



认知无线网络中功率和信道接入的联合优化

朱江, 杜清敏, 巴少为

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 在认知无线网络中, 针对系统中所有用户能否接入同一信道进行通信的问题, 提出了适用于不同情形的联合优化方案。在系统不可行的情形下, 提出了联合优化功率和接入控制的方案。由于接入控制是 NP 问题, 于是利用所提 LP-PSO 算法来实现优化控制, 并分析和证明了所提算法的收敛性。在系统可行的情形下, 提出了联合优化功率和传输速率分配的方案, 通过改进拉格朗日对偶 (Lagrange duality) 算法来实现优化控制。数值结果分析表明, 相比其他接入控制算法, 虽然所提算法的时间复杂度有所增加但能够快速收敛, 在有效地提高接入量的同时还能降低功率消耗, 并能使传输速率得到更公平的分配。

关键词: 认知无线网络; 功率和接入控制; 功率和传输速率分配; NP 问题

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017013

Joint optimization of power and channel access in cognitive radio network

ZHU Jiang, DU Qingmin, BA Shaowei

Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University
of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: In cognitive radio networks, according to the problem of all users can access the same channel to communicate, two joint optimization schemes for different scenarios were proposed. When the system is infeasible, a scheme of joint optimal power and admission control was proposed. As admission control is the NP problem, the LP-SO was used to achieve optimize control. At the same time, the convergence of the proposed algorithm was analyzed and proved. When the system is feasible, a scheme of joint optimal power and transmission rate allocation was proposed, using the improved Lagrange duality algorithm to achieve optimize control. The numerical results show that compared with other admission control algorithms, the time complexity of proposed algorithm is increased, but it can converge quickly, effectively improves the number of admitted uses while reducing power consumption. In addition, the proposed algorithm can allocate transmission rate more fairly.

Key words: cognitive radio network, power and admission control, power and transmission rate allocation, NP problem

收稿日期: 2016-10-16; 修回日期: 2017-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61102062, No.61271260); 重庆市科委自然科学基金资助项目 (No.cstc2015jcyjA40050)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61102062, No.61271260), The Natural Science Foundation of Chongqing Science and Technology Commission (No.cstc2015jcyjA40050)



1 引言

随着无线通信业务的不断增多,可用的频谱资源越来越稀缺,然而现有频谱资源的利用率却较为低下。认知无线电技术通过允许次用户(secondary user, SU)动态访问实现与主用户(primary user, PU)共享授权频谱^[1],以解决无线网络中频谱资源利用率低的问题。其中有两个主要的频谱共享方式:overlay 和 underlay^[2]。在 overlay 频谱共享中,当授权频谱空闲时,认知用户(次用户)会试图接入空闲频谱进行通信;当授权用户(主用户)返回时,认知用户需立即退出授权信道以避免对授权用户产生干扰。在 underlay 频谱共享中,认知用户在不影响主用户正常通信的情况下,可以和主用户共享信道。另外,利用功率控制技术可以减少次用户通信过程中对主用户产生的不利干扰,同时还可以降低能量消耗^[3]以及提高网络的吞吐量^[4]。然而,由于次用户数量较多或对主用户服务质量要求较高系统不可行时,面临着如何选择次用户接入和功率控制这一难题;由于次用户数量较少或主用户服务质量要求较低系统可行时,面临着如何选择传输速率和功率分配这一难题。因此,不可行系统中的接入量(用户的接入数量)和功率控制问题以及可行系统中的传输速率和功率分配问题是认知无线网络中亟需解决的关键问题。

在主用户服务质量(quality of service, QoS)的约束下,国内外针对接入控制这一 NP 问题做了大量的研究。主要的优化目标包括:最大化次用户接入量^[5,6],最大化次用户接入量与最小化功率^[7-9],最大化次用户接入量与最大化吞吐量^[10-12]。参考文献[7]利用线性规划来得到最大的次用户接入量,并在此条件下,利用遗传算法(genetic algorithm, GA)解决功率分配问题,然而性能并未得到提高。参考文献[10]中,认知节点利用位置感知,通过遍历搜索技术得到最优的功率分配方案,但是增加了计算复杂度。参考文献[11-17]主要是关于凸优化方面的研究。例如,参考文献[14]提出了 ESRPA 和 ELGRA 两个集中式逐步去除次用户的算法并得到了全局最优解;参考文献[16]研究了发射波束和接入控制的联合优化问题,利用跨层方法最大化次用户的接入量,并提出了两个凸优化算法。因此,利用智能优化算法,存在搜索范围、收敛速度、收敛精度以及参数设置之间的矛盾,无法达到一个整体最优的效果;利用遍历搜索技术会增加计算的复杂度;凸优化在转化过程中会造成约束范围的增大或减小,导致最优解可能会有或大小

的偏离。

在目前文献的基础上,本文从复杂度以及最优解的角度考虑,提出了 underlay 频谱共享模式下不同情形的联合优化方案。主要分析了如下几个方面:首先,利用线性规划(linear programming, LP)推导出次用户的信干噪比(signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR)和功率之间的对应关系。其次,由于 SU 的数量较多或对 PU 的 QoS 要求较高系统不可行时,在 PU 和次用户 QoS 约束条件和两种删除准则的控制下,利用推导出的对应关系和粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法实现接入量最大化以及功率最小化。数值结果分析表明,所提算法(简称 LP-PSO 算法)优于其他接入控制算法。最后,由于 SU 的数量较少或对 PU 的 QoS 要求较低系统可行时, SU 希望分配较高的 SINR 以提高传输速率,通过改进位格朗日对偶算法实现功率最小化以及传输速率最大化。数值结果显示了所提的算法优于已有的 GA,并且次用户的传输速率得到更为公平的分配。

2 系统模型

在认知无线网络中,考虑 1 个 PU 和多个 SU 共存的上行通信链路系统。如图 1 所示,PU 和 SU 分别与主基站和认知基站进行通信。网络中包括 1 个 PU 和 N 个 SU, SU 表示为 $S=\{1,2,\dots,N\}$ 。假设信号参数变化受到路径衰落的影响以及考虑对数距离的路径损耗模型,第 k 个 SU 到基站的链路增益为 $h_k=h_0(d/d_0)^a$,其中, a 为路径衰落指数, d_k 为第 k 个 SU 到基站的距离, d_0 和 h_0 分别为参考距离和参考链路增益。假设认知设备可以利用定位技术实现位置感知^[18]来获取 PU 和 SU 的位置信息。

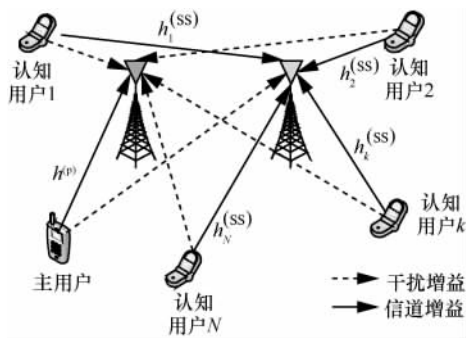


图 1 系统模型

考虑一个传统的匹配滤波,对于任意给定的功率矢量 $\mathbf{P}^{(s)}(\mathbf{P}^{(s)} = [p_1^{(s)}, p_2^{(s)}, \dots, p_N^{(s)}]^T)$, PU 在基站处的 SINR 为:

$$r^{(p)} = \frac{B}{R} \frac{h^{(p)} p^{(p)}}{\sum_{i=1}^N h_i^{(sp)} p_i^{(s)} + \sigma_p^2} \quad (1)$$

