

基于跨层优化的机会频谱接入算法

张晶, 朱洪波

(南京邮电大学 通信与信息工程学院 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘 要: 针对周期性信道感知机会频谱接入系统, 首先采用马尔可夫过程对次用户的感知活动进行建模分析, 然后结合物理层和 MAC 层参数提出一个跨层性能指标——有效传输容量, 并在最大化有效传输容量准则下提出一种跨层优化机会频谱接入算法, 进而分析了机会频谱共享系统可获得的平均有效传输容量。理论分析和仿真结果表明, 所提出的跨层优化接入算法性能优于单层优化接入算法, 它可以使次用户获得更高的有效传输容量。

关键词: 周期性信道感知; 机会频谱接入; 有效传输容量; 跨层优化; 接入算法

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)11-0188-07

Opportunistic spectrum access algorithm based on cross-layer optimization

ZHANG Jing, ZHU Hong-bo

(College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,

Key Laboratory of Wireless Communications of Jiangsu Province, Nanjing 210003, China)

Abstract: Aiming at the opportunistic spectrum access (OSA) system with periodic channel sensing, sensing activity of secondary users was modeled and analyzed with Markov process. Combining physical layer index with MAC layer index, a cross-layer performance measure termed effective transmission capacity (ETC) was introduced. Under the criterion of maximizing ETC, a cross-layer optimal OSA algorithm was proposed and the achievable average ETC of opportunistic spectrum sharing was deduced. Theoretical analysis and simulation results indicate that the proposed algorithm is better than single-layer optimal schemes for it provides the secondary users with higher ETC.

Key words: periodic channel sensing; opportunistic spectrum access; effective transmission capacity; cross-layer optimization; access algorithm

1 引言

泛在无线通信是无线网络发展的必然趋势, 而实现泛在化的重要前提是足够的无线频谱资源支

撑。然而, 目前可用的无线频段日渐稀少, 究其原因是静态的无线资源分配方式使得无线频谱被部分授权用户排他性占用, 即使频段空闲非授权用户也无法使用。研究表明^[1,2], 很多授权频段大部分时

收稿日期: 2010-07-02; 修回日期: 2010-10-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2007CB310607); 国家科技重大专项(2009ZX03003-002, 2009ZX03007-004); 江苏省研究生创新计划(CX09B_145Z); 东南大学毫米波国家重点实验室开放课题(K200920); 南京邮电大学攀登计划(NY210007)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2007CB310607); The National Science & Technology Major Project (2009 ZX03003-002, 2009ZX03007-004); The Graduate Student Innovation Plan of Jiangsu Province (CX09B_145Z); The Open Research Project of State Key Laboratory of Millimeter Waves of Southeast University (K200920); The Scaler Plan of Nanjing University of Posts and Telecommunications (NY210007)

间是空闲的, 例如 3GHz 以下频段的频谱空白率超过 62%, 即实际的频谱利用率非常低。因此, 改变静态的无线资源分配方式而引入动态共享机制, 为解决频谱资源短缺问题的必然选择。

目前, 频谱共享技术已成为通信领域的研究热点。基于认知无线电 (CR, cognitive radio) 技术, 文献[3]提出了机会频谱接入 (OSA, opportunistic spectrum access) 模型, 而文献[4]提出了基于主用户干扰温度 (干扰功率容限) 约束的共存式频谱共享方案。考虑不同的频谱动态性, 文献[5]对频谱共享系统进行了分类, 机会频谱接入和共存式频谱共享分别属于频谱 Overlay 和频谱 Underlay。基于部分观察马尔可夫判决过程 (POMDP) 理论, 文献[6]对 OSA 系统的活动进行建模, 并进一步研究了机会频谱共享系统的感知和接入优化策略。文献[7]提出了一种周期性信道感知方案, 并基于 MAC 层优化研究了 OSA 系统的最优和次优接入方案。文献[8,9]研究了频谱共享系统的容量及功率分配问题, 文献[10]从容量最大化角度讨论了多个次用户的竞争接入问题。

然而, 现有的 OSA 算法大都针对单一物理层或 MAC 层指标进行优化。结合物理层和 MAC 层参数, 本文提出了有效传输容量这一跨层性能指标, 进而设计了一种最大化有效传输容量的 OSA 算法, 并通过理论和仿真分析对算法性能进行了验证。

文章安排如下: 第 2 节给出 OSA 系统模型; 第 3 节采用离散状态马尔可夫过程对次用户的感知活动进行建模分析; 第 4 节提出有效传输容量的概念, 并在最大化有效传输容量的准则下提出一种机会频谱接入算法; 第 5 节进行仿真分析; 第 6 节为结束语。

