩余时间的估计近似为不变量, 将不能准确反映信道的剩余空闲时间。

本文取信道的平均空闲时间减去经过的时间作为信道剩余空闲时间的估计, 称之为 Subtract Estimation(S-E) 方法。因为信道空闲时间是随机变量, 本文取信道剩余空闲时间大于 50% 概率时的时间点  $T_{50}$  代替信道平均空闲时间, 在指数分布下, 由  $P\{X > T_{50}\} = e^{-\lambda_i T_{50}} = 0.5$ , 得到  $T_{50} = \frac{1}{\lambda_i} \ln 2$ 。又因为信道的空闲时间是随机的, 所以估计量须取相减之差与零两者中的较大者, 即  $T_R^i(t) = \max\left(\frac{1}{\lambda_i} \ln 2 - mT, 0\right)$ , 其中  $m$  是从上次感知到信道空闲的时隙到当前时隙所经过的时隙数目。最后再乘以信道空闲的条件概率作为对信道空闲时间估计的修正, 即  $\hat{T}_R^i(t) = P_{\text{idle}}^i T_R^i(t)$ 。

在信道非常空闲时, S-E 方法将比取近似不变量的 C-E 方法能更准确地反映信道剩余空闲时间的变化情况。同时 S-E 方法中的  $T_R^i(t)$  项是建立在  $mT$  时间内信道没有发生跳变的假设上, 是比 C-E 方法更保守的一种估计, 因而采用 S-E 方法进行频谱接入, 对主用户造成的干扰也是最低的。每个时隙结束时, 次用户根据感知结果的历史和 ACK 信息, 对信道剩余空闲时间向量进行更新, 即:

$$\hat{T}_R^i(t+1) = \tau(\hat{T}_R^i(t) | S, k) \quad (4)$$

式中  $S$  是感知的结果,  $k$  是 ACK 的接收结果。

记信道从上次感知所在的时隙到当前时隙  $t$  所经过的时隙数目为  $m$ , 分别考虑 3 种信道的不同感知情况, 写出信道剩余空闲时间估计的更新公式。

### 1.3.1 针对被感知但还没有接入的信道, 估计量乘上修正因子

1) 上次感知为空闲并且在当前时隙  $t$  感知还是空闲, 取上次剩余空闲时间  $\hat{T}_R^i(\text{last})$  减去  $(m+1)T$  再乘上修正因子  $P_{00}^i((m+1)T)$  作为  $t+1$  时隙空闲时间的估计。

2) 上次感知为忙碌并且在当前时隙  $t$  感知是空闲, 则近似以为信道才刚进入空闲阶段, 估计量是用初始的信道空闲时间  $\hat{T}_R^i(1)$  减去 1 个时隙再乘以修正因子  $P_{00}^i(1 \cdot T)$ 。

3) 上次感知为空闲并且在当前时隙  $t$  感知为忙, 则近似认为信道才刚进入忙碌阶段, 估计量表达为初始信道空闲时间  $\hat{T}_R^i(1)$  乘上修正因子  $P_{10}^i(1 \cdot T)$ 。

4) 上次感知结果为忙并且在当前时隙  $t$  感知为忙, 估计量为初始信道空闲时间  $\hat{T}_R^i(1)$  乘上修正因子  $P_{10}^i((m+1)T)$ 。

1.3.2 针对被感知并接入的信道, 感知情况同 1.3.1 节, 但不再使用修正因子, 而是根据 ACK 信息来确定剩余时间估计, 因为接收 ACK 是在时隙  $t$  结束的时候, 也就是下个时隙的开始。

### 1.3.3 针对没有被感知的信道, 使用修正因子

1) 上次感知为忙碌, 估计量为初始空闲时间  $\hat{T}_R^i(1)$  乘上修正因子  $P_{10}^i((m+1)T)$ 。

2) 上次感知为空闲, 估计量为上次剩余空闲时间估计减去  $(m+1)T$  再乘上修正因子  $P_{00}^i((m+1)T)$ 。

综合以上这些情况可以得到更新公式:

