

认知无线电中的功率和频谱联合分配算法

刘玉涛, 谭学治, 刘 帅

(哈尔滨工业大学 通信技术研究所, 150080 哈尔滨, abcqly@gmail.com)

摘 要: 在认知用户传输功率受限的情况下, 分析了瑞利衰落模型下的认知用户效用及其优化过程, 提出了基于注水线不断调整的认知用户功率分配及通信效用计算算法. 将该算法应用到认知无线电频谱分配中, 进而提出了一种基于信道二分法的认知无线电频谱分配机制, 以此得到了不同优化模型下的用户效用. 仿真表明, 基于比例公平的优化模型在获得较高效用的同时具有较高的公平性.

关键词: 认知无线电; 效用函数; 注水线; 分配模型; 二分法

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)01-0036-05

Joint power and spectrum allocation algorithm in cognitive radio networks

LIU Yu-tao, TAN Xue-zhi, LIU Shuai

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China, abcqly@gmail.com)

Abstract: Under the constraints of transmission power of the cognitive users, the optimization process of cognitive users' utility was analyzed with Rayleigh Fading model, and then an algorithm based on water-level continually adjustment was proposed to solve the problem of power allocation and communication utility computation. This algorithm was also applied to spectrum allocation, so that a cognitive radio spectrum allocation mechanism based on channel bisection was proposed too. From this, the users' utility under different optimization models could be obtained. Simulation results show that the model based on proportional fairness not only provide fair spectrum allocation, but also has a higher total utility.

Key words: cognitive radio; utility function; water-level; allocation model; bisection method

现有的频谱授权机制多采用固定的频谱分配, 使得频谱利用率低下^[1]. 认知无线电具有在不影响其他授权用户的前提下智能地利用大量频谱空穴并且实现随时随地、高可靠性通信的潜能, 因此被认为是解决无线频谱低利用率问题的最佳方案^[2-3].

频谱资源的再分配以及认知用户的通信效用问题是认知无线电中的核心问题. 针对认知无线电中的频谱分配, Manitoba 大学的研究小组^[4]提出了一个动态博弈模型, 认知用户可以根据频谱需求反复的调整自身的策略, 最终得到稳定的均衡状态; Huang 等^[5]将博弈论中的拍卖机制应用到分布式频谱共享中, 并得到了纳什均衡; 基于颜

色敏感的图论着色算法可以把认知无线电中的频谱分配问题简化为一个图的多色问题, 最终解决认知网络的拓扑结构和信道有效性问题, 这是一种静态频谱分配中的最优方案^[6-7]. 以上这些算法与机制均未考虑实际系统中的通信效用问题, 本文基于认知用户的通信效用, 根据注水线调整算法, 提出了一种基于二分法的认知无线电频谱分配算法, 并运用该算法解决不同优化模型下的信道分配问题.

1 系统模型及假设

1.1 认知无线电系统模型

考虑 1 个认知用户和授权用户同时存在的无线通信网络, 授权用户系统工作在较宽的频段上, 其暂时未使用的频谱组成 1 个频谱共享池^[3]. 假设共享池中的频谱总带宽为 F , 且可等分为 N 条相互正交的信道, 授权用户将这些信道出让给认

收稿日期: 2009-12-31.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2008AA12Z305).

作者简介: 刘玉涛(1981—), 男, 博士研究生;

谭学治(1957—), 男, 教授, 博士生导师.

知用户并从中收取一定的价格. 认知用户通过竞争/合作的方式, 根据信道的相关参数(带宽、信道增益等)选取所需信道, 最终获得一定的通信效用.

假设认知用户采用 x -QAM 方式实现自适应调制, 则其误码率要求可以认为是调制方式与山农容量之间的信噪比差异. 本文中主要考虑瑞利衰落信道, 其误码率可以表示为^[8]

$$E_{\text{BER}} \approx 0.2 \exp(-1.5\gamma/(2^K - 1)).$$

其中 γ 表示接收机信噪比; K 为所用调制方式的频带利用率, 它是关于误码率门限值的函数.