2 系统模型

考虑一种机会频谱接入系统, 其中主用户具有频谱使用优先权, 次用户周期性地感知频谱状态并机会式地接入空闲频段。假设主网络拥有 N 个带宽为 B_c 的授权信道 (频段), 信道标号集合 $I_c \stackrel{\text{def}}{=} \{0, 1, \dots, N-1\}$ 。根据是否被主用户占用, 每个信道具有忙碌 (被主用户占用, 1) 和空闲 (未被主用户占用, 0) 2 种状态, 即信道状态空间 $B \stackrel{\text{def}}{=} \{0, 1\}$ 。信道状态由次用户感知并记录。

在传输协议方面, 主用户采用非时隙传输结构

(如 WLAN), 即在有空闲信道的情况下随到随传, 直至通信结束; 次用户采用时隙传输结构, 如图 1 所示^[7], 信道感知和信号传输以时隙为单位周期性地进行。每个时隙长 T_s , 次用户在时隙开始的 τT_s 时间内对信道状态进行感知, 并根据感知到的信道状态按接入协议选择一个信道接入, 在剩余的 $(1-\tau)T_s$ 时间内通过所选信道进行信号传输, $\tau \in (0, 1)$ 。次用户在每个时隙仅感知并修正一个信道的状态, 其他信道的状态默认为上一时隙的记录结果, 当前感知的信道不一定是选择接入的信道。规定次用户在首个时隙感知 0 号信道, 之后按标号升序排列依次对信道进行感知。显然, 每经过 N 个时隙次用户完成一轮对所有信道的感知, 因此称 NT_s 为协议周期。

在业务流方面, 假设主用户业务分别以速率 λ_i 和 μ_i 的泊松过程到达和离开信道 i , 即信道 i 上 2 个相继到达的主业务之间的时间间隔服从均值为 $1/\lambda_i$ 的指数分布, 而每个主业务在信道 i 上的逗留时间服从均值为 $1/\mu_i$ 的指数分布^[11]。于是, 信道 i 处于 0 状态的时间 $t_{0,i}$ 和处于 1 状态的时间 $t_{1,i}$ 分别服从参数为 λ_i 和 μ_i 的指数分布, 即

$$\begin{cases} f_{0,i}(t) = \lambda_i \exp(-\lambda_i t) \\ f_{1,i}(t) = \mu_i \exp(-\mu_i t) \end{cases}, i \in I_c \quad (1)$$

其中, $f_{0,i}(t)$ 和 $f_{1,i}(t)$ 分别为 $t_{0,i}$ 和 $t_{1,i}$ 的概率密度函数 (PDF)。

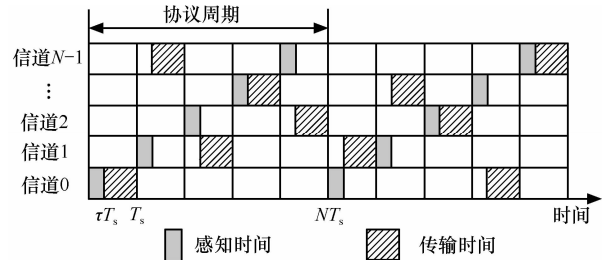


图 1 次用户传输时隙结构

3 感知活动分析

令 N 个信道在时刻 t 的实际状态 $\mathbf{X}(t) = [X_0(t), \dots, X_{N-1}(t)]^T$, 其中, $X_i(t)$ 表示信道 i 的状态, $X_i(t) \in B, \mathbf{X}(t) \in B^N (t \geq 0)$ 。定义第 k 个时隙 $I_k = [kT_s, (k+1)T_s] (k \in \mathbb{N})$ (起始时隙为 I_0), 此时次用户感知到的信道状态为 $\mathbf{Y}(k) = [Y_0(k), \dots, Y_{N-1}(k)]^T$, $Y_i(k)$ 为信道 i 在时隙 k 的感知状态。根据第 2 节的系统模型, 在时隙 k 中信道 $d = k \bmod N$

被感知, 于是有

$$Y_i(k) = \begin{cases} X_i(kT_s), & i = d \\ Y_i(k-1), & i \neq d \end{cases}, \quad i \in I_c, k \geq N, k \in N^+ \quad (2)$$

其中, N 为自然数集合, $N^+ = N - \{0\}$ 。显然, $\mathbf{Y}(k)$ 是一个与 $\mathbf{X}(t)$ 有关的 N 维随机过程, 且 $\mathbf{Y}(k) \in \mathcal{B}^N$ 。下面, 来研究次用户的信道感知活动。

定理 1 若 N 个信道相互独立, $\forall i \in I_c, X_i(t)$ 可建模为一个二状态连续时间马尔可夫过程, 其状态转移速率矩阵为

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} -\lambda_i & \lambda_i \\ \mu_i & -\mu_i \end{bmatrix}$$

状态转移概率矩阵为

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

其中, $v_i(0)$ 和 $v_i(1)$ 分别表示系统稳定时信道 i 处于 0 状态和 1 状态的概率:

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

证明 见附录 A。

定理 2 假设次用户在时隙 k 和 $k+1$ 分别对信道 d 和 d' 进行感知, 即 $d = k \bmod N$, $d' = (k+1) \bmod N$, 则随机过程 $\mathbf{Y}(k)$ 的转移概率为

$$\begin{aligned} \Pr(\mathbf{Y}(k+1) = \mathbf{y}' | \mathbf{Y}(k) = \mathbf{y}) &= \begin{cases} [\exp(\mathbf{Q}_{d'} NT_s)]_{(y'_d, y'_d)}, & y'_i = y_i, \forall i \neq d' \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{aligned}$$

其中, $[\exp(\mathbf{Q}_{d'} NT_s)]_{(y'_d, y'_d)}$ 为 $X_{d'}(t)$ 经过 NT_s 时间从状态 y_d 到 y'_d 的转移概率。

证明 见附录 B。

定理 3 $\mathbf{Y}(k)$ 具有周期性, 且周期为 N 。对任意 $c \in N^+, d \in I_c$, 随机过程 $\mathbf{Y}(cN + d)$ 具有稳态分布^[7]:

$$f_d(\mathbf{y}) = \prod_{i=0}^{N-1} (1_{[y_i=0]} v_i(0) + 1_{[y_i=1]} v_i(1))$$

其中, $1_{[\cdot]}$ 为判断函数, 当 $[\cdot]$ 成立时取 1, 否则取 0。

证明 见附录 C。

4 跨层优化 OSA 算法

从物理层来看, 可使次用户获得最大传输容量

的信道最佳; 而从 MAC 层来看, 与主用户碰撞概率最小的信道最好, 即次用户成功传输概率最高的信道最好。下面, 将结合次用户成功传输概率和信道容量 2 个因素研究 OSA 方案。

4.1 有效传输容量

首先, 计算次用户的成功传输 (无碰撞传输) 概率, 即每个信道在时隙 k 中的空闲概率, 这是 MAC 层指标。令 $r(\mathbf{y}, i, k)$ 表示在时隙 k 感知结果为 \mathbf{y} 的条件下信道 i 的空闲概率, 即

$$r(\mathbf{y}, i, k) = \Pr(X_i(t) = 0, \forall t \in I_k | \mathbf{Y}(k) = \mathbf{y}) \quad (3)$$

引入变量 $\varphi(i, k), i \in I_c, k \in N$ 表示在时隙 k 之前信道 i 最后一次被感知的时隙号, 则

$$\varphi(i, k) = k - [(N + k - i) \bmod N] = k - [(N + d - i) \bmod N] \quad (4)$$

其中, $d = k \bmod N$ 为时隙 k 感知的信道号。利用式 (4) 及定理 1,2 可得

$$\begin{aligned} r(\mathbf{y}, i, k) &= \Pr(X_i(t) = 0, \forall t \in I_k | \mathbf{Y}(k) = \mathbf{y}) \\ &= \Pr(X_i(t) = 0, \forall t \in I_k | Y_i(k) = y_i) \\ &= \Pr(X_i(t) = 0, \forall t \in I_k | X_i(\varphi(i, k)T_s) = y_i) \\ &= \Pr(X_i(t) = 0, \forall t \in I_k | X_i(kT_s) = 0, X_i(\varphi(i, k)T_s) = y_i) \cdot \\ &\quad \Pr(X_i(kT_s) = 0 | X_i(\varphi(i, k)T_s) = y_i) \\ &= \Pr(X_i(t) = 0, \forall t \in I_k) \Pr(X_i(kT_s) = 0 | X_i(\varphi(i, k)T_s) = y_i) \\ &= \exp(-\lambda_i T_s) [\exp(\mathbf{Q}_i (k - \varphi(i, k))T_s)]_{(y_i, 0)} \\ &= \exp(-\lambda_i T_s) [\exp(\mathbf{Q}_i ((N + d - i) \bmod N)T_s)]_{(y_i, 0)} \quad (5) \end{aligned}$$

其中, $\Pr(X_i(t) = 0, \forall t \in I_k) = \int_{T_s}^{+\infty} f_{0,i}(t) dt = \exp(-\lambda_i T_s)$ 。

相应地, 次用户在信道 i 上的碰撞概率, 即在时隙 k 中信道 i 上有主用户出现的概率为

$$c(\mathbf{y}, i, k) = \Pr(X_i(t) \neq 0, \exists t \in I_k | \mathbf{Y}(k) = \mathbf{y}) = 1 - r(\mathbf{y}, i, k) \quad (6)$$

