

动态频谱访问中的最小最大公平功率与数据率联合控制算法

顾洪宇 杨晨阳

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 该文研究动态频谱访问中次用户通过功率控制共享主用户频谱资源的问题。将最小最大公平功率与数据率联合控制问题建模为准凹优化问题,提出了基于迭代求解线性规划问题的功率控制算法。此外,还提出了通过次用户间相互协作估计次用户到主用户以及次用户间链路增益的方法,分析了链路增益估计误差的统计特性,提出了利用保护裕量降低链路增益估计误差对主用户和次用户服务质量影响的方法。仿真结果表明:所提出算法的性能与现有算法相同,但计算时间仅为现有算法的10%~50%,甚至更低;1 dB的干扰裕量和1.5 dB的信干噪比裕量足以保证主用户和次用户服务质量免受链路增益估计误差的影响。

关键词: 无线通信; 动态频谱访问; 功率控制; 最小最大公平

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1919-06

Min-Max Fair Power and Rate Control Algorithm for Dynamic Spectrum Access

Gu Hong-yu Yang Chen-yang

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In this paper, the power control problem is studied for secondary users to share primary users' spectrum. The joint power and rate control under minimal-maximal fair criterion is formulated as a quasi-concave optimization, and an algorithm is proposed to obtain the optimal solution by iteratively solving linear programmings. Moreover, an approach is presented to estimate the link gains used in power control, the statistics of estimation error is analyzed, and the safeguard margins are used to alleviate the impact of the estimation error on the quality of service (QoS) of primary users and secondary users. Simulation results show that the proposed algorithm reduces the computation time by 50%~90% or more without performance loss, and that 1 dB interference margin and 1.5 dB signal-to-interference and noise margin are enough to guarantee the QoS of both primary and secondary users in the presence of the link gain estimation error, respectively.

Key words: Wireless communication; Dynamic spectrum access; Power control; Min-max fairness

1 引言

无线频谱资源短缺是当前无线通信领域面临的一大挑战。为解决该问题,人们开始考虑引入动态频谱访问机制,允许未经授权的次用户在不影响主用户服务质量的前提下使用授权给主用户、但未被充分利用的频谱资源。

为确保主用户服务质量,次用户需要通过功率控制来降低对同频段主用户的干扰,或者避免与主用户工作在相同频段^[1]。本文研究次用户通过功率控制共享主用户频谱资源的问题。它是超宽带系统与其它无线系统共存时必须解决的问题^[2]。在二级频谱市场中,虚拟运营商在租用主运营商基站为自己的用户提供服务时也需要通过功率控制来确保不干扰主运营商业务^[3]。

虽然传统无线网络中功率控制技术已经相当成熟,但是相关研究^[4]并未考虑动态频谱访问中所特有的干扰功率限制,即次用户对主用户的累积干扰应低于主用户的最大干扰功率限制。目前,关于单个次用户通过功率控制共享主用户频谱资源的研究已经取得了一些成果^[5,6]。多个次用户与主用户共享频谱的功率控制问题实为带有干扰功率限制的干扰信道功率控制问题,具体可以分为功率与数据率联合控制和准入与功率联合控制两类问题。前者根据一定的公平准则为每个次用户分配尽可能高的数据率^[7,8];后者考虑所有次用户以固定数据率传输的情况,并使得尽可能多的次用户接入网络^[7-9]。

本文研究动态频谱访问中的功率与数据率联合控制问题。通过将最小最大公平准则下的功率与数据率联合控制问题建模为准凹优化问题,提出了基于迭代求解线性规划问题的功率与数据率联合控制

算法。与将该问题建模为几何规划问题求解^[7]相比,所提出算法在达到相同性能的同时,大大地降低了计算时间。此外,本文还考虑了估计链路增益以及降低链路增益估计误差对主用户和次用户服务质量影响的方法,从而为文献[7-9]以及本文所作出的已知链路增益的假设提供了可行的解决方案。

下文安排如下:第2节介绍系统模型;第3节提出最小最大公平最优功率与数据率联合控制算法;第4节讨论估计链路增益以及降低估计误差对主用户和次用户服务质量影响方法;第5节是仿真结果;最后是结束语。