1.2 最优化问题

认知无线电中的频谱分配通常需要解决下述的最优化问题^[7, 9].

模型 I 最大化用户总效用. 其目的是使系统总效用最大化, 而不考虑认知用户的个体效用,

$$\text{可以表示为 } U = \sum_{i=1}^M U_i.$$

模型 II 最大化瓶颈用户效用. 其目的是使得认知用户网络中效用最小的用户的效用最大化, 即不允许出现若干认知用户得不到频谱的极端情况出现, 具体可以表示为 $U = \min_i U_i$.

模型 III 最大化比例公平. 在保证认知用户之间公平性的同时, 亦不会使系统的总效用降低太多, 可以表示为 $U = \sum_{i=1}^M \log_{10} U_i = \log_{10}(\prod_{i=1}^M U_i)$.

2 认知用户的通信效用

2.1 效用函数

设 $w_{i,j}$ 表示第 j 条信道是否被认知用户 i 所占, $w_{i,j} \in \{0, 1\}$; 假设认知用户以排他的形式使用授权用户的信道, 即 $w_{m,j}w_{n,j} = 0$, 其中 $m \neq n$, 且 $m, n \in \{1, 2, \dots, M\}$, M 为认知用户数. 当信道 j 被认知用户 i 使用时, 其频谱效用可以表示为

$$k_{i,j} = \log_2(1 + K\gamma_{i,j}). \quad (1)$$

其中: $\gamma_{i,j} = p_{i,j} |H_{i,j}|^2 / b\sigma_0^2$ 为认知用户 i 在信道 j 上的信噪比, $p_{i,j}$ 为用户 i 在信道 j 上的发射功率, $|H_{i,j}|^2$ 为信道 j 对于用户 i 的信道增益, b 为信道 j 的带宽且 $b = F/N$, σ_0^2 为单位带宽上的噪声功率.

假设认知用户的信道增益可以表示为

$$H_{i,j} = \beta_{i,j} \kappa_i (d_0/d)^\delta.$$

其中: $\beta_{i,j}$ 为认知用户 i 对载波 j 的偏好参数, 与载波的频率等有关; $\kappa_i = \lambda/4\pi d_0$ 为用户天线在 d_0 处的自由空间增益, λ 为载波波长, d_0 为天线远场的参考距离; d 为认知用户收发机之间的距离, 设 d 相同; δ 为路径损耗参数.

由式(1)可得, 用户 i 的效用为

$$U_i = R_i = \sum_{j=1}^N w_{i,j} b \log_2(1 + K p_{i,j} |H_{i,j}|^2 \sigma^{-2}). \quad (2)$$

其中: R_i 为用户 i 的传输速率, 与效用 U_i 可替换;

$\sum_{j=1}^N p_{i,j} \leq P_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, M\}; \sum_{i=1}^M w_{i,j} \leq 1, \forall j \in \{1, 2, \dots, N\}; \sigma^2 = b\sigma_0^2; P_i$ 为认知用户 i 的功率容限.

2.2 注水线调整算法

当所有的 N 条信道均分配给用户 1 使用时, 需要找到 1 种合理的功率分配方案, 使 U_1 达到最优. 这时, 式(2)所示的效用函数可更新为

$$U_1 = b \sum_{j=1}^N \log_2(1 + K p_{1,j} |H_{1,j}|^2 \sigma^{-2}). \quad (3)$$

其中: $\sum_{j=1}^N p_{1,j} \leq P_1, P_1$ 为认知用户 1 的功率容限.

由 KKT 条件可得拉格朗日方程为

$$L(p_{1,j}) = b \sum_{j=1}^N \log_2(1 + K \cdot p_{1,j} |H_{1,j}|^2 / \sigma^2) - \lambda \left(\sum_{j=1}^N p_{1,j} - P_1 \right).$$

其中 λ 为拉格朗日因子. 方程 $L(p_{1,j})$ 对 $p_{1,j}$ 求导后

$$p_{1,j} = \max\{0, \theta - \sigma^2/K |H_{1,j}|^2\}. \quad (4)$$

其中 $\theta = b/\lambda \ln 2$ 为注水线.