然后, 计算次用户在信道 i 上传输时的传输容量 (信道容量), 这是物理层指标。令信道 i 上的功率衰减系数为 g_{0i} (它可以由次用户的信道估计获得), 则时隙 k 中次用户在信道 i 上可获得的传输容量为

$$C(i, k) = \text{lb} \left(1 + \frac{P_0 g_{0i,k}}{P_N} \right) \quad (7)$$

其中, P_0 为次用户的发送功率, $P_N = N_0 B_c$ 为信道加性噪声的功率, $g_{0i,k} = g_{0i}(kT_s)$ 。事实上, 次用户在信道 i 上无碰撞传输时才能获得式 (7) 所述的容

量。因此，给出如下定义。

定义 1 有效传输容量为次用户在信道上无碰撞传输时所获得的传输容量，即

$$C_E(\mathbf{y}, i, k) = r(\mathbf{y}, i, k)C(i, k) = r(\mathbf{y}, i, k) \text{lb} \left(1 + \frac{P_0 g_{0i,k}}{P_N} \right) \quad (8)$$

可以看出，有效传输容量同时反映了物理层和 MAC 性能，因此它是一个跨层性能指标。

4.2 优化模型与 OSA 算法

令 S_k 表示次用户在时隙 k 按某一准则 π 选择接入的信道， $S_k \in A = \{-1\} \cup I_c$ ， $S_k = -1$ 表示没有信道被选中，即次用户无法接入系统。补充规定 $r(\mathbf{y}, -1, k) = 0$ ， $c(\mathbf{y}, -1, k) = 0$ ， $C(-1, k) = 0$ ，于是，当 $S_k = -1$ 时，次用户获得的有效传输容量 $C_E(\mathbf{y}, -1, k) = 0$ 。

假设每个信道在每个时隙被选中的机会相同，则次用户在时隙 k 选择信道 i 接入时的平均碰撞概率为 $\bar{c}(\mathbf{y}, i, k) = c(\mathbf{y}, i, k) \Pr(S_k = i) = (1 - r(\mathbf{y}, i, k)) / N \quad (9)$

给定碰撞概率约束 c_0 ，当 $\bar{c}(\mathbf{y}, i, k) \leq c_0$ 时，认为信道 i 是可接入的。显然，在一定的碰撞概率约束下，有效传输容量越高的信道越好。

于是，基于有效传输容量最大化准则的实时信道选择优化模型可建立为

$$\begin{aligned} & \max_{i \in A} C_E(\mathbf{y}, i, k) \\ & \text{s.t. } \bar{c}(\mathbf{y}, i, k) \leq c_0, \forall \mathbf{y} \in B^N, i \in A, k \in N \end{aligned} \quad (10)$$

其中， c_0 为平均碰撞概率约束，即碰撞概率限值。

显然，式(10)是一个非线性整数优化问题，很难给出一般化的最优解 i^* 。但是，由于信道数为有限整数 N ，因此可以采用遍历的方法找到最优解。于是，对于任一时隙 I_k ，在信道感知活动已经完成的基础上，给出如下的跨层优化 OSA 算法。

step1 初始化。置可用信道标号集合为空，即 $I_c^a = \{\}$ ；置感知结果 \mathbf{y} ，碰撞概率约束 c_0 ，次用户发送功率 P_0 ，信道噪声功率 P_N ，信道功率衰减系数 $g_{0i,k}$ ， $i \in I_c$ 。

step2 遍历查找可用空闲信道。依次从集合 A 中选取信道 i ，分别按式(5)和式(9)计算次用户在信道 i 上的无碰撞概率 $r(\mathbf{y}, i, k)$ 及平均碰撞概率 $\bar{c}(\mathbf{y}, i, k)$ ；若 $\bar{c}(\mathbf{y}, i, k) \leq c_0$ ，将标号 i 加入到 I_c^a 中，并按式(8)计算信道 i 上的有效传输容量 $C_E(\mathbf{y}, i, k)$ 。

step3 信道选择与接入。次用户选择最佳信道

$$i^* = \arg(\max_{i \in I_c^a} C_E(\mathbf{y}, i, k)) \text{ 接入并进行数据传输。}$$

基于上述最优接入算法，OSA 系统次用户可获得的有效传输容量为

$$\begin{aligned} \bar{C}_E &= \frac{1}{K} \lim_{K \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^K E_{\pi, g_{0i}} [C_E(\mathbf{y}, i, k)] = E_{y, \pi, d, g_{0i}} [C_E(\mathbf{y}, i, k)] \\ &= \frac{1}{N} \sum_{d=0}^{N-1} E_{y, \pi, g_{0i}} \left[r(\mathbf{y}, i, d) \text{lb} \left(1 + \frac{P_0 g_{0i,d}}{P_N} \right) \right] \\ &= \frac{1}{N} \sum_{d=0}^{N-1} \sum_{y \in B^N} \left[r(\mathbf{y}, i^*, d) \int_u \text{lb} \left(1 + \frac{P_0 u}{P_N} \right) f_{g_{0i^*}}(u) du \cdot \right. \\ & \quad \left. \Pr(\mathbf{Y}(k) = \mathbf{y}) \Pr(S_k = i^* | \mathbf{Y}(k) = \mathbf{y}) \right] \\ &= \frac{1}{N} \sum_{d=0}^{N-1} \sum_{y \in B^N} f_d(\mathbf{y}) \left[r(\mathbf{y}, i^*, d) \int_u \text{lb} \left(1 + \frac{P_0 u}{P_N} \right) f_{g_{0i^*}}(u) du \right] \end{aligned} \quad (11)$$