2 系统模型

考虑 K 个主用户与 N 个次用户链接间的频谱共享问题,其中主用户指主用户接收机,次用户链接指一对发送/接收次用户。次用户受中心节点控制。中心节点通过功率控制在不影响主用户服务质量的前提下为各个次用户链接分配尽可能大且公平的数据率。用 $I_{\max}^{(k)}$ 表示主用户 k 所能忍受的最大干扰功率,则其服务质量不受影响的条件为

$$I_k \triangleq \sum_{i=1}^N P_i A_{ki} \leq I_{\max}^{(k)} \quad (1)$$

其中, P_i 为次用户链接 i 的发射功率,低于最大发射功率 P_{\max} , A_{ki} 为次用户链接 i 发送方到主用户 k 的链路增益。

假设次用户采用码分多址技术接入主用户频谱,则次用户链接 i 的接收信干噪比为^[4]

$$\gamma_i = \frac{P_i G_{ii}}{R_i \left(\eta_i + T_c \sum_{j=1, j \neq i}^N P_j G_{ij} \right)} \quad (2)$$

其中, G_{ij} 为次用户链接 j 发送方到次用户链接 i 接收方的链路增益, R_i 为次用户链接 i 的数据率; η_i 为热噪声和主用户对次用户链接 i 接收方干扰的总功率; T_c 为码片周期。为确保传输质量,次用户链接的接收信干噪比应高于门限 γ^* 。

3 最小最大公平功率控制算法

为公平地分配数据率,考虑最小最大公平功率与数据率联合控制优化问题,即使所有次用户链接中最小的数据率最大。考虑第2节的各种约束,该问题可写为

$$(P.1) \quad \max_{(P_1, \dots, P_N)} : \min_{i=1, \dots, N} R_i \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \gamma_i \geq \gamma^*, \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$0 \leq P_i \leq P_{\max}, \quad i = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$I_k \leq I_{\max}^{(k)}, \quad k = 1, \dots, K \quad (6)$$

在求解优化问题(P.1)前,先给出如下命题。

命题 1 若优化问题(P.1)存在最优解,则在最优功率控制方案下,所有次用户链接的接收信干噪比均等于门限 γ^* ,且所有次用户链接的数据率相同。

其证明方法与文献[10]中命题3证明方法类似,这里不再赘述。

应用命题1,由式(2)可得

$$R_i = \frac{P_i G_{ii}}{\gamma^* \left(\eta_i + T_c \sum_{j=1, j \neq i}^N P_j G_{ij} \right)} \quad (7)$$

可见, R_i 是发射功率向量 (P_1, \dots, P_N) 的线性分数函数。因为式(7)等号右边分母恒正,所以 R_i 的 β -超水平集 $\mathcal{S}_{R_i}(\beta) \triangleq \{(P_1, \dots, P_N) \in \mathbb{R}_N^+ \mid R_i \geq \beta\}$ 为凸集,其中 \mathbb{R}_N^+ 为 N 维非负实向量集合。因为凸集的交集仍为凸集,所以目标函数式(3)的 β -超水平集 $\mathcal{S}_{\min}(\beta) = \bigcap_{i=1}^N \mathcal{S}_{R_i}(\beta)$ 也是凸集,进而目标函数式(3)为准凹函数^[11]。又因为约束条件式(4)–式(6)均为线性,所以优化问题(P.1)是准凹优化问题。

参照文献[11]求解准凸问题的方法,本文提出一种计算准凹优化问题(P.1)最优解的算法,其基本思想是在目标函数式(3)的 β -超水平集与由线性约束条件式(4)–式(6)构成的凸集的交集非空的前提下使得 β 尽可能的大。这两个凸集的交集非空意味着存在满足约束条件式(4)–式(6)的功率控制方案使每个次用户链接的数据率都大于 β 。

给定 β , 通过求解优化问题:

$$(P.2) \quad \min_{(P_1, \dots, P_N)} : \sum_{i=1}^N P_i \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad R_i \geq \beta, \quad i = 1, \dots, N \quad (9)$$

$$0 \leq P_i \leq P_{\max}, \quad i = 1, \dots, N \quad (10)$$

$$I_k \leq I_{\max}^{(k)}, \quad k = 1, \dots, K \quad (11)$$

可以判断上述两个凸集的交集是否为空。该优化问题以总功率最小为目标是为了节约能量。约束条件式(9)源于优化问题(P.1)目标函数 β -超水平集的定义。将式(7)代入式(9),两边同时乘以 γ^* 并除以 β 可得:

$$\frac{P_i G_{ii}}{\beta \left(\eta_i + T_c \sum_{j=1, j \neq i}^N P_j G_{ij} \right)} \geq \gamma^* \quad (12)$$

