

认知无线网络中基于主系统有限反馈的频谱共享方案

高欢芹¹, 宋荣方^{1,2}

(1. 南京邮电大学 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210003;

2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 提出一种频谱共享方案, 该方案适用于同时存在多个主用户和一对次用户的场景。各主用户依据接收机反馈的有限信道质量信息 (CQI, channel quality information) 分配发送功率及传输速率。次用户根据偷听到的主系统 CQI 有限反馈, 以适当的功率及速率接入信道。次用户接入信道的行为对各主用户造成一定干扰, 以致主系统传输速率遭受一定损失。在主系统速率损失约束条件下, 得出了使次系统吞吐量最大化的次用户发送功率及传输速率最佳分配方案。数值结果表明, 对于每个主用户仅需反馈 3~4 个量化比特, 次系统的有效吞吐量就可堪比于主次发射端均拥有主系统链路完整 CQI 的情况。仿真结果显示, 所提出的频谱共享方案能够满足主系统速率损失约束。

关键词: 认知无线电; 有限反馈; 速率损失约束; 频谱共享

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)04-0103-09

Spectrum sharing scheme in cognitive radio networks based on primary limited feedback

GAO Huan-qin¹, SONG Rong-fang^{1,2}

(1. College of Telecommunication and Information Engineering, Nanjing University of Post and Telecommunication, Nanjing 210003, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A spectrum sharing scheme for a pair of secondary users co-existing with multiple primary users was proposed. The primary users exploit the limited feedback of channel quality information (CQI) to allocate their transmission power and rate. By overhearing the limited feedback of primary CQI, the secondary user accessed the channel with proper transmission power and rate while causing interference to the primary users and so the rate loss of the primary system. Under the primary rate loss constraint, the optimal transmit power and transmission rate for the secondary was obtained to maximize the secondary user throughput. Numerical results show that, with only 3 or 4 bits of feedback to each primary user, the effective throughput of the secondary system is comparable to the case with both primary and secondary transmitters having the perfect CQI of the primary link. The simulation results demonstrate that the proposed spectrum sharing scheme can meet the primary rate loss constraint.

Key words: cognitive radio; limited feedback; rate loss constraint; spectrum sharing

1 引言

随着无线应用需求大量增长, 无线频谱显得日

益短缺。近年来, 由 Mitola J 提出的认知无线电技术^[1]被美国联邦通信委员会 (FCC, federal communications commission) 认为可以解决无线频谱短缺

收稿日期: 2012-07-22; 修回日期: 2013-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972041, 61271234); 教育部博士点基金资助项目(20123223110002); 东南大学移动通信国家重点实验室开放课题基金资助项目; 江苏省研究生创新计划基金资助项目(CX09B-146Z); 江苏高校优势学科建设工程资助项目——“信息与通信工程”基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60972041, 61271234); Ph.D. Program Foundation of Ministry of Education (20123223110002); Open Research Foundation of National Mobile Communication Research Laboratory, Southeast University; Graduate Innovation Program of Jiangsu Province (CX09B-146Z); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions - Information and Communication Engineering

问题。认知无线电技术允许次用户（非授权用户）接入原先已经分配给主用户（授权用户）的频段，实现次用户和主用户频谱共享。在频谱共享过程中，一个突出问题就是管理和控制次用户机会接入对主系统引起的干扰。文献[2,3]在干扰温度约束下分别讨论了加性高斯白噪声（AWGN, additive white Gaussian noise）信道和瑞利衰落信道下主接收机的容量问题。文献[4]提出了一种称为速率损失约束（RLC, rate loss constraint）的干扰管理策略，同时文献[4]还表明在 RLC 约束下，认知系统能够获得比传统的干扰温度约束条件下更高的吞吐量。

为了对干扰进行管理并将干扰控制在主系统所能忍受的门限以下，认知无线电系统的发射端需要知晓主系统链路完整的信道状态信息。然而，得知完整的信道状态信息在实际情况下难以做到，几乎不可能实现。因此，基于信道信息有限反馈的认知无线电系统的设计被广泛研究。文献[5]研究了单小区认知无线电系统，基于小区中每个认知用户向基站反馈的量化信道信息实现动态资源分配。文献[6]提出了一种主用户采用自适应调制编码方案，但发送功率恒定的频谱共享方法。文献[7]对次信道及干扰信道采用广义劳埃德类型算法（generalized lloyd algorithm）进行联合量化，提出一种渐进量化功率分配算法。文献[8,9]研究了利用主网控制信道有限反馈使得次用户吞吐量最大化方案。值得注意的是，以上现有的研究均假定存在一个中心基站对主次用户之间的相互影响进行协调，而在实际的部署中这种情况很可能遭受局限，无法实现。文献[10]研究了一对主用户和一对次用户共存情况下基于主信道量化反馈的频谱共享方案。