其中, B 是信道带宽; R 是 PU 的传输速度; $\frac{B}{R}$ 是 PU 的处理增益; $p^{(p)}$ 为 PU 的功率; $h_j^{(sp)}$ 和 $h_i^{(p)}$ 分别表示第 i 个 SU 和 PU 到主基站的链路增益; σ_p^2 为主基站处的加性高斯白噪声。同样, 第 i 个 SU 在认知基站处上行链路的 SINR 为:

$$r_i^{(s)} = \frac{B}{R_i} \frac{h_i^{(ss)} p_i^{(s)}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j^{(ss)} p_j^{(s)} + h^{(ps)} p^{(p)} + \sigma_s^2} \quad (2)$$

其中, B 是信道带宽; R_i 是第 i 个 SU 的传输速度; $\frac{B}{R_i}$ 是第 i 个 SU 的处理增益; $h_i^{(ss)}$, $h^{(ps)}$ 和 $h_j^{(ss)}$ 分别表示第 i 个 SU、PU 和第 j 个 SU 到认知基站的链路增益; σ_s^2 为认知基站处的加性高斯白噪声。

当次用户数量较多或对主用户的 SINR 要求较高时, 并非所有的次用户可以接入同一频谱进行通信, 在这种情况下, 系统是不可行的。当系统不可行时, 主要目标是如何实现较多的 SU 进行正常的通信。同时, 功率最小化能够减少 SU 对 PU 的干扰。因此本节的优化目标是如何实现接入量最大化和功率最小化。假设 PU 使用固定的功率与主基站进行通信, 认知基站对 SU 提供通信服务时, SU 应满足 QoS 最低门限的要求并且产生的干扰不应该影响 PU 的正常通信。用 $r^{(thp)}$ 和 $r_i^{(ths)}$ 分别表示 PU 和第 i 个 SU 的 QoS 门限值。为了满足上述要求, 每个 SU 应该在一定的功率范围内调节各自的功率, 即 $p_i \in [p_i^{\min}, p_i^{\max}]$ 。

当系统不可行时, 在满足主用户和次用户 QoS 的约束下, 如何实现接入量最大化和功率最小化。此问题可以描述为:

$$\begin{aligned} & \max_{S, P} |S| \\ & \min_{\{P_k \mid k \in Sa\}} \sum_{k \in Sa} P_k \\ & \text{s.t. C1: } r^{(p)} > r^{(thp)} \\ & \quad \text{C2: } r_i^{(s)} > r_i^{(ths)}, \forall i \in S \\ & \quad \text{C3: } p_i^{\min} \leq p_i \leq p_i^{\max}, \forall i \in S \end{aligned} \quad (3)$$

其中, S 表示所有次用户的集合; Sa 表示满足所有约束条件的用户集合, $Sa \subseteq S$; C1 表示对主用户服务质量的约束; 当第 i 个次用户的当前 SINR 不低于门限值且功率在允许的范围内时, 次用户 i 才允许通信, 也就是满足 C2 和 C3 的约束。如果至少存在一个解决方案满足所有的约

束条件, 则该优化问题可行。

定理 1 在主用户和次用户 QoS 约束下的接入控制问题是 NP 问题。

将次用户的准入控制问题转化为图论问题进行证明, 此问题相当于在有向完全图中寻找最大的导出图。

假设有向完全图 $G=(V, E)$, 其中 $|V|=N+1$, $V=\{v_1, v_2, \dots, v_{N+1}\}$, $E=\{e_{ji} \mid \forall j \neq i \in V\}$ 。每个节点 v_i 和每个边 e_{ji} 的权重分别为:

$$w(i) = \begin{cases} p_i - \frac{r_i^{(ths)} (\sigma_s^2 + h^{(ps)} p^{(p)})}{h_i^{(ss)}}, & \forall i \in V - \{v_{N+1}\} \\ \frac{h^{(ps)} p^{(p)}}{r^{(thp)}} - \sigma_p^2, & i \in \{v_{N+1}\} \end{cases} \quad (4)$$

$$W(ji) = \begin{cases} \frac{r_i^{(thp)} h_j^{(ss)} p_j^{(s)}}{h_j^{(ss)}}, & \forall i, j \in V - \{v_{N+1}\} \\ h_j^{(sp)} p_j^{(s)}, & \forall j \in V - \{v_{N+1}\}, i = v_{N+1} \end{cases} \quad (5)$$

若导出子图 $G_1=(V_1, E_1)$ 存在, 节点 v_i 和 e_{ji} 边之间的关系需要满足:

$$w(i) \geq \begin{cases} \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in V_1}} W(ji), & \forall i \in V_1 - \{v_{N+1}\} \\ \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in V_1}} W(ji), & i \in \{v_{N+1}\} \end{cases} \quad (6)$$

在这些导出子图中, 每个边的权重之和应不大于所指向节点的权重, 即次用户对主用户的干扰低于门限值, 次用户满足 QoS 的要求。然而, 找出最大的次用户接入量相当于找到满足条件的最大导出子图, 在图论中寻找最大导出子图是 NP 问题, 所以次用户的接入控制也属于 NP 问题。

针对寻找最大导出子图是 NP 问题作以下证明。

将式(3)简化为:

$$\begin{aligned} S_0 &= \arg \max_{S_i \subseteq S, \{p_i \in [0, 1]\}_{i=1}^N} |S_i| \\ \text{s.t. } & \frac{p_i^{(s)}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_{ji} p_j^{(s)} + 1} \geq 1, \forall i \in S \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)至少包含一个最大的独立解集。 $\Gamma=(V, E)$ 代表一个无向图, $|V|=N$ 为图的顶点, 边 $e_{ji} \in E$ 。对于任何一个解集 $S \subseteq V$, 如果其中任意两点不相邻, 则该集合为独立集。令 S_i 表示最大的独立解集, 并且式(7)中:

$$h_{ji} = \begin{cases} 1, & \forall e_{ji} \in E \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad p_i = \begin{cases} 1, & \forall i \in S \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$



由于 S_i 中的节点互不干扰, 所以每个节点的功率为 0, 满足:

$$\frac{p_i^{(s)}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_{ji} p_j^{(s)} + 1} = 1, \quad \forall i \in S \quad (9)$$

因此 $|S_0| \geq |S_i|$ 。若使式(9)成立, $p_i=1, h_{ii}=0$ 。由于对 h_{ji} 值的限定, 因此 S 有界 $|S| \leq |V|$ 且 $|S_i| \geq |S|$ 。所以, 在约束 $\{p \subseteq [0, 1]_{i=1}^N\}$ 下, 均可找到满足式(9)独立解集 S (包括 $S=S_0$), 因此 $|S_i| \geq |S_0|$ 。证毕。