可见,约束条件式(9)要求所有次用户链接在以数据率 β 传输数据时的接收信干噪比大于 γ^* 。它和约束条件式(10)及式(11)一起,保证了所获得的最优功率分配方案满足约束条件式(4)–式(6)。

在搜索 β 的最大值 β^* 时,搜索范围 $[\beta_l, \beta_u]$ 受实际通信系统最小数据率 R_{\min} 和最大数据率 R_{\max} 限

制, 所以设定 $\beta_l = R_{\min}$, $\beta_u = R_{\max}$ 。采用高效的二分法搜索 β^* , 其收敛速度为 $\log_2((\beta_u - \beta_l)/\xi)$, 其中 ξ 为收敛判定条件, 即当 $(\beta_u - \beta_l) \leq \xi$ 时停止搜索。

基于上述讨论, 可以给出最小最大公平功率与数据率联合控制算法, 参见算法 1。在算法 1 中, 优化问题(P.2)的目标函数及约束条件均为线性, 是线性规划, 可用单纯型法求解。因为单纯型算法在求解中小规模线性规划问题时的计算复杂度低于多项式时间算法^[2], 而二分法是对数时间搜索算法, 所以算法 1 的计算复杂度会比用几何规划建模求解相同优化问题^[7]低。

算法 1 最小最大公平功率与数据率联合控制算法

- (1) 初始化 β 的搜索范围 $[\beta_l, \beta_u] = [R_{\min}, R_{\max}]$, 以及最大值 $\beta^* = 0$ 。
- (2) 根据二分法, $\beta = (\beta_l + \beta_u)/2$ 。
- (3) 求解优化问题(P.2)。如果存在最优解 (P_1^o, \dots, P_N^o) , 则 $\beta^* = \beta$, $\beta_l = \beta$, $(P_1^*, \dots, P_N^*) = (P_1^o, \dots, P_N^o)$; 否则, $\beta_u = \beta$ 。
- (4) 如果 $(\beta_u - \beta_l) > \xi$, 则重复第(2)步和第(3)步; 否则, 执行第(5)步。
- (5) 如果 $\beta^* > 0$, 则输出最优功率分配方案 (P_1^*, \dots, P_N^*) 以及数据率分配方案 $(R_1^*, \dots, R_N^*) = (\beta^*, \dots, \beta^*)$; 否则, 功率控制问题无解。

4 链路增益估计

无论是本文, 还是文献[7-9], 都假设已知链路增益。对于二级频谱市场, 主用户和次用户可以通过相互协作估计链路增益。但当主用户和次用户不合作时, 据作者所知, 目前还没有人考虑如何实现该假设。本节将针对这种情况讨论估计链路增益以及减轻链路增益估计误差对主用户和次用户服务质量影响的方法。为便于叙述, 本节将暂时忽略链路增益符号的下脚标。

考虑块衰落信道, 假设信道相干时间远大于链路增益估计和功率控制所需时间。考虑主用户为时分双工时分多址系统。对于频分双工或者频分多址的主用户系统, 下文给出的方法稍作改动后仍然适用。对于所考虑的主用户系统, 次用户可用下述协议来估计并向中心节点汇报链路增益信息:

- (1) 所有次用户均保持静默, 并利用主用户接收机在成为发射机时所发送的信号估计次用户到主用户接收机的链路增益 Λ 。
- (2) 中心节点根据它所估计出的到主用户接收机的链路增益来选取发射功率, 并轮询网络中包括发送方和接收方在内的所有次用户。每个被轮询的

次用户根据它所估计出的到主用户的链路增益决定发射功率, 并向中心节点汇报它到主用户的链路增益估计 $\hat{\Lambda}$ 。其它次用户同时利用被轮询次用户所发送的信号估计它们到该次用户的链路增益 G 。