本文的研究目标是在次用户发送端可获得主系统链路量化 CQI 条件下使次系统吞吐量最大化，同时满足主系统速率损失约束。本文中假定各主用户对次用户的存在毫无察觉，次用户作为一个被动的聆听者。各主用户信道质量信息（CQI, channel quality information）由主接收端进行估计、量化并反馈给主发射端。次用户发射机依据偷听到的主系统量化 CQI 适时地接入对应主信道。次用户的机会接入对各主用户造成一定干扰，以致主系统的传输速率遭受一定损失。本文提出了一种基于多个主用户 CQI 有限反馈的次用户频谱共享方案。研究得出了使次系统吞吐量最大化的发送功率与传输速率最佳分配方案，该方案同时能够满足主用户 RLC

约束。详细分析了发送端完全未知/已知主系统 CQI 时的最佳频谱共享方案，这 2 种情况可分别作为基于主系统 CQI 有限反馈的频谱共享方案的理论下限和上限。

2 系统模型

本文所研究的系统模型如图 1 所示，假设存在包含 M 个发射机和一个接收机的主系统，同时存在一对次用户收发信机。主用户发射机一直占用信道，次用户通过频谱共享的方式占用相同的信道。从发射机 i ($i \in \{1, 2, \dots, M, s\}$, $1, 2, \dots, M$ 代表各主用户, s 代表次用户) 到接收机 j ($j \in \{p, s\}$, p 代表主接收机, s 代表次接收机) 之间的信道功率增益用 g_{ij} 表示。假定信道功率增益服从均值为 \bar{g}_{ij} 的指数分布。

多个主用户以某种正交的方式同时与接收机之间进行数据传输。假定各主用户信道为块衰落信道，信道增益在一个块内保持不变，不同块之间发生变化并且相互独立。假定主接收机通过导频序列可完全获知主系统链路信道功率增益 g_{ip} , ($i = \{1, 2, \dots, M\}$)，通过有限反馈主发射机可得知信道功率增益的部分信息。依据信道功率增益的部分信息，主发射机从预先设计好的码本中选取某一发送功率及传输速率对，以突发方式进行数据传输。在一个块内的数据传输保持相同的发送功率及传输速率。在各主用户发送数据的同时，次用户根据偷听到的反馈信息尝试接入信道。假定次发射机已知主用户中预先设计好的量化码本，并假定发送端已知信道功率增益的均值 \bar{g}_{ij} 。

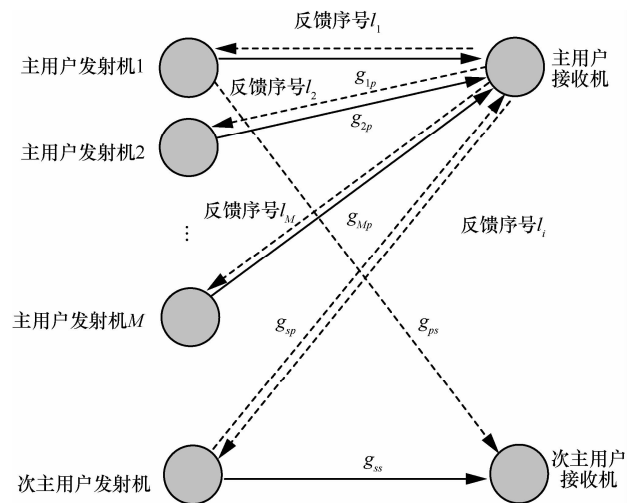


图 1 基于主信道量化反馈的频谱共享系统模型

3 主用户量化码本设计

文献[11]提出了一种用于点对点通信系统的量化码本设计方法。本文采用与文献[11]中相同的码本设计方法。假定将代表各主用户信道质量的信道功率增益 g_{ip} ($i \in \{1, 2, \dots, M\}$) 量化成 L 个区间, 即 $[0, \gamma_1)$, $[\gamma_1, \gamma_2)$, \dots , $[\gamma_{L-1}, +\infty)$ 。用 l_i ($0 \leq l_i \leq L-1, i = \{1, 2, \dots, M\}$) 表示信道功率增益 g_{ip} 所在的量化区间对应的序号, 序号越小表明信道质量越差。主接收机将序号 l_i 反馈给对应的主发射机 i , 所需要的反馈比特数为 $\lceil \log L \rceil$, $\lceil x \rceil$ 表示不小于 x 的最小整数。

各主发射机根据接收到的序号 l_i 从预设的码本中选取对应的发送功率 P_i^p 与传输速率 R_i^p ^{注1} 进行数据传输, 直到接收到下一个反馈序号重新选择对应的发送功率与传输速率。传输速率 R_i^p 取决于量化门限 γ_{l_i} 及发送功率 P_i^p 。对于第 i 个主用户而言, 传输速率、量化门限及发送功率三者之间关系式如下

$$R_i^p = \log\left(1 + \frac{\gamma_{l_i} P_i^p}{N_0}\right), l_i = 0, 1, \dots, L-1, i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (1)$$

其中, $0 \leq \gamma_0 \leq \gamma_1$, N_0 表示噪声功率。用 C_i^p 表示第 i 个主用户的信道容量, 其表达式为

$$C_i^p = \log\left(1 + \frac{g_{ip} P_i^p}{N_0}\right), l_i = 0, 1, \dots, L-1, i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (2)$$