$$\hat{T}_R^i(t+1) = \begin{cases} P_{00}^i((m+1)T) \max\{\hat{T}_R^i(\text{last}) - (m+1)T, 0\}, & i \in \{i: d_i^t = 0 | d_i^{\text{last}} = 0\} \\ P_{00}^i(1 \cdot T) \max\{\hat{T}_R^i(1) - 1T, 0\}, & i \in \{i: d_i^t = 0 | d_i^{\text{last}} = 1\} \\ P_{10}^i(1 \cdot T) \hat{T}_R^i(1), & i \in \{i: d_i^t = 1 | d_i^{\text{last}} = 0\} \\ P_{10}^i((m+1)T) \hat{T}_R^i(1), & i \in \{i: d_i^t = 1 | d_i^{\text{last}} = 1\} \\ \max\{\hat{T}_R^i(\text{last}) - (m+1)T, 0\}, & i \in \{i: k_i = 1, d_i^t = 0 | d_i^{\text{last}} = 0\} \\ \max\{\hat{T}_R^i(1) - 1T, 0\}, & i \in \{i: k_i = 1, d_i^t = 0 | d_i^{\text{last}} = 1\} \\ 0, & i \in \{i: k_i = 0\} \\ P_{10}^i((m+1)T) \hat{T}_R^i(1), & i \in \{i: \text{no sense} | d_i^{\text{last}} = 1\} \\ P_{00}^i((m+1)T) \max\{\hat{T}_R^i(\text{last}) - (m+1)T, 0\}, & i \in \{i: \text{no sense} | d_i^{\text{last}} = 0\} \end{cases} \quad (5)$$

初始时设  $\hat{T}_R(1) = \ln 2 \left[ \frac{1}{\lambda_1}, \frac{1}{\lambda_2}, \dots, \frac{1}{\lambda_N} \right]$ 。如果次用户维护的估计量  $\hat{T}_R(t+1)$  中所有元素都为 0，则下个时隙开始时次用户选择信道统计平均空闲概率最大的信道接入。

#### 1.4 算法适应性分析

下面分几种情况讨论动态频谱接入算法的适应性。

1) 当系统中所有信道的分布参数相同，即此时系统中所有信道的空闲概率一样，并且信道平均空闲时间  $\frac{1}{\lambda} \gg \Delta t$  的时候，随机选择一个信道接入成功的概率很大，并且随机算法简单，此时接入方法选择随机方法。

2) 系统中各个信道的平均空闲概率不同，信道的平均空闲时间不同，随机选择信道的方法性能不佳，因为随机的方法无法让次用户捕捉到较为空闲的信道。此时适合采用基于预测的方法。根据系统具体参数情况以及主用户对干扰的约束要求，选择 S-E 方法或 C-E 方法。

a) 由前面的分析，当系统中平均剩余空闲时间最大信道的平均空闲时间  $\frac{1}{\lambda} \in [k\Delta t, +\infty)$ ,  $k \approx 10$  时，C-E 方法的预测性能不佳，此时应选择 S-E 方法做频谱接入；

b) 若系统中各个信道的平均空闲时间均有  $\frac{1}{\lambda} \in (0, k\Delta t)$ ,  $k \approx 10$  时，即平均空闲时间比较小时，由前面分析可知，在感知周期内信道发生跳变的可能性增大，此时基于  $mT$  时间内没有发生信道状态跳转假设的 S-E 方法性能下降，而 C-E 方法中信道空闲概率  $P_{d0}^i(\Delta t)$  的扰动项不可忽略，此时频谱接入可选择 C-E 方法，但对主用户造成的干扰要大于 S-E 方法。

## 2 仿真

假设系统中有 6 个信道，每个信道的空闲和忙碌时间服从指数分布。假设次用户感知是理想的，即不存在虚警和漏检，次用户在一个时隙内能够感知 2 个信道，即感知当前要接入的信道和轮询感知系统中其他信道，顺序为沿着网络中信道平均空闲概率  $\{P_1^i\}$  的降序进行。感知时间设为  $T_s = 10 \text{ ms}$ ，仿真时间为  $T_{\text{simu}}$ 。仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置  
Table 1 Simulation parameters setup

channel	No.1			No.2			No.3		
	$\lambda_i$	$\mu_i$	$P_{\text{idle}}$	$\lambda_i$	$\mu_i$	$P_{\text{idle}}$	$\lambda_i$	$\mu_i$	$P_{\text{idle}}$
1	1	38	0.97	0.2	8	0.98	15	5	0.25
2	5	31	0.86	0.3	8	0.96	20	5	0.20
3	10	24	0.71	0.4	8	0.95	25	5	0.17
4	15	17	0.53	0.5	8	0.94	30	5	0.14
5	20	10	0.33	0.6	8	0.93	35	5	0.13
6	25	3	0.11	0.7	8	0.92	40	5	0.11
$T_d$	60 ms			100 ms			20 ms		
$T_{\text{simu}}$	700 s			1 100 s			300 s		