(3) 中心节点再次轮询所有次用户。被轮询次用户向中心节点汇报它到其它次用户的链路增益 \hat{G} 。

下面以估计次用户到主用户的链路增益 Λ 为例介绍链路增益的估计方法。当主用户接收机以功率 E 发射信号时, 因为所有次用户及其它主用户都处于静默状态, 所以次用户接收信号的采样可以表示为

$$y_m = \sqrt{E\Lambda}x_m + n_m \quad (13)$$

其中, x_m 为发射信号采样点, 且有 $E\{x_m\} = 0$, $E\{x_m x_m^*\} = 1$ ($E\{\cdot\}$ 为随机变量的期望, $*$ 表示共轭), n_m 为接收机热噪声, 服从零均值高斯分布, 方差为 σ^2 。对接收信号采样的功率进行平均可得

$$Y = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M y_m y_m^* = aE\Lambda + b\sqrt{E\Lambda} + c \quad (14)$$

其中, $a = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M x_m x_m^*$, $b = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (x_m n_m^* + x_m^* n_m)$, $c = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M n_m n_m^*$ 。由 x_m 及 n_m 的统计特性可知, 当 M 足够大时有 $a \approx 1$, $b \approx 0$, $c \approx \sigma^2$, 进而有

$$Y \approx E\Lambda + \sigma^2 \quad (15)$$

根据式(15), 本文可以给出链路增益 Λ 的估计

$$\hat{\Lambda} = (Y - \sigma^2) / E \quad (16)$$

次用户间链路增益 G 的估计方法与上述方法类似, 但是, 在估计 G 时会受到来自主用户发射信号的干扰。不过, 因为次用户为扩频通信系统, 所以可以采用先解扩再估计的方法来降低主用户信号干扰的影响。

考虑到链路增益估计误差会使得根据链路增益估计值 $\hat{\Lambda}$ 和 \hat{G} 计算出来的功率控制方案无法保证主用户和次用户的服务质量, 因此需要进一步讨论确保主用户和次用户服务质量的方法。这里所说的服务质量是指中断概率。对于主用户, 中断概率是指次用户累积干扰功率超过其干扰功率限制的概率; 对于次用户, 中断概率则是指次用户链接的接收信噪比低于接收信噪比门限的概率。

为确保主用户服务质量, 本文采用干扰裕量 $\nu (\geq 0 \text{ dB})$ 来降低链路增益估计误差的影响, 即在计算功率控制方案时采用更为严格的干扰功率限制 $I_{\max}^{(k)} / \nu$ 代替式(11)中的干扰功率限制 $I_{\max}^{(k)}$ 。这样, 所得到的功率控制方案对主用户 k 的累积干扰功率就会小于 $I_{\max}^{(k)} / \nu$ 。因此, 即便存在链路增益估计误

差, 主用户的服务质量也会得到一定的保证。对于次用户链接, 本文采用信干噪比裕量 $\delta(\geq 0 \text{ dB})$ 保证其服务质量, 即利用 $\delta\gamma^*$ 代替式(7)中的 γ^* 来计算功率控制方案。其原理与干扰裕量相同。

5 仿真分析

本节将以超宽带认知无线网络为例对提出的方法进行仿真分析。之所以选择超宽带系统, 是因为其设计初衷就是为了实现频谱共享、提高频谱使用效率^[13]。

考虑在 100 m^2 方形区域内随机分布 $K=2$ 个主用户和 N 个次用户链接的场景。参照文献[2], 设定 $I_{\max}^{(k)} = -92.01 \text{ dBm}$, $k=1,2$ 。考虑带宽为 500 MHz 的超宽带系统, $T_c = 2 \text{ ns}$, $R_{\max} = 10 \text{ Mbps}$, $R_{\min} = 1 \text{ bps}$, $\eta_i = -174 \text{ dBm/Hz}$, $i=1, \dots, N$, $\gamma^* = 10 \text{ dB}$ 。根据美国联邦通信委员会的规定^[13], 设定 $P_{\max} = -14.31 \text{ dBm}$ 。假设链路增益由路径损耗 $L = (d/d_r)^{-\alpha}$ 和由阴影衰落和多径衰落构成的对数正态分布随机衰落^[14]两部分构成。参考距离 $d_r = 0.01 \text{ m}$, 路径损耗因子 $\alpha = 3.07$, 随机衰落标准差为 3.9 dB ^[15]。

5.1 功率与数据率联合控制算法性能评估

本节将以和数据率 $R_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^N R_i$ 与公平性因子 $F = \left(\sum_{i=1}^N R_i \right)^2 / \left(N \sum_{i=1}^N R_i^2 \right)$ ^[16] 作为性能指标比较所提出的功率与数据率联合控制算法与文献[7,8]中的算法。此外, 还将以计算时间来衡量这些算法的计算复杂度。文献[7,8]分别用几何规划建模求解了最小最大公平和比例公平准则下的功率与数据率联合控制问题。为表述方便, 用算法 1、算法 2 和算法 3 分别代表本文提出的算法, 文献[7]中的算法和文献[8]中的算法。因为链路增益估计误差对 3 种算法的影响相同, 所以在分析中将忽略链路增益估计误差的影响。