由于以下的分析对于各用户均成立, 所以省去下标 i 。可以看出, 当 $l \geq 1$ 时, $R_l^p \leq C_l^p$ 总是成立。但是, 当 $l=0$ 时, 根据量化码本 $0 \leq g_{ip} < \gamma_1$, 而只有当 $g_{ip} \geq \gamma_0$ 时, 才有 $C_0^p \geq R_0^p$ 成立。

用 $F_i(\cdot)$ 表示第 i 个主用户信道质量累积分布函数 (CDF, cumulative distribution function), 假设其信道功率增益服从均值为 \bar{g}_{ip} ($i \in \{1, 2, \dots, M\}$) 的指数分布, 则 $F_i(\gamma) = 1 - e^{-\frac{\gamma}{\bar{g}_{ip}}}$ 。定义 $G_{i,l} = F_i(\gamma_{l+1}) - F_i(\gamma_l)$, $l = 0, 1, \dots, L-1$ 。第 i 个主用户的平均传输速率为

$$\bar{R}_i^p = \sum_{l=0}^{L-1} G_{i,l} R_l^p, i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (3)$$

注1: 本文中所有传输速率均是以自然对数为底, 相应的速率单位为 nats per second。

整个主系统的平均传输速率为

$$\bar{R}^p = \sum_{i=1}^M \sum_{l=0}^{L-1} G_{i,l} R_l^p \quad (4)$$

量化门限 γ_l 与发送功率 P_l^p ($l = 0, 1, \dots, L-1$) 可以通过使系统平均速传输率最大化来求得

$$\begin{aligned} & \max_{\{\gamma_l, P_l^p\}, l=0, 1, \dots, L-1} \bar{R}^p \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^M \{F_i(\gamma_1) P_0^p + \sum_{l=1}^{L-1} G_{i,l} P_l^p\} \leq M P_{\text{th}}^p \end{aligned} \quad (5)$$

其中, P_{th}^p 代表主系统平均每用户功率约束。

4 基于主用户有限反馈的频谱共享方案

假定次用户发射机可获知主系统的量化码本。在每个信道衰落块内, 次用户根据偷听到来自于主接收机的反馈信息, 即各主用户信道功率增益所在的量化区间序号 l_i ($0 \leq l_i \leq L-1, i = 1, 2, \dots, M$), 次发射机选择一对恰当的发射功率 P^s 及传输速率 R^s 进行数据传输。在每个块内, 次用户均根据最小的量化区间序号, 即 $l_m = \min_{i=1, 2, \dots, M} l_i$ ($0 \leq l_m \leq L-1$) 来选择发射功率及传输速率。序号越小表明该主用户的信道质量越差, 在利用多用户分集增益的系统中该用户所能带来的分集增益是最小的, 那么次用户传输则占用该用户的信道进行传输。次用户传输对主系统速率所造成的影响要小于规定的速率损失约束。假设与最小序号 l_m 对应的主用户为 m 。

在实际中, 次发射机的发射功率及传输速率对表 $\{P^s, R^s\}$ 可以预先生成, 一旦产生就存储在发射端, 并不随着信道的衰落而发生变化。 $P^s \triangleq [P_0^s, \dots, P_{L-1}^s]$ 、 $R^s \triangleq [R_0^s, \dots, R_{L-1}^s]$ 分别为对应于各量化区间次发射机的发射功率及传输速率。在每个块内, 次发射机偷听到主系统中反馈给各主用户的量化区间序号之后, 均根据最小的反馈序号 l_m 来查表 $\{P^s, R^s\}$, 选出恰当的发射功率 $P_{l_m}^s$ 及传输速率 $R_{l_m}^s$, 并迅速接入对应的主用户 m 所占用的信道。 $\{P^s, R^s\}$ 表的设计目标要使得次系统的平均传输速率 \bar{R}^s 最大化, 同时还要满足次系统平均发射功率约束 P_{th}^s 及主系统速率损失约束 r_{RL}^p 。数学模型如下^[10]

$$\begin{aligned} & \max_{P^s, R^s} \bar{R}^s \\ & 1 - \frac{R^p}{\bar{R}^p} \leq r_{RL}^p \\ & \text{s.t.} \quad \bar{P}^s \leq P_{\text{th}}^s \\ & P^s, R^s \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, \underline{R}^p 和 \bar{R}^p 分别表示存在和不存在次用户传输时主系统的平均传输速率。 \bar{R}^p 已经在式(4)中给出。主系统速率损失约束 r_{RL}^p 反映的是, 当出现次用户传输时, 主系统所能忍受的速率损失。也就相当于主用户所能允许的来自于次用户最大干扰量。次系统的平均发射功率 \bar{P}^s 表达式如下