由式(3)和(4)可知, 当信道增益、接收端误码率等已知时, 用户的效用函数仅取决于 θ 的大小. 因此, 在满足功率限制条件的前提下, 可通过动态的调整 θ 值, 从而获得最优的认知用户效用.

显然, 在可能的情况下, θ 越大, 可以获得的认知用户效用会越大. 在算法的每一阶段, 注水线可以根据下式进行调整:

$$\theta \leftarrow \theta + \alpha \cdot N_{\text{on}}^{-1} \cdot (P_1 - \sum_{j=1}^N p_{1,j}). \quad (5)$$

其中 $0 < \alpha < 1$ 为注水线调整因子, α 越大收敛速度也越快. 但当 α 较大时, 可能在 θ 调整过程中会

导致 $\sum_{j=1}^N p_{1,j} > P_1$, 所以在运算开销允许的情况下

应取较小的 α 值; N_{on} 表示该用户实际拟采用的信道数. 当所有的信道均被占用时, 由 $\sum_{j=1}^N p_{1,j} \leq P_1$ 可得注水线的初始值为

$$\theta = N^{-1} (P_1 + (\sigma^2/K) \sum_{j=1}^N |H_{1,j}|^{-2}).$$

由此可得表 1 所示的最优效用算法.

表 1 基于注水线调整的认知用户效用计算算法

步骤	方法
1) 输入	(a) 总功率 P_1 ; (b) 信道状态 $ H_{1,j} ^2$; (c) 频谱带宽 F ; (d) 信道总数 N . $N_{on} = 0$; $num = 0$; $Num_Iter = 0$; $\theta = N^{-1}(P_1 +$
2) 初始化	$(\sigma^2/K) \sum_{j=1}^N H_{1,j} ^{-2})$ (a) 当 $j = 1, 2, \dots, N$ 时, 分别计算该用户在每个信道上的发射功率 $p_{1,j}$ 以及相应的效用函数 u , 若 $p_{1,j} \neq 0$, 则令 $num = num + 1$; (b) 按照 $N_{on} = num$ 更新 N_{on} 的值;
3) 循环	(c) 如果满足 $\sum_{j=1}^N p_{1,j} \leq P_1$, 且 $P_1 - \sum_{j=1}^N p_{1,j} < \varepsilon$ 时则停止循环, 同时给相应的信道 j 分配传输功率 $p_{1,j}$, u 即为该用户的最优效用; 反之, 则根据式 (5) 对注水线进行相应的调整, 同时置 $num = 0$, 然后返回步骤 1);
4) 输出	(a) 用户效用; (b) 使用信道 N_Used .

3 频谱分配

考虑 $M = 2$, 即只有 2 个认知用户时的情况. 对于模型 II, 博弈的最终结果是两个认知用户获得相同的效用, 即 $U_1 = U_2$. 对于模型 I 和模型 III, 通过认知用户之间的博弈, 最终可得信道及其功率的分配情况, 进而得到其各自的效用. 博弈的困难在于如何将频谱共享池中的信道在认知用户 1 和 2 之间合理的分配以实现相应的目标.

定义信道增益函数 $g_{i,j}$, 使其满足 $g_{i,j} = |H_{i,j}|^2/\sigma^2$, 其中 $i = 1, 2$ 分别表示认知用户 1 和 2. 对于上述的博弈困难, 提出了一种基于“二分法”的频谱分配算法, 其基本原理为: 根据信道增益函数 $g_{i,j}$, 对全部 N 条信道按照 $g_{1,j}^{\tau_1}/g_{2,j}^{\tau_2}$ 的降序排列, 其中 τ_1 和 τ_2 为模型 III 情况下的排序影响因子, 根据其优化目标取 $\tau_1 = 1/U_1, \tau_2 = 1/U_2$. 这样一来, 在排序后的信道上, 对用户 1 而言, 随信道序号 (排序后) 的增加其频谱效用逐渐降低; 用户 2 则正好相反. 因此, 把前 L 条信道分配给用户 1 使用, 后 $N - L$ 条信道分配给用户 2 使用. 采用逐一寻找的方法得到 L 的取值: 分别计算 $L = 1, 2, \dots, N - 1$ 时的用户效用及模型效用, 比较之后取模型效用最优时的 L 值. 具体流程如图 1.