3 接入和功率控制的联合优化

3.1 接入和功率控制问题的可行性检查

将约束 C2 利用线性规划转化为线性约束, 即 $(I-FA)P \geq b$ 。其中 I 为 $N \times N$ 的单位矩阵; F 为 $N \times N$ 的矩阵, 每一个元素为:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i^{(ths)} R_i^{\min}}{B}, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (10)$$

A 为 $N \times N$ 的矩阵, 每一个元素为:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j \\ h_j^{(ss)} / h_i^{(ss)}, & i \neq j \end{cases} \quad (11)$$

b 为一个列向量, 每一个元素为:

$$b_i = \frac{r_i^{(ths)} R_i^{\min}}{B} [\sigma_s^2 + h^{(ps)} p^{(p)}] / h_i^{(ss)} \quad (12)$$

如果 $(I-FA)^{-1}$ 存在, 则次用户的 SINR 约束 (即 C2) 可以表示为 $C2: P \geq (I-FA)^{-1}b$ 。

当问题不可行时, 最初的优化问题需要逐步删除不可行的次用户 (即产生干扰最大的次用户), 使其余的 SU 满足对主用户和次用户 QoS 的限制。根据参考文献[16], 当 $p_i^{\min} \leq p_i \leq p_i^{\max}$ 不可行时, 删除矢量 z 中最大的元素, 其中 z 的每一个元素为: $z_i = \sum_{j \in S_u} (a_{ij} + a_{ji})$ 。所以, 在删除机制 1 中每次删除的用户为:

$$i^* = \arg \max_{i \in S_u} \sum (a_{ij} + a_{ji}) \quad (13)$$

其中, a_{ij} 表示用户 j 对用户 i 干扰的程度; z_i 表示用户 i 和 j 的互干扰。

为了方便说明删除机制 2, 引出有效 SINR 代替 SINR, 即:

$$\theta_i(P) = \frac{h_i^{(ss)} p_i^{(s)}}{h_i^{(ss)} p_i^{(s)} + \sum_{j=1, j \neq i}^N h_j^{(ss)} p_j^{(s)} + h^{(ps)} p^{(p)} + \sigma_s^2} = \frac{r_i(P)}{r_i(P) + 1} \quad (14)$$

其中, $\theta_i^{(s)}$ 和 $\theta_i^{(ths)}$ 表示次用户的有效 SINR 和有效目标 SINR。用 $\phi^{(s)}$ 表示认知基站处接收到的有用功率和噪声功率的总和, 即:

$$\phi^{(s)} = h^{(ps)} p^{(p)} + \sum_{j \in S_u} h_j^{(ss)} p_j^{(s)} + \sigma_s^2 \quad (15)$$

将式(2)变换为:

$$p_i^{(s)} = \frac{\gamma_i^{(s)}}{h_i^{(ss)}} (\phi^{(s)} - p_i^{(s)} h_i^{(ss)}) \quad (16)$$

即:

$$p_i^{(s)} = \frac{\theta_i^{(s)}}{h_i^{(ss)}} \phi^{(s)} \quad (17)$$

因此, 式(1)可变换为:

$$r^{(p)} = \frac{B}{R} \frac{h^{(p)} p^{(p)}}{\sum_{i=1}^N (h_i^{(sp)} / h_i^{(ss)}) \theta_i^{(s)} \phi^{(s)} + \sigma_p^2} \quad (18)$$

对每一个次用户, 其中 $i \in S$, 假设用 $(h_i^{(sp)} / h_i^{(ss)}) \theta_i^{(ths)}$ 表示第 i 个 SU 的有效链路增益比。由式(12)可知, 链路增益比越大, 对 PU 的干扰越大, PU 越不容易满足 $r^{(thp)}$ 。另外, 导致其他 SU 只能消耗较小功率, 使通信变得困难。所以当 PU 的目标 SINR 不满足时, 依次删除链路增益比最大的 SU, 即:

$$i^* = \arg \max_{i \in S_u} (h_i^{(sp)} / h_i^{(ss)}) \theta_i^{(ths)} \quad (19)$$

3.2 粒子群优化算法

粒子群优化算法是一种利用当前搜索到的最优值来寻找全局最优值的智能搜索算法, PSO 算法首先初始化一群粒子, 然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中, 粒子通过跟踪个体极值 p_{best} 和全局极值 g_{best} 来更新位置。考虑 M 个粒子组成的群体, 在 D 维空间中进行智能搜索。每个粒子在某一时刻的位置和速度状态表示为:

$$\begin{aligned} x_{id}^t &= \{x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{id}^t\}; x_{id}^t \in [L_d, U_d] \\ v_{id}^t &= \{v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{id}^t\}; v_{id}^t \in [V_{\min}, V_{\max}] \end{aligned} \quad (20)$$

其中, L_d, U_d 分别为智能搜索空间的下限和上限; $V_{\min}, V_{\max}$ 分别为最小和最大速度。每个粒子的位置和速度更新式为:

$$\begin{aligned} v_{id}^{t+1} &= w \times v_{id}^t + \kappa_1 \varepsilon_1 (p_{\text{best}, i}^t - x_{id}^t) + \kappa_2 \varepsilon_2 (g_{\text{best}}^t - x_{id}^t) \\ x_{id}^{t+1} &= x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \end{aligned} \quad (21)$$

其中, w 是权重因子, $w \in (0, 1)$, κ_1 和 κ_2 是加速因子, $\kappa_1, \kappa_2 \in (0, 2)$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \in (0, 1)$, $p_{best,i}^t$ 为第 i 个粒子在第 t 次迭代的个体最优值, g_{best}^t 为第 t 次迭代的全局最优值。

定理 2 若 $w, \kappa_1, \kappa_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ 在一定范围内, 本文中的粒子群优化算法具有全局收敛性, 即:

$$\begin{aligned} 0 &\leq w < 1 \\ \kappa_1 \varepsilon_1 + \kappa_2 \varepsilon_2 &> 0 \\ 2w - (\kappa_1 \varepsilon_1 + \kappa_2 \varepsilon_2) + 2 &> 0 \end{aligned} \quad (22)$$

从式(20)中可以看出, 虽然 x_{id}^t 和 v_{id}^t 是 M 维的变量, 但是每一维的变量相互独立, 所以对 PSO 算法分析简化到一维进行。为简化计算, 假设粒子本身所找到的最优解和群体目前找到的最优解不变, 记 $p_b, g_b, w, \kappa_1, \kappa_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为常数。式(20)可以简化为:

$$\begin{aligned} v_{id}(t+1) &= w \times v_{id}(t) + \kappa_1 \varepsilon_1 (p_b - x_{id}(t)) + \kappa_2 \varepsilon_2 (g_b - x_{id}(t)) \\ x_{id}(t+1) &= x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \end{aligned} \quad (23)$$