$$\bar{P}^s = F_m(\gamma_l)P_0^s + \sum_{l=1}^{L-1} P_l^s G_{m,l} \quad (7)$$

为了解决式(6)所描述的最优化问题, 首先必须要评估 \underline{R}^p 和 \bar{R}^s 。若不存在次用户传输, 当 $l \geq 1$ 时, 由于主系统信道容量 C_l^p 与传输速率 R_l^p 总是满足 $C_l^p \geq R_l^p$, 即 $g_{ip} \geq \gamma_l (i \in \{1, 2, \dots, M\}, l \geq 1)$, 主系统能够时刻保持成功的信号传输。然而, 当次用户以发射功率 P_l^s 及传输速率 R_l^s 接入信道之后, 由次用户带来的额外干扰将使主系统信道容量减小, 甚至可能导致主用户传输中断。由次用户带来的干扰为: $I_s = P_l^s g_{sp}$ 。若将干扰当做噪声来处理, 第 i 个主用户的信道容量变为

$$\begin{aligned} \tilde{C}_l^p &= \log \left(1 + \frac{g_{ip} P_l^p}{N_0 + I_s} \right) \\ &= \log \left(1 + \frac{g_{ip}}{1 + \frac{g_{sp} P_l^s}{N_0}} \times \frac{P_l^p}{N_0} \right) \\ &= \log \left(1 + \frac{\tilde{g}_{ip} P_l^p}{N_0} \right), \\ l &= 0, 1, \dots, L-1, \quad i \in \{1, 2, \dots, M\} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, \tilde{g}_{ip} 表示存在次用户传输之后, 第 i 个主用户有效信道功率增益, 其数学表达式如下

$$\tilde{g}_{ip} = \frac{g_{ip}}{1 + \frac{g_{sp} P_l^s}{N_0}}, \quad i \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad l = 0, 1, \dots, L-1 \quad (9)$$

式(9)所描述的有效信道功率增益 \tilde{g}_{ip} 并不确定是否大于 γ_l , 如果 $\tilde{g}_{ip} < \gamma_l$, 第 i 个主用户传输将中断。当存在次用户传输时, 主系统平均传输速率可描述为(参见附录中推导过程)

$$\underline{R}^p = \sum_{i=1}^M \sum_{l=0}^{L-1} \Pr \{ \gamma_l \leq \tilde{g}_{ip}, \gamma_l \leq g_{ip} < \gamma_{l+1} \} R_l^p$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^{L-1} \left[\left(e^{-\frac{\gamma_l}{\tilde{g}_{ip}}} - e^{-\frac{\gamma_{l+1}}{\tilde{g}_{ip}}} \right) \frac{1}{1 + \frac{\tilde{g}_{ip} N_0}{\gamma_l \tilde{g}_{sp} P_l^s}} \times \right. \\ &\quad \left. \left(e^{-\frac{\gamma_{l+1} N_0}{\tilde{g}_{sp} P_l^s} \left(1 - \frac{\gamma_{l+1}}{\gamma_l} \right) \frac{1}{P_l^s}} - e^{-\frac{\gamma_l}{\tilde{g}_{sp}}} \right) \right] + R_l^p \end{aligned} \quad (10)$$

次用户以发射功率 P_l^s 及传输速率 R_l^s 接入信道主用户信道后, 如果次用户信道容量大于传输速率 R_l^s , 则次用户传输成功, 否则次用户传输失败。假定次用户接收机能够完全消除主系统所造成的干扰。次用户平均传输速率为

$$\begin{aligned} \bar{R}^s &= E \left\{ \Pr \left\{ \log \left(1 + \frac{g_{ss} P_0^s}{N_0} \right) \geq R_0^s \right\} F_m(\gamma_l) R_0^s + \right. \\ &\quad \left. \sum_{l=1}^{L-1} \Pr \left\{ \log \left(1 + \frac{g_{ss} P_l^s}{N_0} \right) \geq R_l^s \right\} G_{m,l} R_l^s \right\} \\ &= E \left\{ \exp \left(-\frac{(e^{R_0^s} - 1) N_0}{g_{ss} P_0^s} \right) F_m(\gamma_l) R_0^s + \right. \\ &\quad \left. \sum_{l=1}^{L-1} \exp \left(-\frac{(e^{R_l^s} - 1) N_0}{g_{ss} P_l^s} \right) G_{m,l} R_l^s \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

下面着手解决式(6)的最优化问题。不难发现式(6)所描述的频谱共享问题是个非线性、非凸优化问题, 通常对于这类问题很难以多项式时间得以解决。然而, 根据辅助定理 1^[10], 如果将次用户的传输速率 \mathbf{R}^s 用次用户的发射功率 \mathbf{P}^s 来表示, 可以证明式(6)所描述的目标函数是下凹的。

辅助定理 1 定义函数 $f(x, y) = e^{-\frac{ay}{x}} \log(1 + y)$, 其中, $x, y \geq 0, a > 0$, 则函数 $g(x) = \max_y f(x, y)$ 是关于变量 x 的凹函数。

式(6)中主系统速率损失约束也是个凹函数, 因此式(6)所描述的速率最大化问题是个典型的微分凸问题, 可以通过序列凸规划(SCP, sequential convex programming)方法有效地得以解决^[12]。SCP的思想是将优化问题的下凹部分线性化, 以致优化变量的可行域收缩到一个凸集, 从而将问题转化为凸问题; 然后, 利用最后一轮解持续对近似值进行修正直到目标函数收敛至最优点。值得注意的是, 在 SCP 规划中有两点很重要^[12]: 1)最后的解可能是