定理 1 当认知用户 1 和 2 在频谱共享池中的所有信道上的信噪比 $R_{SN} > 1$ 时, “基于信道二分法的频谱分配算法”对于模型 I 和模型 III 是接近最优的, 而且必存在 1 个可行的信道分配方案.

证明 由前面的分析可知, $R_{SNi,j} = p_{i,j} \cdot g_{i,j}$. 在文献[10]中, 作者证明了当 $R_{SN} > 1$ 时, 最优子

信道分划可以使传输速率 $\alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2$ 最大化, 其中 R_1 和 R_2 分别对应本文中的认知用户效用函数 U_1 和 U_2 , α_1 和 α_2 分别表示与用户优先级有关的参数, 对应到本文中有 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, 因此模型 I 所述的 $U = U_1 + U_2$ 的最优化问题成立.

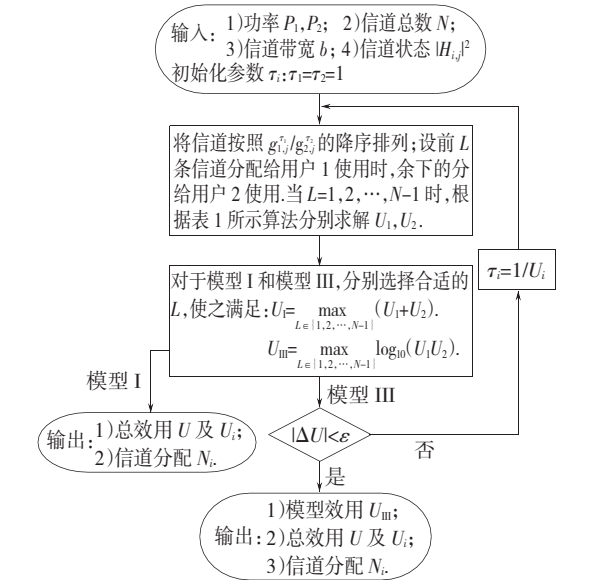


图 1 信道分配流程图

对于模型 III, 优化目标变为 $U = \log_{10} U_1 + \log_{10} U_2$, 这时根据 KKT 条件可得拉格朗日方程

$$L = \left(\sum_{j=1}^N bw_{1,j} \log_2(1 + K \cdot p_{1,j} |H_{i,j}|^2/\sigma^2) \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^N bw_{2,j} \log_2(1 + K \cdot p_{2,j} |H_{i,j}|^2/\sigma^2) \right) - \sum_{i=1}^2 \lambda_i \left(\sum_{j=1}^N p_{i,j} - P_i \right) - \sum_{j=1}^N \zeta_j \left(\sum_{i=1}^2 w_{i,j} - 1 \right). \quad (6)$$

其中 λ_i, ζ_j 为拉格朗日因子. 将式 (6) 分别对 $w_{1,j}$ 和 $w_{2,j}$ 求偏导后可得

$$\frac{\log_2(1 + K \cdot p_{1,j} |H_j|^2 \sigma^{-2})}{\sum_{j=1}^N bw_{1,j} \log_2(1 + K \cdot p_{1,j} |H_j|^2 \sigma^{-2})} = \frac{\log_2(1 + K \cdot p_{2,j} |H_j|^2 \sigma^{-2})}{\sum_{j=1}^N bw_{2,j} \log_2(1 + K \cdot p_{2,j} |H_j|^2 \sigma^{-2})} \quad (7)$$