由式(23)得到:

$$\begin{aligned} v_{id}(t+2) &= w \times v_{id}(t+1) + \kappa_1 \varepsilon_1 (p_b - x_{id}(t+1)) + \\ &\quad \kappa_2 \varepsilon_2 (g_b - x_{id}(t+1)) \\ x_{id}(t+2) &= x_{id}(t+1) + v_{id}(t+2) \end{aligned} \quad (24)$$

重新整理得:

$$\begin{aligned} x_{id}(t+2) &= x_{id}(t+1) + w \times v_{id}(t+1) + \\ &\quad \kappa_1 \varepsilon_1 (p_b - x_{id}(t+1)) + \kappa_2 \varepsilon_2 (g_b - x_{id}(t+1)) \\ &= x_{id}(t+1) + w \times (x_{id}(t+1) - x_{id}(t)) + \\ &\quad \kappa_1 \varepsilon_1 (p_b - x_{id}(t+1)) + \kappa_2 \varepsilon_2 (g_b - x_{id}(t+1)) \\ &= (w - \kappa_1 \varepsilon_1 - \kappa_2 \varepsilon_2 + 1) x_{id}(t+1) - w x_{id}(t) + \\ &\quad \kappa_1 \varepsilon_1 p_b + \kappa_2 \varepsilon_2 g_b \end{aligned}$$

即:

$$\begin{aligned} x_{id}(t+2) &+ (-w + \kappa_1 \varepsilon_1 + \kappa_2 \varepsilon_2 - 1) x_{id}(t+1) + \\ &w \times x_{id}(t) = \kappa_1 \varepsilon_1 p_b + \kappa_2 \varepsilon_2 g_b \end{aligned} \quad (25)$$

这是一个二阶常系数非齐次差分方程, 这里用特征值方程求解。特征方程为:

$$\lambda^2 + (-w + \kappa_1 \varepsilon_1 + \kappa_2 \varepsilon_2 - 1) \lambda + w = 0 \quad (26)$$

根据一元二次方程解的情况分 3 种情况。

(1) 当 $\Delta = (-w + \kappa_1 \varepsilon_1 + \kappa_2 \varepsilon_2 - 1)^2 - 4w = 0$ 时, $\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{-(-w + \kappa_1 \varepsilon_1 + \kappa_2 \varepsilon_2 - 1)}{2}$, 此时 $x_{id}(t) = (A_0 + A_1 t) \lambda^t$, 其中 A_0, A_1 为待定系数, 由 $x_{id}(0)$ 和 $v_{id}(0)$ 确定:

$$\begin{cases} A_0 = x_{id}(0) \\ A_1 = \frac{(1-c)x_{id}(0) + wv_{id}(0)}{\lambda} + \frac{\kappa_1 \varepsilon_1 p_b + \kappa_2 \varepsilon_2 g_b}{\lambda} - x_{id}(0) \end{cases} \quad (27)$$

(2) 当 $\Delta = (-w + \kappa_1 \varepsilon_1 + \kappa_2 \varepsilon_2 - 1)^2 - 4w > 0$ 时:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{w - \kappa_1 \varepsilon_1 - \kappa_2 \varepsilon_2 + 1 + \sqrt{\Delta}}{2} \\ \lambda_2 &= \frac{w - \kappa_1 \varepsilon_1 - \kappa_2 \varepsilon_2 + 1 - \sqrt{\Delta}}{2} \end{aligned} \quad (28)$$

此时 $x_{id}(t) = A_0 + A_1 \lambda_1^t + A_2 \lambda_2^t$, A_0, A_1, A_2 为待定系数。令:

$$\begin{aligned} b_1 &= x_{id}(0) - A_0 \\ b_2 &= (1-c)x_{id}(0) + w \times v_{id}(0) + \kappa_1 \varepsilon_1 p_b + \kappa_2 \varepsilon_2 g_b - A_0 \end{aligned} \quad (29)$$

经计算得到:

$$\begin{cases} A_0 = \frac{\kappa_1 \varepsilon_1 p_b + \kappa_2 \varepsilon_2 g_b}{c} \\ A_1 = \frac{\lambda_2 b_1 - b_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \\ A_2 = \frac{\lambda_2 b_2 - \lambda_1 b_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \end{cases} \quad (30)$$

(3) 当 $\Delta = (-w + \kappa_1 \varepsilon_1 + \kappa_2 \varepsilon_2 - 1)^2 - 4w < 0$ 时:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{w - \kappa_1 \varepsilon_1 - \kappa_2 \varepsilon_2 + 1 + i\sqrt{\Delta}}{2} \\ \lambda_2 &= \frac{w - \kappa_1 \varepsilon_1 - \kappa_2 \varepsilon_2 + 1 - i\sqrt{\Delta}}{2} \end{aligned} \quad (31)$$

此时 $x_{id}(t) = A_0 + A_1 \lambda_1^t + A_2 \lambda_2^t$, A_0, A_1, A_2 为待定系数。经计算同样得到:

$$\begin{cases} A_0 = \frac{\kappa_1 \varepsilon_1 p_b + \kappa_2 \varepsilon_2 g_b}{c} \\ A_1 = \frac{\lambda_2 b_1 - b_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \\ A_2 = \frac{\lambda_2 b_2 - \lambda_1 b_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \end{cases} \quad (32)$$

若 $t \rightarrow \infty$ 时, $x_{id}(t)$ 趋向于有限值, 表示迭代收敛。由此可知, 若要同时满足以上 3 种情况使得 $x_{id}(t)$ 收敛, 其条件是: $\|\lambda_1\| < 1$ 且 $\|\lambda_2\| < 1$ 。

令 $\kappa = \kappa_1 \varepsilon_1 + \kappa_2 \varepsilon_2$:

- 当 $\Delta = 0$ 时, 收敛区域为: 抛物线 $w^2 + \kappa^2 - 2w\kappa + 2w - 2\kappa + 1 = 0$ 且 $0 \leq w < 1$;
- 当 $\Delta > 0$ 时, 收敛区域为: $w^2 + \kappa^2 - 2w\kappa + 2w - 2\kappa + 1 > 0, \kappa > 0$ 和 $2w - \kappa + 2 > 0$ 所围成的区域;



- 当 $\Delta < 0$ 时, 收敛区域为: $w^2 + \kappa^2 - 2w\kappa + 2w - 2\kappa + 1 < 0$ 和 $w < 1$ 所围成的区域。

综合上述 3 种情况, 收敛区域为: $0 \leq w < 1, \kappa > 0$ 和 $2w - \kappa + 2 > 0$ 所围成的区域。又因为目标函数和约束条件均为线性, 所以在搜索空间内会达到全局收敛。

3.3 功率和接入控制联合优化算法

为了得到问题的最优解, 提出了一种基于线性规划的粒子群优化算法。其主要思想是利用 LP 将次用户的 SINR 约束转化为功率约束, 如果此功率约束和目标功率约束存在交集, 再利用 PSO 算法搜索功率的最优值, 找到问题的最优解。根据以上分析, 功率和接入控制联合优化见算法 1。