局部的而非全局最优的; 2) 有时可能会很难找到一个初始可行点。

在本文所研究的问题中不存在以上 2 个问题。首先, 由于信道衰落分布的连续性, 式(6)满足文献[13]中所描述的“时间共享”条件。主次系统的功率分配方案共享相同的信道增益瞬时, 从而信道衰落的瞬时共享替代了时间共享。因此, 只要满足卡罗需-库恩-塔克(KKT, Karush-Kuhn-Tucker)条件的任一局部最优解均为全局最优解。其次, 可以将次用户最初的发射功率设置成一个非常小的值来保证找到一个初始可行点, 同时能够满足 RLC 约束与平均发射功率约束。

5 主发射机完全不知/已知 CQI 时次系统吞吐量分析

本节分别研究主系统发射机完全不知和已知主系统 CQI 时次系统吞吐量性能。2 种情况可以分别作为基于主系统 CQI 有限反馈的次系统平均吞吐量性能理论下限与上限。

5.1 完全不知 CQI

主发射机完全不知 CQI 相当于主接收机根本不反馈 CQI。可将主系统的量化区间视为只包含 $[0, \gamma_1)$, 并且 $\gamma_1 = +\infty$, 各主发射机不管信道衰落如何变化, 均保持恒定的传输速率 R_0^p 及固定的发射功率 P_0^p 进行数据传输。这种情况下主系统根本无法获得多用户分集增益。根据式(4)可以得到该情况下主系统平均传输速率

$$\bar{R}^p = \sum_{i=1}^M (1 - F_i(\gamma_0)) R_0^p \quad (12)$$

其中, $R_0^p = \log(1 + \frac{\gamma_0 P_0^p}{N_0})$ 。

通过寻找最优的 γ_0 可使主系统平均吞吐量最大化

$$\max_{\gamma_0} \bar{R}^p \quad \text{s.t.} \quad P_0^p \leq P_{th}^p \quad (13)$$

出现次用户传输时, 根据式(10)可得到主系统平均传输速率为

$$\begin{aligned} \underline{R}^p &= \sum_{i=1}^M \Pr\{\gamma_0 \leq \tilde{g}_{ip}, \gamma_0 \leq g_{ip} < +\infty\} R_0^p \\ &= \sum_{i=1}^M \left[e^{-\frac{\gamma_0}{\tilde{g}_{ip}}} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{\tilde{g}_{ip} N_0}{\gamma_0 \tilde{g}_{sp} P_0^s}} \right) \right] R_0^p \quad (14) \end{aligned}$$

根据 RLC 约束门限 r_{RL}^p 及式(12), 可得下式

$$\underline{R}^p \geq \bar{R}^p (1 - r_{RL}^p) = R_0^p (1 - r_{RL}^p) \sum_{i=1}^M (1 - F_i(\gamma_0)) \quad (15)$$

由式(14)和式(15), 可以得到次系统发射功率

$$P_0^s = \min \left\{ \frac{N_0 \sum_{i=1}^M \tilde{g}_{ip}}{M \gamma_0 \tilde{g}_{sp} \left(\frac{1}{r_{RL}^p} - 1 \right)}, P_{th}^s \right\} \quad (16)$$

根据式(11)将次用户平均传输速率最大化即得到次用户发射机完全不知主系统 CQI 时次系统吞吐量

$$\max_{r_0^s} \bar{R}^s = \max_{r_0^s} \left[\exp\left(-\frac{r_0^s N_0}{\tilde{g}_{ss} P_0^s}\right) \log(1 + r_0^s) \right] \quad (17)$$

其中, $r_0^s = e^{R_0^s} - 1$ 。

5.2 完全已知 CQI

下面详细分析主次发射端均准确知晓各主用户信道增益 g_{ip} ($i \in \{1, 2, \dots, M\}$) 时次系统吞吐量性能。本文的分析与文献[4]的区别在于, 本文中假设次用户发射端仅知晓次用户链路的部分信道信息, 即信道指数衰落分布的均值。因此, 对于本文中次用户发射功率分配不能直接采用文献[4]中所提出的改进注水方法。假定主系统接收机反馈的最小量化区间序号所对应的主用户为 m , 用户 m 所对应的信道增益为 g_{mp} 。本文试图得到使次系统吞吐量最大化的次用户功率分配方案 $P^s(g_{mp})$, 同时能够满足与主接收机有限反馈时相同的主系统 RLC 约束。对于主发射机而言, 由于完全知晓信道增益的准确信息, 可以直接采用最佳注水功率分配方案。在此情况下, 可以得到类似于式(6)的最优化问题

$$\max_{P^s(g_{mp}), R^s(g_{mp})} \bar{R}^s = E[\mathbf{I}(A) R^s(g_{mp})] \quad (18)$$

$$\text{s.t.} \quad \underline{R}^p(P^s(g_{mp})) = E\left\{\sum_{i=1}^M \mathbf{I}(B) R_i^p(g_{ip})\right\}$$

$$\bar{P}^s(P^s(g_{mp})) = E[P^s(g_{pp})] \leq P_{th}^s$$

$$P^s(g_{mp}) \geq 0$$

$$R^s(g_{mp}) \geq 0$$

其中, $\mathbf{I}(\Lambda)$ 为指示函数(如果 Λ 为真, 函数值为 1, 否则为 0), A 、 B 分别表示以下 2 个事件

$$A = \left\{ \log\left(1 + \frac{g_{ss} P^s(g_{mp})}{N_0}\right) \geq R^s(g_{mp}) \right\} \quad (19)$$

$$B = \left\{ \log \left(1 + \frac{g_{ip} P_i^p(g_{ip})}{N_0 + g_{sp} P^s(g_{mp})} \right) \geq R_i^p(g_{ip}) \right\} \quad (20)$$