其中， $i^* = \arg(\max_{i \in A} C_E(\mathbf{y}, i, k))$ ，接入信道选择准则 $\pi: \Pr(S_k = i | \mathbf{Y}(k) = \mathbf{y}) = 1_{[i=i^*]}, i \in A$ 。由式(10)可以看出，次用户接入任意 $i \neq i^*$ 的信道，均有 $C_E(\mathbf{y}, i, k) \leq C_E(\mathbf{y}, i^*, k)$ ，因此 \bar{C}_E 亦是次用户可获得的最大平均有效传输容量。

5 仿真结果与分析

设定信道数 $N = 10$ ，信道带宽 $B_c = 200\text{kHz}$ 。

不考虑距离引起的传输损耗，仅考虑环境引起的瑞利衰落，令信道 $i(i \in I_c)$ 的功率衰减系数 g_{0i} 服从参数 $\kappa_i = 1$ 的指数分布且各信道彼此独立。信道加性噪声功率 $P_N = -3\text{dBmW}$ ；主业务速率 $\lambda_i = \lambda, \mu_i = \mu$ ；次用户发送功率 $P_0 = 3\text{dBmW}$ ；仿真时长为 10 240 个时隙。对 200 次试验结果取平均，得到如图 2~图 5 所示的仿真结果，图中业务速率以 s^{-1} 为单位。

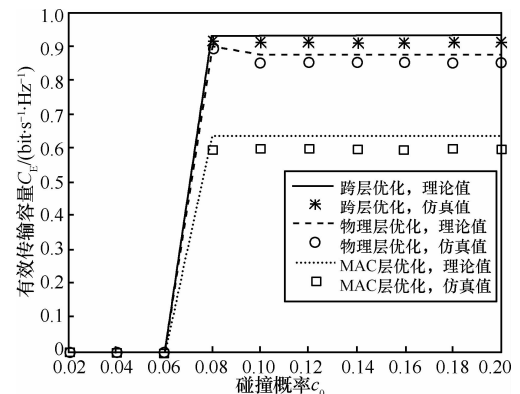


图 2 3 种 OSA 算法性能比较 ($\lambda = 1000, \mu = 2000$)

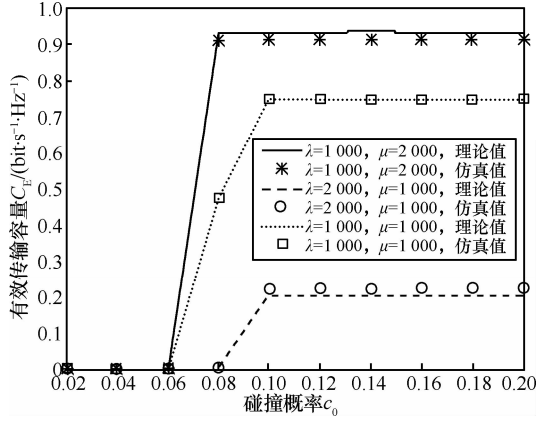


图 3 \bar{C}_E 与 c_0 的关系

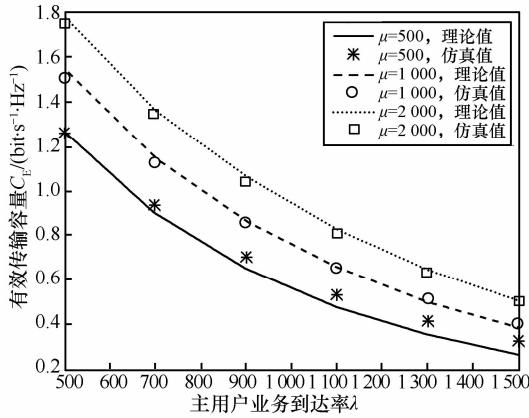


图 4 \bar{C}_E 与 λ 的关系 ($c_0 = 0.1$)