对于离散函数 $w_{i,j}$, 根据上述“基于注水线调整的功率分配算法”, 可以得到最终的功率分配以及用户的效用函数. 定义权重因子 τ_i 为

$$\tau_i = \begin{cases} \left(\sum_{j=1}^N bw_{1,j} \log_2(1 + K \cdot p_{1,j} |H_{i,j}|^2 \sigma^{-2}) \right)^{-1}, \\ \sum_{j=1}^N bw_{1,j} \log_2(1 + K \cdot p_{1,j} |H_{i,j}|^{-2} \sigma^{-2}) \geq \varepsilon; \\ \varepsilon, 0 < \sum_{j=1}^N bw_{1,j} \log_2(1 + K \cdot p_{1,j} |H_{i,j}|^2 \sigma^{-2}) < \varepsilon. \end{cases} \quad (8)$$

其中 ε 为一个很小的正实数,则由式(4),(6)~(8)可得

$$\begin{aligned} \tau_1(\log_2(\lambda_1^{-1} \cdot g_{1,j}^{-1}) + \lambda_1 \cdot g_{1,j} - 1) = \\ \tau_2(\log_2(\lambda_2^{-1} \cdot g_{2,j}^{-1}) + \lambda_2 \cdot g_{2,j} - 1). \end{aligned} \quad (9)$$

当所有的信道均分配给认知用户 1 时, $w_{1,j} = 1$, $w_{2,j} = 0$, 因此式(9)的左边恒大于右边. 比较式(9)的左右两边,可得函数 G 为

$$\begin{aligned} G(g_{1,j}^{\tau_1}/g_{2,j}^{\tau_2}) = \log_2(g_{1,j}^{\tau_1}/g_{2,j}^{\tau_2}) + \\ \log_2(\lambda_2^{\tau_2}/\lambda_1^{\tau_1}) + \tau_2 - \tau_1. \end{aligned}$$

这样一来,当 $G > 0$ 时,信道分配给认知用户 1; 当 $G < 0$ 时,信道分配给认知用户 2; 当 $G = 0$ 时,信道处于空闲状态,即并未分配给任何用户使用. 当所有的信道按照 $g_{1,j}^{\tau_1}/g_{2,j}^{\tau_2}$ 的降序排列时,函数 $G(g_{1,j}^{\tau_1}/g_{2,j}^{\tau_2})$ 是 j 的单调函数,所以定理 1 成立.

当认知用户的数目较多时,可以先把用户分成 2 部分,每一部分称为 1 个共谋圈,对于这 2 个共谋圈,可以按照“基于二分法的频谱分配算法”对其进行信道分配;然后对各个共谋圈内的用户再进行进一步的分组、分配,直至每个用户均分配到相应的信道为止.

4 仿真结果分析

4.1 参数设置

设 $F = 2$ MHz, $N = 100$; 当 $M = 2$ 时,设其中认知用户 1 的传输功率门限 $P_1 = 20$ mW, 用户 2 的传输功率门限值 P_2 在区间 $[1, 40]$ mW 上变化. 同时假设每条信道上的背景噪声功率均为 $\sigma^2 = 10^{-11}$ W, 认知用户接收端的比特误码率同为 $E_{\text{BER}} = 10^{-4}$. 假设认知用户收发机之间的距离为 1 km, $d_0 = 100$ m. 仿真过程中,取注水线调整因子 $\alpha = 0.4$, 路径损耗参数 $\delta = 3$.

4.2 性能分析

1) 用户效用及总效用. 首先分析算法得到的各种优化模型下的通信效用. 主要分析模型 I 和 III 的性能,这是由于当某一用户的功率门限大范围波动时对模型 II 性能的评价没有意义. 如图 2 所示,随着 P_2 的增加,用户 1 的效用逐渐降低,这是由于用户 2 分得的信道逐渐增多. 理论分析表明,由于用户之间采用完全合作的方式,模型 I 的系统总效用是最优的,模型 III 中用户之间的效用相对于模型 I 有了较大程度的折衷,但这在一定程度上带来了系统总效用的下降,如图 3 所示. 不同用户在不同模型下的效用曲线有 1 个共同的交点,但交点不在 $P_1 = P_2$ 处,这是由于用户 1 和用户 2 在对不同信道的偏好参数有所差异造成的.