假设主系统采用精确的功率控制，来自于次系统任意小的干扰功率均会使得主系统的传输中断。次用户只能当 g_{mp} 在区间 $[0, \gamma_{RL}^p]$ 时进行传输，主用户在该区间内所能获得的吞吐量极为有限甚至为 0，如图 2 所示。

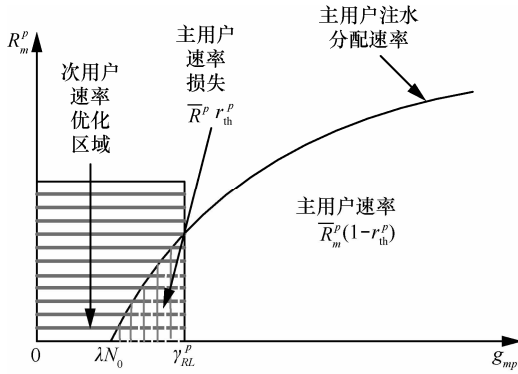


图 2 完全已知主系统 CQI 时次用户功率分配

门限 γ_{RL}^p 是通过注水方法满足主系统 RLC 约束时的计算结果。现在的问题是，次用户在该区间内应如何优化功率分配，使得次系统吞吐量最大化。借助文献[14]中功能优化的巧妙分析之后，文献[10]得出次用户的发射功率在该区间内服从均匀分布，并满足拉格朗日(Lagrangian)等式

$$P^s(g_{mp}) = \begin{cases} \frac{P_{th}^s}{F(\gamma_{RL}^p)}, & g_{mp} < \gamma_{RL}^p \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

进一步分析之后，得到相应的次用户平均传输速率为

$$\begin{aligned} \bar{R}^s &= E \left\{ \int_0^{\gamma_{RL}^p} R^s \left(\frac{P_{th}^s}{F_m(\gamma_{RL}^p)} \right) f_m(g_{mp}) dg_{mp} \right\} \\ &= E \left\{ R^s \left(\frac{P_{th}^s}{F_m(\gamma_{RL}^p)} \right) F_m(\gamma_{RL}^p) \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

其中， $R^s(x) \triangleq \max_y \exp(-\frac{yN_0}{x\bar{g}_{ss}}) \log(1+y)$ ，与辅助定理 1 中定义的函数相同。当发射功率 x 为一常数并已知条件下容易得到 y 的解。

6 数值分析与仿真结果

本节通过数值分析与仿真验证本文所提出的

频谱共享方案，并给出数值分析与仿真结果。图 3 给出了主系统包含 2 个主用户情况下，主系统平均传输速率随着主系统平均功率约束变化而变化的情况。2 个主用户信道功率增益均值分别为： $\bar{g}_{1p}=1$ ， $\bar{g}_{2p}=2$ ，次用户信道功率增益均值为： $\bar{g}_{ss}=4$ ，次用户发射机到主系统接收机之间的信道功率增益为： $\bar{g}_{sp}=0.5$ ，噪声功率 $N_0=1$ W。从图 3 可以看出增加反馈比特数能够带来主系统平均传输速率的提高。