基于线性规划的粒子群优化算法包括线性规划和粒子群优化算法两个方面: 一方面, 线性规划的优化函数和约束函数均为线性函数, 利用线性规划寻找最大的次用户接入量, 由于主用户和次用户 QoS 的约束可行域必定有界, 且线性函数本身在有限范围内存在最大值, 因此线性规划的优化函数在有限范围内必收敛于某一值; 另一方面, 本文中定理 2 已证明了粒子群优化算法在一定范围内具有全局收敛性。因此, 所提出的基于线性规划的粒子群优化算法具有收敛性。

算法 1 接入和功率控制联合优化算法

步骤 1 初始化: 设定 PU 和 SU 的位置, 参考距离 d_0 和参考链路增益 h_0 , SINR 门限值 $r^{(\text{th})}$ 和 $r_i^{(\text{th})}$ 等系统参数;

步骤 2 计算功率约束: $P \geq (I - FA)^{-1}b$;

步骤 3 判断 P 是否满足约束 C3:

- 如果是, 执行步骤 4;
- 如果否, 计算式(14)删除次用户;

步骤 4 执行 PSO 算法, 得到最优解;

步骤 5 判断是否满足约束 C1:

- 如果是, 输出最优解;
- 如果否, 计算式(19)删除 SU, 返回步骤 2。

3.4 算法的复杂度分析

算法的时间复杂度主要是逐步删除 SU 时信息交换所造成的计算量。当次用户的目标 SINR 未满足时, 删除 SU 所造成的复杂度为 $O(N)$; 当 PU 的 SINR 未满足时, 删除 SU 所造成的复杂度为 $O(N \times \text{size} \times T)$, 其中 size 是种群个数, T 是迭代次数。由于干扰约束的可行性验证, 将依次删除产生干扰较多的次用户, 因此复杂度达不到最大值, 本文所提算法的复杂度为 $O(N \times N \times \text{size} \times T)$ 。对比参考文献[8]和参考文献[11,12]中算法的复杂度, 本文的复杂度相对较

高, 但通过干扰约束的可行性验证, 并不会造成较大的影响且增大的幅度影响在考虑范围之内。4 种算法的复杂度分析见表 1。

表 1 算法的复杂度分析

算法	复杂度
联合优化方案	$O(N \times N \times \text{size} \times T)$
LD	$O(N \times N)$
I-SMIRA	$O(N \times N)$
SMIRA	$O(N \times N)$

4 可行系统中的传输速率和功率和的联合优化

如果 SU 的数量较少或者对 PU 干扰温度的门限值较高, 所有的 SU 允许通信, 在这种情况下, 系统是可行的。当系统可行时, 用户希望得到较高的数据传输速率和更好的 QoS, 因此 SU 希望得到更高的 SINR 而不再是目标 SINR。单元网中, 上行链路的优化目标是功率最优, 下行链路的优化目标是传输速率最优, 然而在认知无线网络中, 功率最小化和速率最大化同等重要。因此, 优化目标是在满足主用户和次用户 QoS 的条件下, 实现传输速率最大化以及功率最小化。利用 SINR 和传输功率之间的对应关系, 通过改进拉格朗日对偶算法得到了问题的最优解。数值结果显示了所提算法优于已有的智能算法。此问题可表示为:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & W_1 = \sum_{k=1}^N p_k \\
 \max \quad & W_2 = \sum_{k=1}^N R_k \\
 \text{s.t.} \quad & \text{C4: } \sum_{i=1}^N h_i^{(\text{sp})} p_i^{(\text{s})} \leq I_{\text{th}} \\
 & \text{C5: } \gamma_i^{(\text{s})} \geq \gamma_i^{(\text{th})}, \forall i \\
 & \text{C6: } R_i \leq \text{lb}(1 + \gamma_i^{(\text{s})}), \forall i \\
 & \text{C7: } \sum_{i=1}^N R_i \leq R_{\text{th}} \\
 & \text{C8: } R_i^{\min} \leq R_i \leq R_i^{\max}, \forall i \\
 & \text{C9: } p_i^{\min} \leq p_i \leq p_i^{\max}, \forall i
 \end{aligned} \tag{33}$$

在优化问题式(33)中有 2 个优化目标 W_1 和 W_2 。然而在通信过程中, 传输速率的提高以功率的消耗为代价, W_1 和 W_2 之间相互矛盾。因此, 在一个目标函数中联合优化 W_1 和 W_2 , 并寻找它们的 Pareto (帕雷托) 最优解, 即:

$$\begin{aligned} \min \quad & \eta_1 W_1 - \eta_2 W_2 \\ \text{s.t.} \quad & \text{C4, C5, C6, C7, C8, C9} \end{aligned} \quad (34)$$

优化问题式(34)的拉格朗日形式为:

$$\begin{aligned} \min L(\{p_k\}, \{R_k\}) = & \eta_1 W_1 - \eta_2 W_2 + \\ & \lambda_1 \left(\sum_{k=1}^N h_k^{(\text{sp})} p_k^{(\text{s})} - I_{\text{th}} \right) + \lambda_2 \left(\sum_{k=1}^N R_k - R_{\text{ch}} \right) \\ \text{s.t.} \quad & \text{C5, C6, C8, C9} \end{aligned} \quad (35)$$

其中, λ_1 和 λ_2 为非负的拉格朗日乘子。式(35)可重写为:

$$\begin{aligned} \min L(\{p_k\}, \{R_k\}) = & \sum_{k=1}^N (\eta_1 + \lambda_1 h_k^{(\text{sp})}) p_k^{(\text{s})} - \\ & \sum_{k=1}^N (\eta_2 - \lambda_2) R_k - \lambda_1 I_{\text{th}} - \lambda_2 R_{\text{ch}} \\ \text{s.t.} \quad & \text{C5, C6, C8, C9} \end{aligned} \quad (36)$$

即:

$$\begin{aligned} \min g(\{p_k\}, \{R_k\}, \lambda_1, \lambda_2) = & \\ & \sum_{k=1}^N (\eta_1 + \lambda_1 h_k^{(\text{sp})}) p_k^{(\text{s})} - \sum_{k=1}^N (\eta_2 - \lambda_2) R_k \\ \text{s.t.} \quad & \text{C5, C6, C8, C9} \end{aligned} \quad (37)$$

定理 3 功率和传输速率分配联合优化问题的最优解满足 $R_i = R_j, \forall i, j$, 从而用户的速率得到更公平的分配。

在联合优化功率和速率过程中, 速率的优化起决定性作用。假设 $P^{(\text{s})}$ 和 R^* 是优化问题的最优解, 则 $\max R_i^* \geq \max R_i$; 假设每个次用户的最优解不相等, 即 $\min R_i^* < \max R_i^*$; 假设速度最小的次用户为 $k, k = \arg \max R_i^*$ 。将式(2)变形为:

$$\frac{h_i^{(\text{ss})} p_i^{(\text{s})}}{h^{(\text{ps})} p^{(\text{p})} + \sum_{j=1, j \neq i}^N h_j^{(\text{ss})} p_j^{(\text{s})} + \sigma_s^2} \geq \frac{r_i^{(\text{ths})} R_i}{B} \quad (38)$$