#### 2.1 仿真结果

在第 1 组参数中，系统中信道空闲概率在  $[0, 1]$  之间均匀分布，且最大的平均剩余空闲时间  $\frac{1}{\lambda} = 5 \approx 10\Delta t$ ，因而适合采用 S-E 方法。仿真结果如图 4(a) 和 4(b) 所示，结果显示 S-E 方法获得的信道利用率高于 C-E 方法约 5%，比随机方法高约 10%，并且采用 S-E 方法对主用户造成的冲突率比 C-E 方法低约 68%，更比随机方法低约 80%。

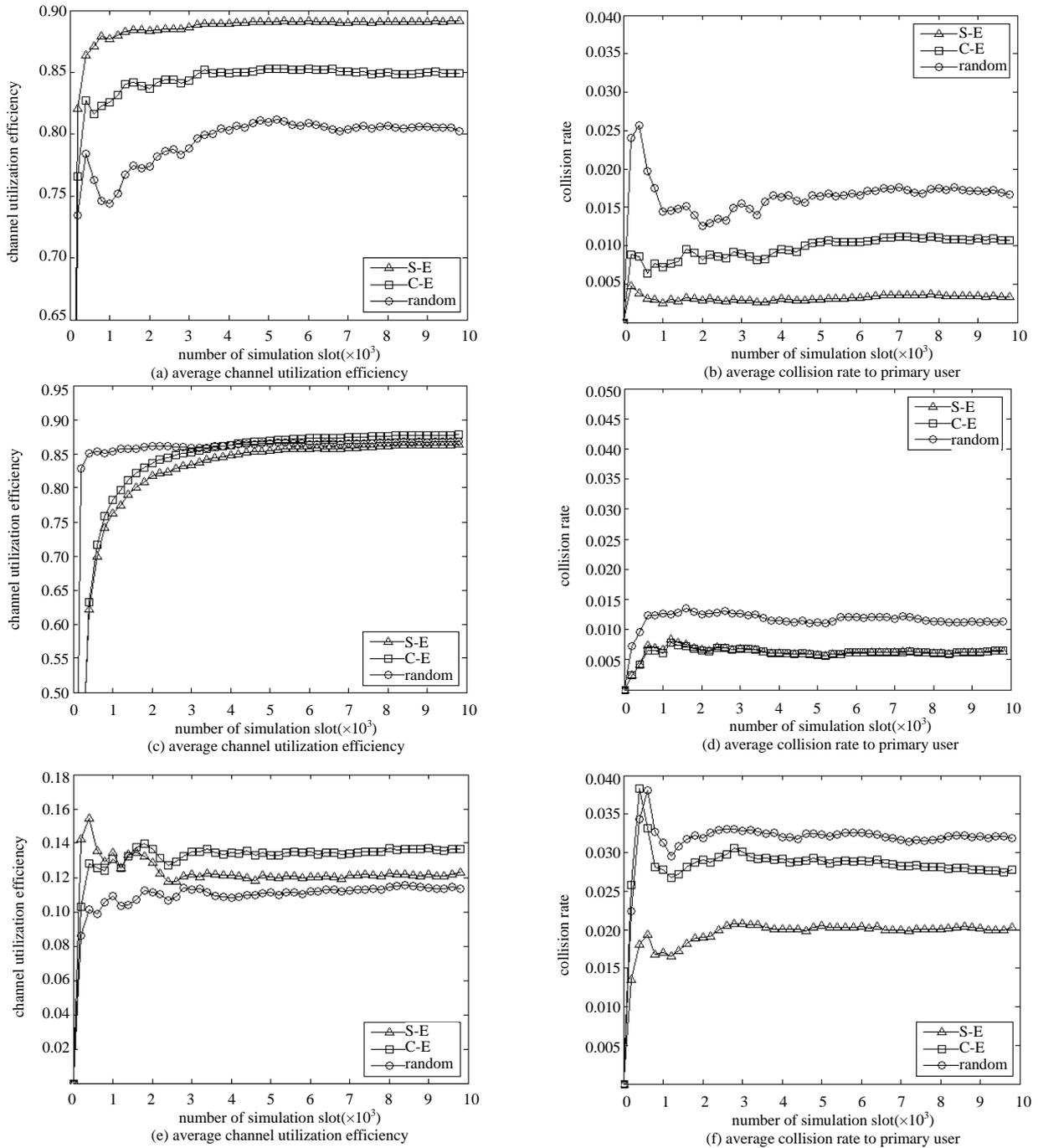


Fig.4 Simulation results  
图 4 仿真结果

在第 2 组参数中系统所有信道的空闲概率很大,此时随机选择一个信道接入的成功概率很大。仿真结果如图 4(c)和 4(d)所示,结果显示 3 种方法最终达到的性能趋于一致,但随机方法的性能收敛快,而基于预测的方法有一定的收敛时间,采用随机算法有优势。