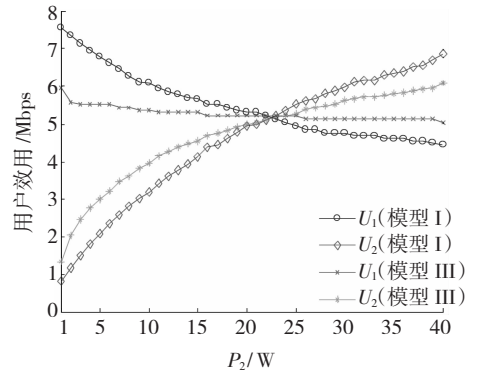


图 2 用户效用与 P_2 的关系曲线

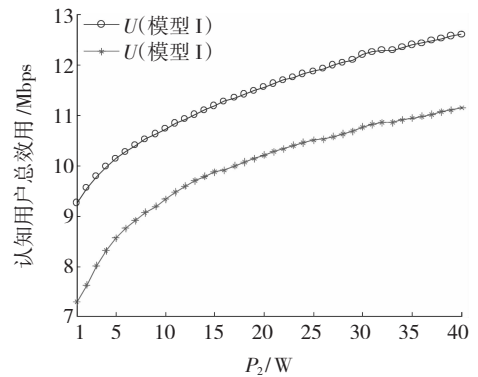


图 3 总效用与 P_2 的关系曲线

2) 用户信道使用情况. 由于以最大化比例公平效用为目标,所以相对于模型 I 而言,当 P_2 大范围波动时模型 III 亦能够保证用户之间的信道分配相对均匀性,如图 4 所示,但这是以牺牲部分系统总效用为代价的,可以说是“以效用换公平”. 由图可知,当 $P_1 = 20$ mW, P_2 的取值范围为 $[25, 40]$ mW 时,用户 1 和用户 2 在模型 III 下各自能够分得信道总数的一半. 相对于模型 I 和 III,模型 II 以最大化瓶颈用户效用为目标,其结果是两个用户的最终效用总相同(分得信道可能会不同). 对 3 种模型的公平性分析如图 5 所示.

3) 信道变化时的用户效用. 当 $P_1 = 2P_2 = 20$ mW, 可用信道 N 取值为 $[10, 200]$ 的范围时,如图 6 所示,对于模型 I~III, 用户的效用均成递增状态,但趋势逐渐减缓(山农容量限制). 模型 II 中 2 个用户的效用一直相同,但相对于其它 2 种模型,其总效用是最低的. 模型 III 有效地实现了用户之间公平性和通信效用的折衷,因此在实际的认知无线网络中具有较大的应用前景.

4) 认知用户数变化时的系统效用. 当 $P_1 = 2P_2 = 20$ mW, 而认知用户数逐渐增加时,3 种模型下的系统总效用均有不同程度的增加,如图 7 所示,这说明,随着 M 的增加,频谱使用效率越来越高,当 M 足够大时,会逐渐出现可用信道不能

满足用户需求的情况. 从图中还可以看出, 随着 M 的增加, 模型 III 的总效用逐渐向模型 I 逼近, 这从另一个方面说明了模型 III 的优越性.