不等式(28)的左边随 $p_i^{(\text{s})}$ 的增大而增大, 随 $p_i^{(\text{s})}$ (其中 $j \neq i$) 的增大而减小。所以, 当次用户 k 的功率 $p_k^{(\text{s})}$ 和速率 R_k 分别减小 Δp 和 ΔR 时, 其他 SU 的速率将增加一个很小的值 ΔR_i , 此时 SU 的 SINR 仍满足目标 SINR, 产生的干扰仍满足 PU 的干扰温度阈值。假设功率和速率的变化足够小, 次用户 k 的 SINR 变为:

$$\frac{h_k^{(\text{ss})} (p_k^* - \Delta p)}{h^{(\text{ps})} p^{(\text{p})} + \sum_{j=1, j \neq k}^N h_j^{(\text{ss})} p_j^{(\text{s})} + \sigma_s^2} \geq \frac{r_k^{(\text{ths})} (R_k^* - \Delta R)}{B} \quad (39)$$

其他次用户 i 的 SINR 变为:

$$\frac{h_i^{(\text{ss})} p_i^*}{h^{(\text{ps})} p^{(\text{p})} + \sum_{j=1, j \neq k}^N h_j^{(\text{ss})} p_j^{(\text{s})} + h_k^{(\text{ss})} (p_k^* - \Delta p) + \sigma_s^2} \geq \frac{r_i^{(\text{ths})} (R_i^* + \Delta R_i)}{B}, \quad i \neq k \quad (40)$$

对 PU 的干扰变为:

$$\sum_{j=1, j \neq k}^N h_j^{(\text{sp})} p_j^* + h_k^{(\text{sp})} (p_k^* - \Delta p) \leq I_{\text{th}} \quad (41)$$

假设功率和速率的变量足够小:

$$(R_k^* - \Delta R) \geq \max_{i \neq k} (R_i^* + \Delta R_i) \quad (42)$$

所以, $\max R_i^* = \max_{i \neq k} R_i^* \leq \max_{i \neq k} (R_i^* + \Delta R_i) = \max_{i \neq k} (\max_{i \neq k} (R_i^* + \Delta R_i), (R_k^* - \Delta R))$ 。但是, 这与 $\max R_i^* \geq \max R_i$ 矛盾, 因此 $\min R_i^* = \max R_i$ 。

原问题的对偶问题为:

$$\begin{aligned} \min: \quad & D(\lambda_1, \lambda_2) = g(\{p_k\}, \{R_k\}, \lambda_1, \lambda_2) - \lambda_1 I_{\text{th}} - \lambda_2 R_{\text{ch}} \\ \text{s.t.} \quad & \lambda_1 \geq 0, \\ & 0 \leq \lambda_2 \leq \eta_2 \end{aligned}$$

本文所改进的拉格朗日对偶算法包括内外两层循环: 在外层循环中更新拉格朗日乘子 λ_1 和 λ_2 ; 在内层循环中计算式(37), 直到得到问题的最优解。根据以上分析, 功率和传输速率分配联合优化见算法 2。

对偶变量 λ_1 和 λ_2 获取干扰温度的门限值和信道的最大传输速率, 使 SU 产生的干扰以及传输速率在约束范围内。当 SU 产生的干扰大于干扰温度的门限值时 λ_1 减小, λ_1 的减小使目标函数 $g(\{p_k\}, \{R_k\})$ 减小, 功率为了应对目标函数的减小也将减小, 此时, 提高了满足干扰温度约束的能力。当 SU 的传输速率大于信道的容量时 λ_2 增大, λ_2 的增大使目标函数 $g(\{p_k\}, \{R_k\})$ 增大, 传输速率为了响应目标函数的增大将减小, 此时, 提高了满足信道容量的能力。

算法 2 功率和传输速率分配联合优化算法

步骤 1 初始化: $\lambda_1(0) = 0$ 和 $\lambda_2(0) = 0$;

步骤 2 判断是否满足终止条件:

· 如果是, 结束算法;

· 如果否, 执行步骤 3。

步骤 3 计算式(34), 更新 λ_1 和 λ_2 。

判断 $\sum_{k=1}^N h_k^{(\text{sp})} p_k^{(\text{s})} > I_{\text{th}}$ 是否满足:



· 如果是, $\lambda_1^{t+1} = [\lambda_1' + \alpha_1(-\sum_{k=1}^N h_k^{(sp)} p_k^{(s)} + I_{th})]$;

· 如果否, $\lambda_1^{t+1} = \lambda_1'$ 。

判断 $\sum_{k=1}^N R_k > R_{ch}$ 是否满足:

· 如果是, $\lambda_2^{t+1} = \min[\eta_2, \lambda_2' - \alpha_2(-\sum_{k=1}^N R_k + R_{ch})]$;

· 如果否, $\lambda_2^{t+1} = \lambda_2'$ 。

步骤 4 返回步骤 2。

5 仿真结果与分析

为验证本文所提算法的优越性,考虑 1 个 PU 和 N 个 SU 共存的上行通信链路系统,对所提算法与已有的算法进行数值比较。仿真中,考虑一个 $200\text{ m} \times 300\text{ m}$ 的网络,主基站和认知基站分别位于 $(100\text{ m}, 100\text{ m})$ 和 $(100\text{ m}, 200\text{ m})$ 处,主用户和次用户随机分布在距离各自基站半径 100 m 的位置。系统参数为 $B=5.12\text{ MHz}$, $a=3$, $d_0=5$, $h_0=10^{-4}$,主用户上行通信链路的 SINR 为 $r^{(up)}=10\text{ dB}$, $p^{(p)}=100\text{ mW}$,次用户的传输功率的上下限分别为 $p^{\max}=100\text{ mW}$, $p^{\min}=0$,基站处噪声功率 $\sigma_p^2=\sigma_s^2=10^{-15}\text{ W}$ 。

5.1 不可行系统

试验 1 给出了所提基于线性规划的粒子群优化算法的收敛速度。随机选择 $N=10$ 个 SU,每个 SU 上行通信链路的 SINR 在 $r_i^{(ths)} \in [2\text{ dB}, 5\text{ dB}]$ 中随机选择,从图 2 中可以看出,当迭代次数为 35 时,消耗总功率收敛于 44.21 mW 。因此所提出的 LP-PSO 算法有较快的收敛速度。从图 3 中可以看出,当 $N=10$ 时,其中有 9 个 SU 接入信道与基站进行通信,由于链路增益和目标 SINR 的不同,次用户的消耗功率有很大差异,有的几乎为 0,有的则达到 15 mW 以上,但都在约束范围内。