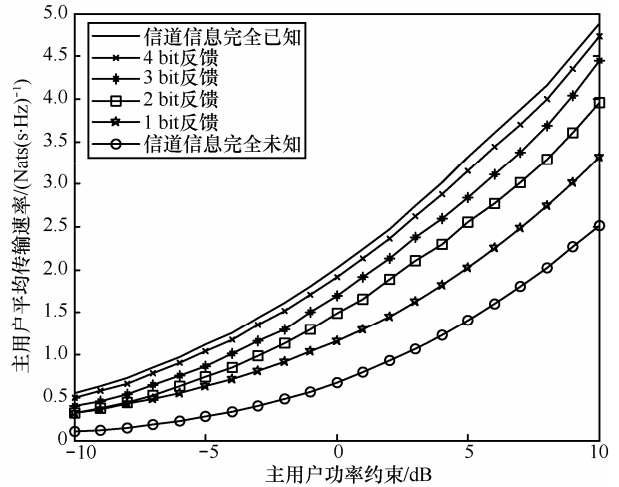


图 3 主系统平均传输速率

表 1 给出了主系统包含 2 个主用户情况下，不同反馈比特数所对应的量化区间及各量化级门限值。

图 4 显示了次用户吞吐量随着其平均发射功率约束变化而变化的情况。图 4 中，主系统平均每用户发送功率约束 P_{th}^p 与噪声功率 N_0 均为 1 W，主系统速率损失约束 r_{RL}^p 为 10%。本文分别分析了主接收端对每个主用户 CQI 量化反馈的比特数为 1, 2, ..., 4 的情况下次用户平均吞吐量。从图 4 可以看出只需要反馈 3~4 个量化比特，次用户平均吞吐量就很接近于主发射机均完全已知主系统信道增益时的情况；从曲线上还可看出当完全不反馈或只反馈 1 个比特时，随着功率约束持续增加次用户平均吞吐量增加到某个值之后就不再增加，而是趋于水平线，这是因为主系统的速率损失约束限制了次用户实际的发送功率增加。当反馈比特数超过 2 之后，主系统在第一个量化区域 $[0, \gamma]$ 中分配的功率通常为 0 (即 $P_0^p=0$)，次用户能够将所有的功率注入到该区域中，从而使得次系统吞吐量性能得以提高。

表 1 反馈不同比特个数所对应的量化区间及各量化级门限值($P_{th}^p = 5 \text{ dB}$, $N_0 = 0 \text{ dB}$)

反馈比特个数	量化区间数 L	各量化级门限值
0	1	$\gamma_0 = 0.745 \ 5$
1	2	$\gamma_0 = 0.442 \ 2$ $\gamma_1 = 1.284 \ 6$
2	4	$\gamma_0 = 0.516 \ 7$ $\gamma_1 = 1.189 \ 4$ $\gamma_2 = 1.357 \ 9$ $\gamma_3 = 2.703 \ 5$
3	8	$\gamma_0 = 0.232 \ 5$ $\gamma_1 = 0.368 \ 5$ $\gamma_2 = 0.588 \ 6$ $\gamma_3 = 0.868 \ 8$ $\gamma_4 = 1.241 \ 1$ $\gamma_5 = 1.761 \ 5$ $\gamma_6 = 2.554 \ 4$ $\gamma_7 = 4.007 \ 8$
4	16	$\gamma_0 = 0.199 \ 2$ $\gamma_1 = 0.269 \ 8$ $\gamma_2 = 0.378 \ 0$ $\gamma_3 = 0.507 \ 2$ $\gamma_4 = 0.671 \ 2$ $\gamma_5 = 0.860 \ 2$ $\gamma_6 = 1.080 \ 0$ $\gamma_7 = 1.351 \ 8$ $\gamma_8 = 1.597 \ 0$ $\gamma_9 = 1.981 \ 8$ $\gamma_{10} = 2.516 \ 5$ $\gamma_{11} = 3.063 \ 5$ $\gamma_{12} = 4.155 \ 4$ $\gamma_{13} = 5.361 \ 6$ $\gamma_{14} = 6.394 \ 9$ $\gamma_{15} = 8.782 \ 6$

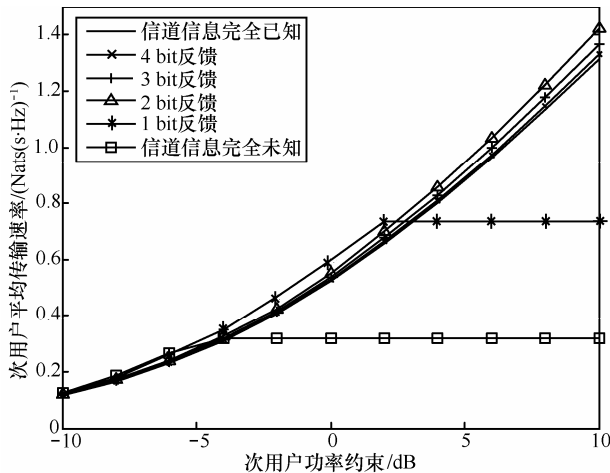


图 4 CQI 反馈比特数不同时次用户吞吐量

表 2 给出反馈不同比特数时，次系统对应于各量化区间发射功率与传输速率。

表 2 次系统发射功率与传输速率($P_{th}^s = 5 \text{ dB}$, $N_0 = 0 \text{ dB}$)