图 1 为 3 种算法在 1000 个随机生成的仿真场景下给 $N=4,5$ 个次用户链接分配的和数据率的累积分布函数。因为算法 1 和算法 2 解决相同的优化问题, 所以其性能也完全相同。此外, 算法 1 和算法 2 为次用户链接分配的和数据率都比算法 3 低。原因在于它们采用的最小最大公平准则比算法 3 采用的比例公平准则更为严格, 将为所有次用户链接分配相同的数据率。在这种情况下, 和数据率将受到一些无法以较高数据率传输的次用户链接的制约。

图 2 为 3 种算法在 1000 个随机生成的仿真场景下给 $N=4,5$ 个次用户链接分配数据率的公平性因子的累积分布函数。因为算法 1 和算法 2 为所有次

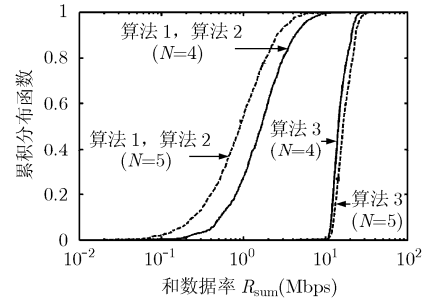


图 1 次用户链接和数据率累积分布函数

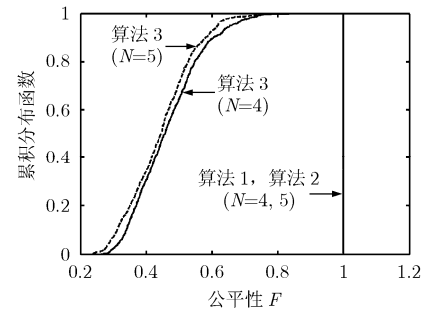


图 2 次用户链接公平性累积分布函数

用户链接分配相同的数据率, 所以无论链接数目多少, 公平性因子永远为 1。与之相比, 算法 3 因为采用了较为宽松的比例公平准则, 所以在保证公平性方面的能力相对较弱。

表 1 为 3 种算法在 1000 个随机生成的仿真场景下计算功率与数据率分配方案的平均时间。因为仿真场景变化对计算时间的影响很小, 所以没有给出计算时间的累积分布曲线。对于算法 1 和算法 2, 考虑次用户链接数目 N 从 4 到 10; 对于算法 3, 由于计算时间过长, 仅考虑 $N=4$ 和 5 两种情况。由表 1 可知, 算法 1 的计算时间仅为解决相同优化问题的算法 2 的 10%~50%, 且随 N 增加, 算法 1 在计算时间方面的优势将更为明显。这与第 3 节最后一段的分析完全一致。与算法 1 和算法 2 相比, 算法 3 的计算时间则要高出 1 至 2 个数量级。虽然算法 2 与算法 3 都是通过求解几何规划问题来计算最优功率控制方案, 但是算法 2 的目标函数是一个单项式, 而算法 3 的目标函数则是一个多项式, 且多项式的项数随次用户数目 N 指数增加, 所以在其它约束条件相同的情况下, 算法 3 的计算时间要比算法 2 高很多。

5.2 链路增益估计、干扰裕量与信干噪比裕量

本节研究链路增益估计误差的统计特性、链路增益估计误差对主用户和次用户服务质量的影响, 以及如何选取干扰裕量和信干噪比裕量来保证主用户和次用户的服务质量。

表 1 功率控制算法平均时间(s)

	N				
	4	5	6	8	10
算法 1	0.136	0.140	0.144	0.170	0.190
算法 2	0.271	0.473	0.668	1.213	2.017
算法 3	5.628	75.50	—	—	—