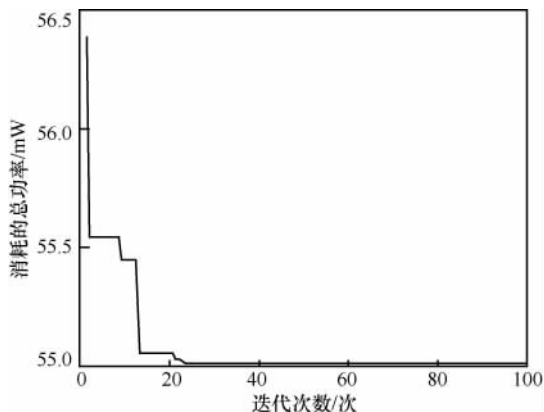


图 2 LP-PSO 算法的收敛程度

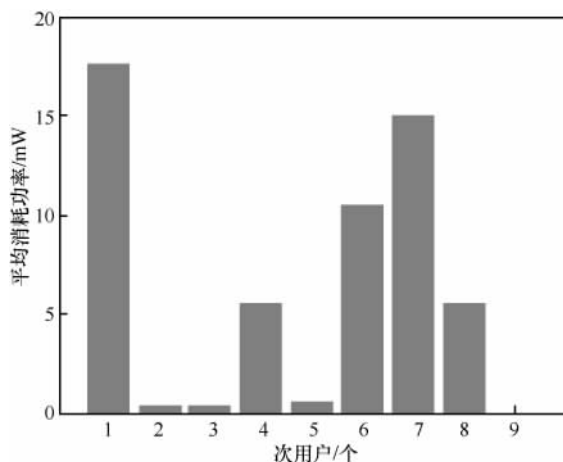


图 3 每个接入次用户的传输功率

试验 2 给出了随着 SU 的增多,LP-PSO 算法、LP 算法、SMIRA 和 I-SMIRA 系统停机率以及消耗功率的对比。其中,停机率用来衡量系统性能的好坏,是未接入信道的用户数量与总用户数量的比值。当停机率为 0 时,表示允许所有用户接入信道进行通信;当停机率为 1 时,表示不允许任何一个用户接入信道,此时系统性能极差。仿真过程中,仍然考虑每个 SU 目标 SINR 不同的情形。图 4 给出了随着 SU 数目的增多,利用不同算法时系统停机率的对比。图 5 是对应的功率对比。可以看出,所提算法可以实现较小的系统停机率。由于接入量的不同,消耗的功率无法准确地比较。但从图 5 中可以看出,当 SU 的数目较少时(SU 的数量少于 5),所提算法消耗较小的总功率;当 SU 较多时,为保证较多的 SU 接入信道会消耗较多的功率,但此时并未影响 PU 的正常通信。由于对比算法采用的删除机制不同,在本次仿真中 LP 算法、SMIRA 在次用户数量等于 5 时,随着次用户数量的增多接入量已不再变化,由于系统中噪声的影响,消耗的总功率只是略有变化。由于 PU 的目标 SINR 不满足时,LP 算法采用删除功率最大的 SU,没有考虑链路增益 $h_i^{(sp)}$ 的影响,而 LP-PSO 采用删除链路增益比 $(h_i^{(sp)} / h_i^{(ss)})\theta^{(ths)}$ 最大的 SU,综合考虑链路增益和功率对系统的影响。

实验 3 给出了随着次用户目标 SINR 的增大,分别利用 LP-PSO 算法、LP 算法、SMIRA 和 I-SMIRA 时次用户接入量之间的对比。在此次实验中,每个 SU 具有相同的目标 SINR,设置次用户的数目 $N=40$ 。从图 6 中可以看出,随着 SINR 的增大,利用不同算法能够允许 SU 正常通信的平均数量,目标 SINR 较小时,次用户的接入量相对较多,当目标 SINR 较大时,几乎所有次用户都无法接