在第 3 组参数中系统的信道空闲概率较小,各个信道参数不同,不适合采用随机方法。又因信道的平均空闲时间较小,适合采用 C-E 方法。仿真结果如图 4(e)和 4(f)所示,结果显示 C-E 方法的信道利用率稍好于 S-E 方法,但对主用户造成的冲突率要比 S-E 方法高约 40%。

3 组仿真都显示, S-E 方法对主用户造成的干扰最小,这与前面的分析一致。

## 2.2 传输时间长度 $T_d$ 的最佳值

文献[9]求得了单个次用户在只有一个信道的感知无线网络中的最优的传输时间长度  $T_d$ 。在本文单个次用户, 多个信道的网络中, 仿真得到了基于估计的接入算法在对主用户干扰低于阈值的条件下, 次用户的最优的传输时间长度。

图5显示了信道利用率与传输时间长度的关系, 可以看到信道利用率是传输时间长度  $T_d$  的凹函数, 次用户信道利用率存在最优值。在满足主用户的冲突限制条件, 可以求得次用户的最优的传输时间长度。仿真结果是在第1组参数下得到的, 当满足  $P_c \leq 5\%$  时, S-E方法中次用户的最佳传输长度  $T_d$  约为 150 ms, 此时最大信道利用率约为 90%。从图5中也可以看到, S-E方法的信道利用率在传输时间的较大区间内保持高效率, 并且对主用户的干扰随着传输时间长度增长最缓慢, 性能最优。

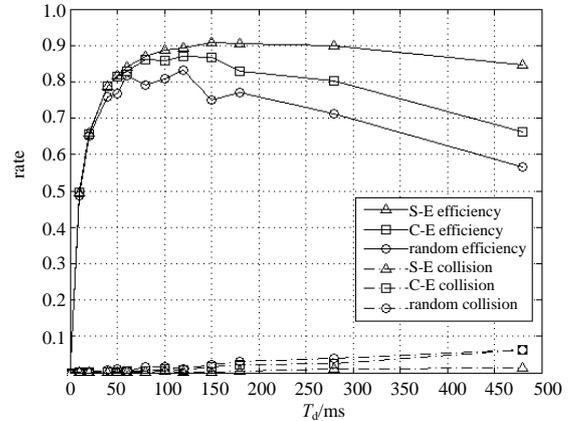


Fig.5 Optimal transmission time  
图5 最优传输时间长度

## 3 结论

本文提出了一种新的基于信道剩余空闲时间估计的动态频谱接入算法, 算法较为简洁, 性能较好。比较分析了在不同的信道参数下, 动态频谱接入算法的适应性问题。最后仿真得到了在单个次用户, 多信道的感知无线网络中, 次用户的最优传输时间长度。

### 参考文献:

- [1] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: Making software radios more personal[J]. IEEE Pers. Communication, 1999, 6(4):13-18.
- [2] 谢显中. 感知无线电技术及其应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [3] ZHAO Q, Sadler B M. A Survey of Dynamic Spectrum Access[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3):79-89.
- [4] KIM H, SHIN K G. Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC-Layer Sensing in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008, 7(5):533-545.
- [5] KIM H, SHIN K G. Fast Discovery of Spectrum Opportunities in Cognitive Radio Network[C]// Proc. of IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Chicago, IL, USA: [s.n.], 2008.
- [6] ZHAO Q, TONG L, SWAMI A. 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] YANG L, CAO L, ZHENG H. Proactive Channel Access in Dynamic Spectrum Networks[C]// Proc. of the second International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. Orlando, FL, USA: [s.n.], 2007.
- [8] 陈明. 信息与通信工程中的随机过程[M]. 2版. 北京:科学出版社, 2005.
- [9] ZHOU X, Li Y, Kwon Y H. Detection Timing and Channel Selection for Periodic Spectrum Sensing in Cognitive Radio[C]// Proc. of IEEE Global Communications Conference. New Orleans, LA, USA: [s.n.], 2008.

### 作者简介:



孙顺乔(1980-), 男, 山东省日照市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为感知无线电和无线网络. email: johnny.bridge@gmail.com.

倪卫明(1970-), 男, 上海市人, 副教授, 主要研究方向为信号处理、编码、无线通信和无线网络。