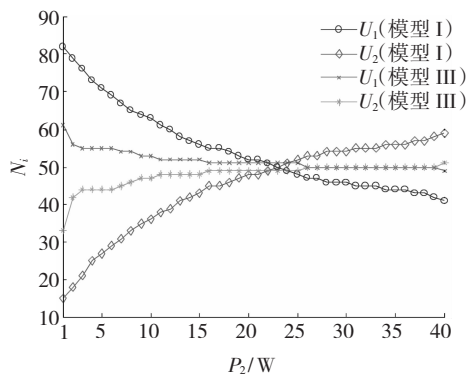


图 4 用户信道与 P_2 的关系曲线

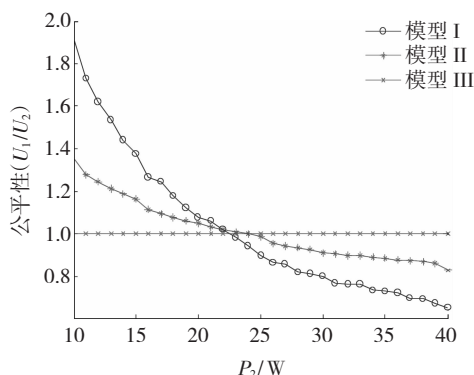


图 5 公平性与 P_2 的关系曲线

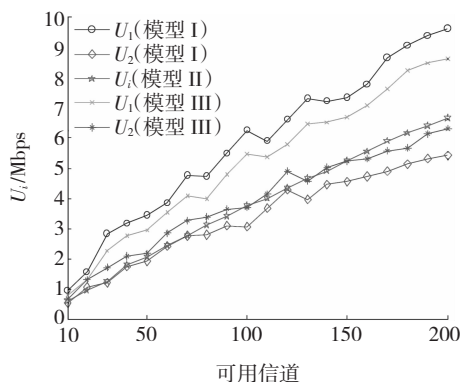


图 6 用户效用与 N 的关系曲线

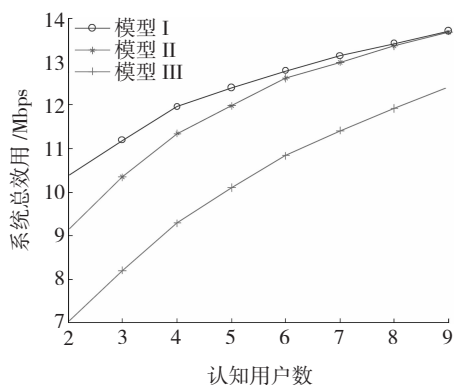


图 7 系统总效用与 M 的关系曲线

5 结 论

本文针对认知无线电中的频谱分配问题, 提出了一种基于信道二分法的频谱分配机制, 并详细分析了算法的有效性和以及信道分割点的存在性, 依次解决了不同优化模型下认知用户的通信效用问题. 由于研究过程中采用了基于注水线调整的认知用户通信效用计算算法, 所以用户在分得的信道上具有接近于最优算法的功率分配, 从而保证了系统效用的最优性. 最后通过仿真分析得到了各种优化模型下的用户效用及系统总效用, 证明了模型 III 的优越性.

参考文献:

- [1] DANIJELA C, MUBARAQ M S, BRODERSEN R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios [C]//Conference Record-Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove: IEEE CS, 2004: 772 - 776.
- [2] AKYILDIZ I F, LEE W, VURAN M C, *et al.* Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey [J]. Computer Networks, 2006, 50(13): 2127 - 2159.
- [3] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Area in Communication, 2005, 23(2): 201 - 220.
- [4] WANG W, LIU X. List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks [C]//2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC). Dallas: IEEE Communications Society Press, 2005: 690 - 694.
- [5] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7): 2651 - 2660.
- [6] PENG Chunyi, ZHENG Haitao, ZHAO B Y. Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access [J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(4): 555 - 576.
- [7] ZHENG Haitao, PENG Chunyi. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access [C]//IEEE International Conference on Communications. Seoul: IEEE Inc, 2005: 3132 - 3136.
- [8] NIE N, CRISTINA C. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks [C]//2005 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2005. Baltimore: IEEE CS, 2005: 269 - 278.
- [9] 廖楚林, 陈 劼, 唐友喜, 等. 认知无线电中的并行频谱分配算法 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1608 - 1611.
- [10] YU Wei, CIOFFI J M. FDMA capacity of Gaussian multiple-access channels with ISI [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(1): 102 - 111.

(编辑 张 宏)