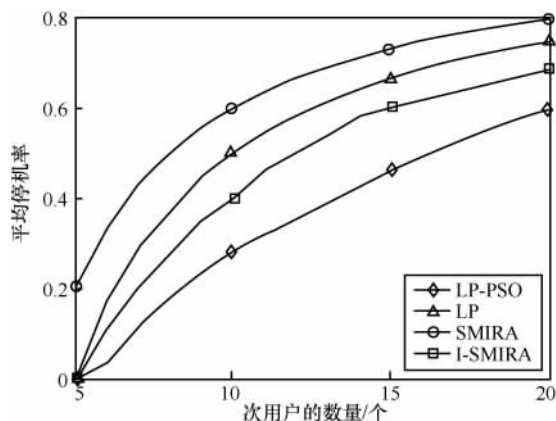


图4 次用户的停机率

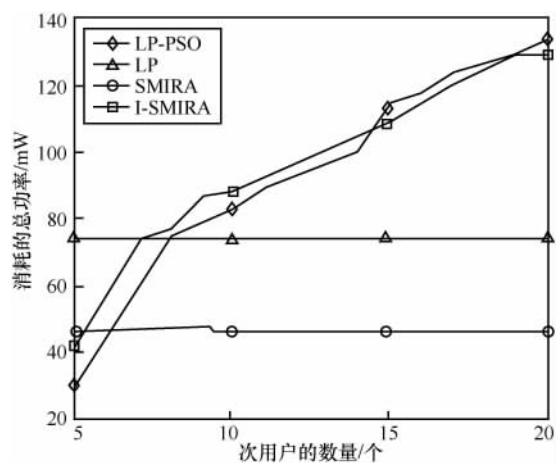


图5 次用户消耗的总功率

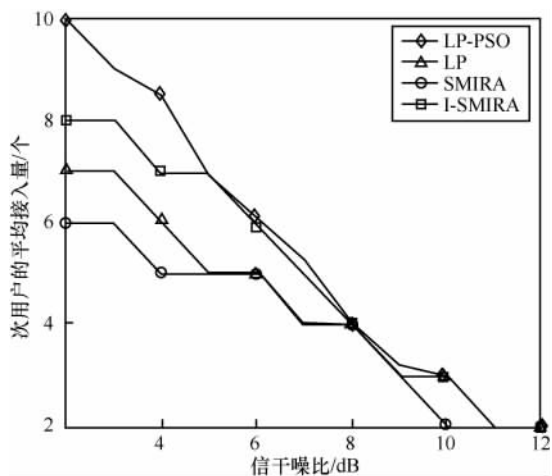


图6 次用户的接入量

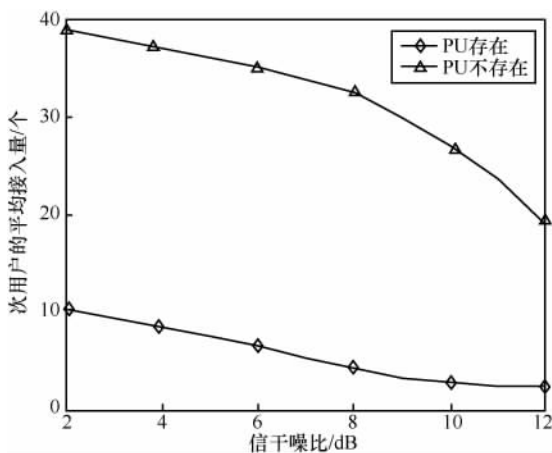


图7 主用户存在与否的对比

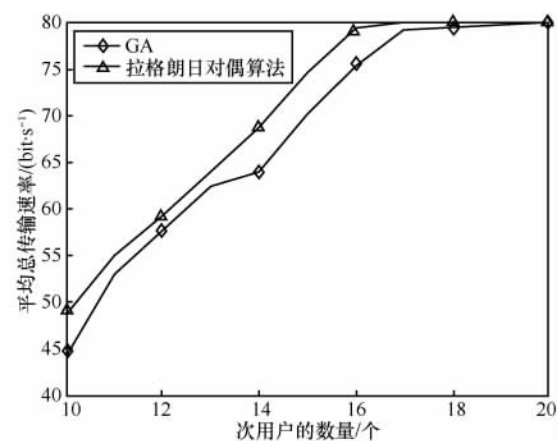


图8 次用户的总速率

入信道进行正常的通信。这是由于为满足次用户 SINR 的要求将会对 PU 产生过大的干扰。值得注意的是,因为干扰的存在,次用户的接入量和消耗的功率不是线性关系。所以此次试验中,功率的对比没有意义。图7是主用户存在与否的对比,从图7中可以看出,当PU不存在时,允许接入的SU明显比较多,这是由于主用户不存在时,不用考虑PU干扰温度的影响。仍然,此时功率的对比没有意义。

5.2 可行系统

试验4给出了在可行系统中,随着次用户数目的增多,分别利用所提拉格朗日对偶算法和GA算法时次用户总消耗功率和总传输速率的对比。在此次仿真中,次用户的数量 $N=20$,每个SU的目标 SINR 为 $r_i^{(ths)} = 3 \text{ dB}$,干扰温度门限为 $I_b = 10\sigma_s^2$ 。图8为随着次用户数目速率都达到饱和。但整体来看,改进的拉格朗日对偶算法在传输速率和功率两个优化目标上,性能均优于GA。

6 结束语

对集中式认知无线网络中接入控制和功率分配的联

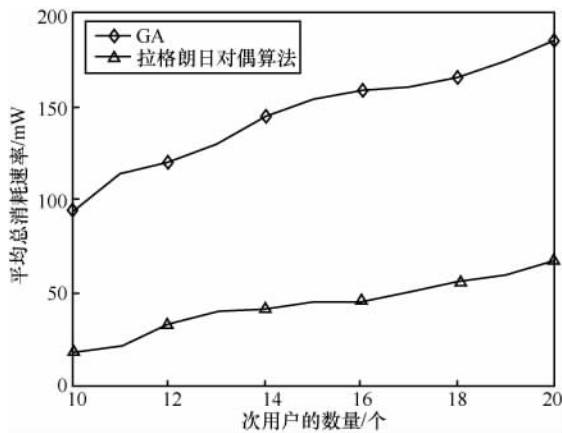


图9 次用户消耗的总功率

合优化问题进行了研究。在主用户和次用户 QoS 的约束下,针对不可行系统提出了功率和接入控制的联合优化;针对可行系统提出了传输速率和功率分配的联合优化。由于接入控制为 NP 问题,因此本文提出了基于线性规划的粒子群优化算法。数值仿真结果表明:在不可行系统中,相比其他接入控制算法,所提算法的复杂度有所提高,但是能够有效地提高接入量并且降低功率的消耗;在可行系统中,改进的拉格朗日对偶算法消耗的功率较小以及得到的传输速率较大,并且次用户的传输速率得到更为公平的分配。通过干扰约束的可行性验证,所提基于线性规划的粒子群优化算法复杂度的影响在考虑范围之内,同时还证明并分析了所提算法的收敛性。下一步将探究 MIMO 认知系统中结合接入控制和功率波束分配的优化问题。

参考文献:

- [1] XU Y, ZHAO X. Distributed power control for multiuser cognitive radio networks with quality of service and interference temperature constraints [J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2015, 15(14): 1773-1783.
- [2] CHEN L, ZHAO X. An improved power control AFSA for minimum interference to primary users in cognitive radio networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2016, 87(1): 293-311.
- [3] REN J, ZHANG Y, ZHANG N, et al. Dynamic channel access to improve energy efficiency in cognitive radio sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(5): 1.
- [4] RASTI M, HASAN M, LE L B, et al. Distributed uplink power control for multi-cell cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(3): 1.
- [5] MITLIAGKAS I, SIDIROPOULOS N D, SWAMI A. Joint power and admission control for ad-hoc and cognitive underlay networks: convex approximation and distributed implementation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10 (12): 3014-3017.
- [6] XING Y, MATHUR C N, HALEEM M A, et al. Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(4): 423-433.
- [7] LOPEZ R B, SANCHEZ S M, FERNANDEZ E M G, et al. Genetic algorithm aided transmit power control in cognitive radio networks [C]//International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks, April 10-13, Berlin, German. New Jersey: IEEE Press, 2014: 61-66.
- [8] QIAN L, LI X, ATTIA J, et al. Power control for cognitive radio ad hoc networks [C]//Local & Metropolitan Area Networks, March 3-8, 2007, London, UK. New Jersey: IEEE Press, 2007: 7-12.
- [9] LIU Y F, DAI Y H, MA S. Joint power and admission control: non-convex, approximation and an effective polynomial time deflation approach [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 63(14): 3641-3656.
- [10] MONTEJO S, SOUZA R D, FERNANDEZ E M G, et al. Impact of power allocation and antenna directivity in the capacity of a multiuser cognitive ad hoc network[J]. *Radio Engineering*, 2012, 21(4): 1110-1116.
- [11] LIN D, LABEAU F, YAO Y, et al. Admission control over internet of vehicles attached with medical sensors for ubiquitous healthcare applications [J]. *IEEE Journal of Biomedical & Health Informatics*, 2015: 1.
- [12] ZHANG X, LI H, LU Y, et al. Distributed energy efficiency optimization for MIMO cognitive radio network [J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(5): 847-850.
- [13] TADROUS J, NAFIE M. On the achievable rates of a secondary link coexisting with a primary multiple access network [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014(1): 1-24.
- [14] MONEMI M, RASTI M, HOSSAIN E. On joint power and admission control in underlay cellular cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14 (1): 265-278.
- [15] RASTI M, HOSSAIN E. Distributed priority-based power and admission control in cellular wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(9): 4483-4495.
- [16] MATSKANI E, SIDIROPOULOS N, LUO Z Q, et al. Convex approximation techniques for joint multiuser downlink beamforming and admission control [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(7): 2682-2693.

- [17] SONG Q, NING Z, HUANG Y, et al. Joint power control and spectrum access in cognitive radio networks[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2014, 41(1): 379-388.
- [18] CELEBI H, GUVENC I, GEZICI S, et al. Cognitive-radio systems for spectrum, location, and environmental awareness[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2010, 52(4): 41-61.

[作者简介]



朱江(1977-),男,博士,重庆邮电大学副教授,主要研究方向为通信理论与技术、信息安全技术等。



杜清敏(1990-),女,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为认知无线电。



巴少为(1991-),女,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为认知无线电。