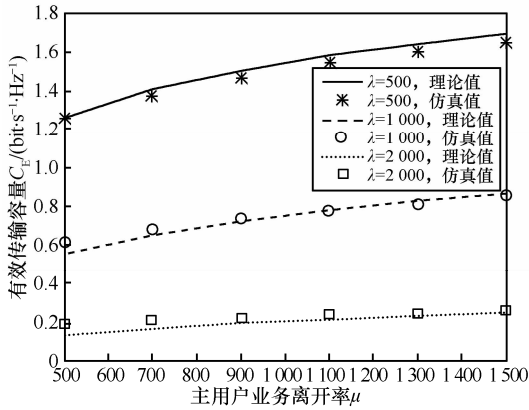


图 5 \bar{C}_E 与 μ 的关系 ($c_0 = 0.1$)

图 2 比较了跨层优化 OSA 算法与 2 种单层优化 OSA 算法的性能, 其中, 物理层优化是以最大化式 (7) 所示的信道容量为准则, 而 MAC 层优化是以最大化式 (5) 所示的次用户成功传输概率为准则。可以看出, 在相同的主业务速率及碰撞概率约束下, 采用跨层优化时次用户获得的平均有效传输容量最高, 物理层优化次之, 采用 MAC 层优化时有效传输容量最低。因此, 跨层优化 OSA 方案

性能最好。但无论采用何种优化方案, 当 $c_0 \leq 0.06$ 时, 次用户可获得的有效传输容量 $\bar{C}_E = 0$; 而当 $c_0 > 0.08$ 时, 有效传输容量基本稳定, 这表明 c_0 对次用户可获得的有效传输容量具有开关约束效应。

图 3~图 5 研究了跨层优化 OSA 算法性能与各参数间的关系。图 3 给出了次用户可获得的有效传输容量与碰撞概率约束 c_0 的关系。可以看到, 主业务速率的比值 λ/μ 影响 c_0 对有效传输容量 \bar{C}_E 的开启点 c_0^* 。当 $\lambda/\mu = 0.5$ 时, $c_0^* = 0.06$, 而当 $\lambda/\mu = 2$ 时, $c_0^* = 0.08$, 即 λ/μ 越小, c_0^* 越低。当 $c_0 > c_0^*$ 时, \bar{C}_E 随 c_0 的提高而快速增加并很快趋于稳定。图 4 和图 5 研究了有效传输容量 \bar{C}_E 与主业务到达率 λ 和离开率 μ 的关系。图 4 表明, \bar{C}_E 是 λ 的减函数, 随 λ 的提高而下降。相反, \bar{C}_E 是 μ 的增函数, 随 μ 的提高而上升, 如图 5 所示。这意味着, λ/μ 越低, 次用户在每个时隙的成功传输概率越高, 可获得的有效传输容量越大。

上述仿真结果证明了所提出算法的有效性与优越性, 亦说明了理论分析的正确性。

6 结束语

本文研究了 OSA 系统的接入优化问题, 在对次用户感知活动建模分析的基础上, 提出了有效传输容量这一跨层性能指标, 并基于该指标提出了一种跨层优化 OSA 算法。理论和仿真结果表明, 所提出的算法性能优于单层优化接入算法, 它可以为次用户提供更高的有效传输容量。

附录 A 定理 1 的证明

$\forall t_{k+1} > t_k > \dots > t_0 > 0$, 由系统模型可知

$$\begin{aligned} \Pr(X_i(t_{k+1}) = x_{k+1} | X_i(t_k) = x_k, \dots, X_i(t_0) = x_0) \\ = \Pr(X_i(t_{k+1}) = x_{k+1} | X_i(t_k) = x_k) \end{aligned} \quad (12)$$

即信道 i 在某时刻的状态仅与其前一时刻的状态有关。而 $X_i(t) \in \mathcal{B}$, 所以 $X_i(t)$ 为二状态连续时间马尔可夫过程, 其状态转移速率取决于主业务的到达率和离开率, 即

$$q_{01}^i = \lambda_i, q_{10}^i = \mu_i, q_{11}^i = q_{00}^i = \mu_i \quad (13)$$

其中, $q_{mn}^i, m, n \in \mathcal{B}$ 表示信道 i 由状态 m 到状态 n 的转移速率。于是, 信道 i 的转移速率矩阵为

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} -q_{00}^i & q_{01}^i \\ q_{10}^i & -q_{11}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_i & \lambda_i \\ \mu_i & -\mu_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

下面求解 $X_i(t)$ 的转移概率。令 $p_{mn}^i(t)$, $m, n \in B$ 表示信道 i 在时刻 t 从状态 m 到状态 n 的转移概率, 则状态转移概率矩阵 $\mathbf{P}_i(t) = \begin{bmatrix} p_{00}^i(t) & p_{01}^i(t) \\ p_{10}^i(t) & p_{11}^i(t) \end{bmatrix}$ 。由柯尔莫哥洛夫方程^[11]可知

$$\mathbf{P}'_i(t) = \mathbf{P}_i(t)\mathbf{Q}_i \quad (15)$$

初始条件

$$p_{mm}^i(0) = 1, p_{mn}^i(0) = 0, m \neq n \quad (16)$$

解之, 得到 $\mathbf{P}_i(t) = \exp(\mathbf{Q}_i t)$ 。另一方面, 将式(15)展开可得

$$p_{mn}^{i'} = \sum_{k \in B, k \neq n} p_{mk}^i q_{kn}^i - p_{mn}^i q_{nn}^i \quad (17)$$