在评估链路增益估计性能时, 考虑归一化估计误差 $e \triangleq (\Lambda - \hat{\Lambda}) / \Lambda$ 的统计特性。与考虑估计误差 (即 $\Lambda - \hat{\Lambda}$) 本身的统计特性相比, 这样做将便于后面研究链路增益误差对服务质量的影响。在图 3 中, 实线为 e 的实测累积分布函数, 虚线为与 e 具有相同方差的零均值高斯分布的累积分布函数, M 为采样点数, EA/σ^2 为次用户接收主用户信号的信噪比。由图可知, e 服从零均值高斯分布。表 2 进一步给出了 M 和 EA/σ^2 取不同值时 e 的标准差 σ_e 的取值。由表可知, 当 $M > 500$ 时, 基本上可以保证 $\sigma_e < 5\%$ 。

表 2 链路增益估计归一化误差标准差 σ_e

M	EA/σ^2 (dB)			
	5	10	15	20
50	0.171	0.091	0.051	0.028
100	0.121	0.066	0.036	0.020
500	0.055	0.029	0.016	0.009

在分析链路增益误差对主用户和次用户服务质量影响时, 假设次用户链路增益估计误差也服从零均值高斯分布, 且标准差与次用户到主用户接收机链路增益估计误差的标准差相同。图 4 研究了链路增益误差对主用户服务质量的影响, 其评估指标中断概率 O_p 的定义参见第 4 节。在图中, 假设次用户链接数 $N = 4$, 链路增益估计归一化误差标准差 $\sigma_e = 5\%$, 次用户信干噪比裕量 $\delta = 0, 0.5, 1$ dB。由图 4 可知, 三条曲线完全重合, 从而说明 δ 的取值对 O_p 没有影响。为使 $O_p < 1\%$, 干扰裕量 ν 应大于 0.416 dB。

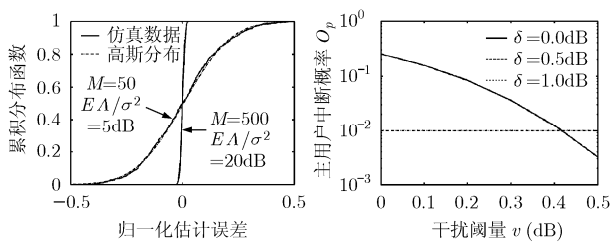


图 3 归一化估计误差累积分布函数

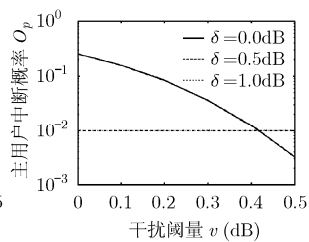


图 4 主用户中断概率与干扰裕量的关系

图 5 和图 6 分别给出了次用户链接和数据率 R_{sum} 和中断概率 O_s 随信干噪比裕量 δ 变化的曲线, 其中次用户数目 $N = 4$, 主用户干扰裕量 $\nu = 0.416$ dB。由图可知, R_{sum} 和 O_s 都随 δ 的增加而减小。若要确保 $O_s < 1\%$, 就需要 $\delta > 0.573$ dB, 这将使得 R_{sum} 下降 15% 左右; 相反, 若要提高 R_{sum} , 就需要降低 δ , 这将使得 O_s 增大。可见, 在实际应用中需要根据具体情况来选取 δ , 从而在 R_{sum} 和 O_s 之间进行折衷。