令 $m = n = 0$, 将概率归一化条件 $\sum_{k \in B} p_{mk}^i = 1$ 代入式(17)并化简, 得到

$$p_{00}^{i'} + (\lambda_i + \mu_i)p_{00}^i = \mu_i \quad (18)$$

利用初始条件 $p_{00}^i(0) = 1$ 求解式(18), 得到

$$p_{00}^i(t) = 1 - \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} (1 - \exp(-(\lambda_i + \mu_i)t))$$

$$p_{01}^i(t) = 1 - p_{00}^i(t) = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} (1 - \exp(-(\lambda_i + \mu_i)t)) \quad (19)$$

同理, 可得

$$p_{11}^i(t) = 1 - \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} (1 - \exp(-(\lambda_i + \mu_i)t))$$

$$p_{10}^i(t) = 1 - p_{11}^i(t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} (1 - \exp(-(\lambda_i + \mu_i)t)) \quad (20)$$

于是, $X_i(t)$ 的状态转移概率矩阵为

$$\mathbf{P}_i(t) = \exp(\mathbf{Q}_i t)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 - \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} (1 - \exp(-(\lambda_i + \mu_i)t)) & \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} (1 - \exp(-(\lambda_i + \mu_i)t)) \\ \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} (1 - \exp(-(\lambda_i + \mu_i)t)) & 1 - \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} (1 - \exp(-(\lambda_i + \mu_i)t)) \end{bmatrix} \quad (21)$$

令系统稳定时信道 i 处于 0 状态和 1 状态的概率分别为 $v_i(0)$ 和 $v_i(1)$, 则

$$v_i(0) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr(X_i(t) = 0) = \lim_{t \rightarrow \infty} p_{m0}^i(t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i}$$

$$v_i(1) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr(X_i(t) = 1) = \lim_{t \rightarrow \infty} p_{m1}^i(t) = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21), 得到

$$\mathbf{P}_i(t) = \exp(\mathbf{Q}_i t) = \begin{bmatrix} 1 - v_i(1)(1 - e^{-(\lambda_i + \mu_i)t}) & v_i(1)(1 - e^{-(\lambda_i + \mu_i)t}) \\ v_i(0)(1 - e^{-(\lambda_i + \mu_i)t}) & 1 - v_i(0)(1 - e^{-(\lambda_i + \mu_i)t}) \end{bmatrix} \quad (23)$$

定理 1 证毕。

附录 B 定理 2 的证明

由系统模型可知, 在时隙 $k+1$ 仅信道 $d' = (k+1) \bmod N$

的状态被感知, 且本次感知距上次感知的时差为 NT_s 时间。因此, 对于信道 $i = d'$, 有

$$\Pr(Y_{d'}(k+1) = y_{d'}' | Y_{d'}(k) = y_{d'})$$

$$= \Pr(X_{d'}((k+1)T_s) = y_{d'}' | X_{d'}((k+1-N)T_s) = y_{d'})$$

$$= \mathbf{P}_{d'}(NT_s) = \exp(\mathbf{Q}_{d'} NT_s)_{[y_{d'}', y_{d'}']} \quad (24)$$

其中, $\exp(\mathbf{Q}_{d'} NT_s)_{[y_{d'}', y_{d'}']}$ 表示信道 d' 经过时间 NT_s 从状态 $y_{d'}$ 到 $y_{d'}'$ 的转移概率。若信道 $i \neq d'$, 则 $Y_i(k+1) = Y_i(k)$, 于是

$$\Pr(Y_i(k+1) = y_i' | Y_i(k) = y_i) = 1 \quad (25)$$

所以, 当信道 d' 被感知且 $\forall i \in I_c, i \neq d', Y_i(k+1) = Y_i(k)$

时, $\mathbf{Y}(k)$ 的转移概率为

$$\Pr(\mathbf{Y}(k+1) = \mathbf{y}' | \mathbf{Y}(k) = \mathbf{y}) = \prod_{i=0}^{N-1} \Pr(Y_i(k+1) = y_i' | Y_i(k) = y_i)$$

$$= \Pr(Y_{d'}(k+1) = y_{d'}' | Y_{d'}(k) = y_{d'}) = \exp(\mathbf{Q}_{d'} NT_s)_{[y_{d'}', y_{d'}']} \quad (26)$$

当 $\exists i \neq d', i \in I_c$ 使得 $Y_i(k+1) \neq Y_i(k)$ 时, $\mathbf{Y}(k)$ 的转移概率为 0, 即

$$\Pr(\mathbf{Y}(k+1) = \mathbf{y}' | \mathbf{Y}(k) = \mathbf{y}) = 0 \quad (27)$$

综上所述, $\mathbf{Y}(k)$ 的转移概率为

$$\Pr(\mathbf{Y}(k+1) = \mathbf{y}' | \mathbf{Y}(k) = \mathbf{y}) = \begin{cases} [\exp(\mathbf{Q}_{d'} NT_s)]_{[y_{d'}', y_{d'}]}, & y_i' = y_i, \forall i \neq d' \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

定理 2 证毕。

附录 C 定理 3 的证明^[7]

$\forall c \in N^+, d \in I_c$, 基于定理 2, 可以得到

$$\Pr(\mathbf{Y}(cN + d + N) = \mathbf{y}_N | \mathbf{Y}(cN + d) = \mathbf{y}_0)$$

$$= \Pr(\mathbf{Y}(cN + d + N) = \mathbf{y}_N | \mathbf{Y}(cN + d) = \mathbf{y}_0,$$

$$\mathbf{Y}(cN + d + 1) = \mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{Y}(cN + d + (N-1)) = \mathbf{y}_{N-1})$$

$$= \prod_{i=0}^{N-1} \Pr(Y(cN + d + i + 1) = y_{i+1} | \mathbf{Y}(cN + d + i) = \mathbf{y}_i)$$

$$= \prod_{i=0}^{N-1} [\exp(\mathbf{Q}_i NT_s)]_{[y_{i+1}, y_{i+1}]} \quad (29)$$

显然, $\Pr(\mathbf{Y}(cN + d + N) = \mathbf{y}_N | \mathbf{Y}(cN + d) = \mathbf{y}_0) > 0$; 而 $\mathbf{Y}(cN + d) \in B^N$, 这意味着 $\mathbf{Y}(cN + d)$ 的任意 2 个状态均为可达的, 即 $\mathbf{Y}(cN + d)$ 是非周期、不可约的马尔可夫过程。因此, $\mathbf{Y}(k)$ 是周期为 N 的马尔可夫过程。

由定理 1 可知, $\forall i \in I_c, x \in B$, 信道 i 的稳态分布 $v_i(x) = \mathbf{1}_{[x=0]} v_i(0) + \mathbf{1}_{[x=1]} v_i(1)$ 。考虑到各信道的独立性, 随机过程 $\mathbf{Y}(cN + d)$ 的稳态分布为

$$f_d(\mathbf{y}) = \Pr(\mathbf{Y}(cN + d) = \mathbf{y})$$

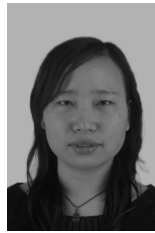
$$= \prod_{i=0}^{N-1} v_i(y_i) = \prod_{i=0}^{N-1} (\mathbf{1}_{[y_i=0]} v_i(0) + \mathbf{1}_{[y_i=1]} v_i(1)) \quad (30)$$

其中, 其中 $I_{\{ \cdot \}}$ 为判断函数, 当 $\{ \cdot \}$ 成立时取 1, 否则取 0。定理 3 证毕。

参考文献:

- [1] FEDERAL C C. Spectrum policy task force report[EB/OL]. http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DOC-228542A1.pdf, 2002
- [2] MCHENRY M. Spectrum white space measurements[EB/OL]. http://www.newamerica.net/Download_Docs/pdfs/Doc_File_185_1.pdf, 2003.
- [3] CABRIC D, O'DONNELL I D, CHEN M S W, *et al.* Spectrum sharing radios[J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2006, 6(2): 30-45.
- [4] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [5] ZHAO Q, SADLER B M. A survey of dynamic spectrum access: signal processing, networking, and regulatory policy[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79-89.
- [6] ZHAO Q, TONG L, 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] ZHAO Q C, GEIRHOFER S, TONG L, *et al.* Opportunistic spectrum access via periodic channel sensing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(2): 785-796.
- [8] GHASEMI A, SOUSA E S. Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(2): 649-658.
- [9] MUSAVIAN L, AISSA S. Capacity and power allocation for spectrum-sharing communication in fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(1):148-156.
- [10] BAN T W, CHOI W, JUNG B C, *et al.* Multi-user diversity in a spectrum sharing system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(1): 102-106.
- [11] 刘次华. 随机过程(第二版)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
LIU C H. Stochastic Processes (Second Edition)[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001.

作者简介:



张晶(1980-), 女, 湖北襄樊人, 南京邮电大学博士生, 主要研究方向为认知无线电技术、无线频谱资源管理和宽带无线技术。



朱洪波(1956-), 男, 江苏扬州人, 南京邮电大学物联网研究院院长、教授、博士生导师、副校长, 主要研究方向为泛在无线通信与物联网技术、宽带无线通信、无线通信与电磁兼容。