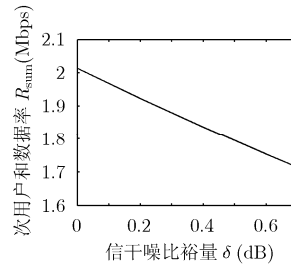


图 5 次用户链接和数据率与信干噪比裕量的关系

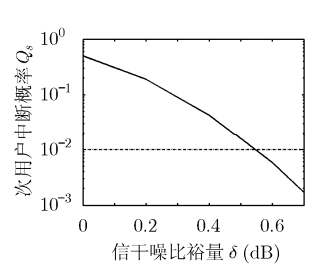


图 6 次用户链接中断概率与信干噪比裕量的关系

表 3 和表 4 给出了能够确保主用户中断概率 $O_p < 1\%$ 的干扰裕量 ν 以及能够确保次用户中断概率 $O_s < 1\%$ 的信干噪比裕量 δ 随链路增益估计归一化误差标准差 σ_e 和次用户链接数 N 变化的情况。在研究二者随 σ_e 变化的情况时, 设定 $N = 4$ 。在研究它们受 N 的影响时, 设定 $\sigma_e = 5\%$ 。此外, 因为 δ 的取值对 O_p 几乎没有影响 (参见图 4), 所以在研究 ν 的取值随 σ_e 和 N 变化时设定 $\delta = 0$ dB。在研究 δ 取值随 σ_e 和 N 变化的趋势时, 设定 ν 为 $O_p = 1\%$ 时的取值。由表 3 可知, 随着 σ_e 增加, 为了确保主用户和次用户的服务质量, 需要适当地提高 ν 和 δ 。由表 4 可知, ν 和 δ 受 N 变化的影响不大。因为利用第 4 节给出的链路增益估计方法可以确保 $\sigma_e < 5\%$ (参见表 2), 所以根据表 3 和表 4 中的数据可知, 利用小于 1 dB 的干扰裕量和 1.5 dB 的信干噪比裕量完全可以确保主用户和次用户的服务质量。

6 结论

本文利用优化理论解决了认知无线网络中的功率与数据率联合控制问题。通过将最小最大公平

表 3 干扰裕量 ν 和信干噪比裕量 δ 与链路增益估计误差的关系

	σ_e (%)			
	1	2	5	10
$\nu(O_p = 1\%)$ (dB)	0.080	0.167	0.416	0.798
$\delta(O_s = 1\%)$ (dB)	0.111	0.223	0.573	1.209

表4 干扰裕量 ν 和信干噪比裕量 δ 与次用户链接数的关系

	N			
	4	6	8	10
$\nu(O_p = 1\%)$ (dB)	0.416	0.281	0.354	0.327
$\delta(O_s = 1\%)$ (dB)	0.572	0.560	0.538	0.550

准则下的功率与数据率联合控制问题建模为一个准凹优化问题,提出了一种通过迭代求解线性规划问题来计算最优功率分配方案的优化算法。为了给功率控制算法已知链路增益的假设提供一种可行的解决方案,本文考虑了估计平均链路增益的方法,并通过引入干扰裕量和信干噪比裕量使得主用户和次用户的服务质量得到了保证。

参 考 文 献

- [1] Akyildiz F, Lee W Y, and Vuran M C, *et al.* NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [2] Giuliano R and Mazzenga F. Capacity analysis for UWB systems with power controlled terminals under power and coexistence constraints. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(11): 3316-3328.
- [3] Chapin J M and Lehr W H. Cognitive radios for dynamic spectrum access-the path to market success for dynamic spectrum access technology. *IEEE Communications Magazine*, 2007, 45(5): 96-103.
- [4] Hanly S V and Tse D N C. Power control and capacity of spread spectrum wireless networks. *Automatica*, 1999, 12(12): 1987-2012.
- [5] Gastpar M. On capacity under receive and spatial spectrum-sharing constraints. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(2): 471-487.
- [6] Ghasemi A and Sousa E S. Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(2): 649-658.
- [7] Le L and Hossain E. QoS-aware spectrum sharing in cognitivewireless networks. *IEEE GLOBECOM 2007*, Washington, DC, USA, Nov. 26-30, 2007.
- [8] Xing Y, Mathur C N, and Haleem M A, *et al.* Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(4): 423-433.
- [9] Qian L, Li X, and Attia J, *et al.* Power control for cognitive radio ad hoc networks. *IEEE WANLAN 2007*, Princeton, New Jersey, USA, Jun. 10-13, 2007.
- [10] Muqattash A, Krunz M, and Shu T. Performance enhancement of adaptive orthogonal modulation in wireless CDMA systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(3): 565-578.
- [11] Boyd S and Vandenberghe L. *Convex Optimization*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004: 144-146.
- [12] Cormen T H, Leiserson C E, and Rivest L R, *et al.* *Introduction to Algorithms*. 2nd ed, Cambridge, MA, USA: The MIT Press, 2001: 790-803.
- [13] FCC. First Report and Order. ET Docket 02-48, Apr. 2002.
- [14] Stuber G L. *Principles of Mobile Communication*. 2nd ed, Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 2001: 39-126.
- [15] Molisch A F, Cassioli D, and Chong C C, *et al.* A comprehensive standardized model for ultrawideband propagation channels. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(11): 3151-3166.
- [16] Jian R, Chiu D, and Hawe W. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems. DEC, Research Report TR301, Sept. 1984.

顾洪宇: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为无线网络资源管理和性能分析。

杨晨阳: 女, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向包括MIMO、超宽带、无线传感器网络以及认知无线电中的信号处理。