量化反馈比特个数	(P^s, R^s) (W, Nats/Sec/Hz)
0	$P_0^s = 0.320 \ 1$ $R_0^s = 0.661 \ 1$
1	$P_0^s = 4.710 \ 4$ $R_0^s = 2.167 \ 0$ $P_1^s = 0.003 \ 1$ $R_1^s = 2.304 \ 8$
2	$P_0^s = 4.509 \ 8$ $R_0^s = 2.312 \ 6$ $P_1^s = 0.351 \ 7$ $R_1^s = 2.216 \ 9$ $P_2^s = 0.050 \ 1$ $R_2^s = 0.915 \ 5$ $P_3^s = 0.000 \ 0$ $R_3^s = 0.599 \ 8$
3	$P_0^s = 5.576 \ 5$ $R_0^s = 2.280 \ 5$ $P_1^s = 0.313 \ 0$ $R_1^s = 2.246 \ 5$ $P_2^s = 0.313 \ 0$ $R_2^s = 0.973 \ 5$ $P_3^s = 0.313 \ 0$ $R_3^s = 0.790 \ 8$ $P_4^s = 0.000 \ 0$ $R_4^s = 0.062 \ 9$ $P_5^s = 0.000 \ 0$ $R_5^s = 0.572 \ 5$ $P_6^s = 0.000 \ 0$ $R_6^s = 0.624 \ 8$ $P_7^s = 0.000 \ 0$ $R_7^s = 0.046 \ 9$
4	$P_0^s = 6.463 \ 9$ $R_0^s = 2.408 \ 2$ $P_1^s = 0.223 \ 7$ $R_1^s = 2.136 \ 2$ $P_2^s = 0.184 \ 7$ $R_2^s = 1.913 \ 6$ $P_3^s = 0.102 \ 1$ $R_3^s = 1.052 \ 5$ $P_4^s = 0.086 \ 3$ $R_4^s = 0.798 \ 9$ $P_5^s = 0.021 \ 6$ $R_5^s = 0.551 \ 4$ $P_6^s = 0.011 \ 4$ $R_6^s = 0.803 \ 5$ $P_7^s = 0.006 \ 3$ $R_7^s = 0.726 \ 1$ $P_8^s = 0.006 \ 3$ $R_8^s = 0.904 \ 2$ $P_9^s = 0.006 \ 3$ $R_9^s = 0.315 \ 7$ $P_{10}^s = 0.006 \ 3$ $R_{10}^s = 0.876 \ 7$ $P_{11}^s = 0.006 \ 3$ $R_{11}^s = 0.001 \ 7$ $P_{12}^s = 0.000 \ 0$ $R_{12}^s = 0.511 \ 8$ $P_{13}^s = 0.000 \ 0$ $R_{13}^s = 0.509 \ 6$ $P_{14}^s = 0.000 \ 0$ $R_{14}^s = 0.754 \ 8$ $P_{15}^s = 0.000 \ 0$ $R_{15}^s = 0.001 \ 7$

图 5 显示了当量化区域个数 $L=4$ (即反馈比特为 2), 速率损失约束 r_{RL}^p 从 10% 增加到 50% 时, 次用户发送功率在各量化区域的分布情况。由图 5 可以看出, 次用户在各量化区间中所分配的发射功率随着速率损失约束的变化会发生很大变化。图 5 从左向右, 通过图中带方块的曲线可以看出, 随着 r_{RL}^p 增大(即速率损失约束放松要求), 次用户可获得的平均速率有所增加。从右向左, 随着 r_{RL}^p 减小(即速率损失约束愈来愈苛刻), 可以看出次用户越来越倾向于将较多的功率分配给对应于主用户信道质量较差的那个区域。这么做的原因在于, 在频谱共享的认知无线网络中, 如果主用户在某个量化区域中分配发射功率为 0, 那么主接收端就没有必要设置任何干扰温度门限, 从而次用户在此区域中可以分配较大的发射功率。相反, 当速率损失约束放松要求时, 次用户发射机试图在各量化区域中进行等功率分配, 以获得更高的吞吐量性能。

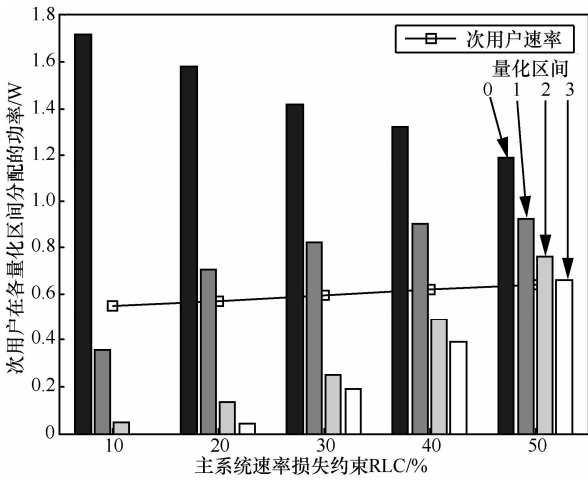


图 5 不同速率损失约束下次用户发射功率分配及平均传输速率 ($P_0 = 0$ dB)

图 6 为主系统包含 2 个用户时, 依据表 1 和表 2 所得出的量化门限值及次用户发射功率与传输速率对表, 所得到的主、次系统传输速率仿真结果。仿真中, 主次系统的信噪比均为 5 dB, 主次系统的信道功率增益均服从指数衰落分布, 主系统中 2 个主用户信道功率增益的均值分别为: $\bar{g}_{1p}=1, \bar{g}_{2p}=2$; 次用户信道功率增益的均值为: $\bar{g}_{ss}=4$, 次用户发射机到主系统接收机之间的信道功率增益为: $\bar{g}_{sp}=0.5$ 。由图 6 可以看出当主系统 CQI 量化反馈由 0 bit 增加到 4 bit 时, 主系统的传输速率在出现次用户传输与不存在次用户传输相比均有所下降, 但由于次用户传输所造成的传输速率的损失基本

能够满足主系统的速率损失要求。从图中还可看出, 牺牲了一小部分主系统传输速率能够换取次用户与主用户同时传输, 实现主次用户频谱共享。

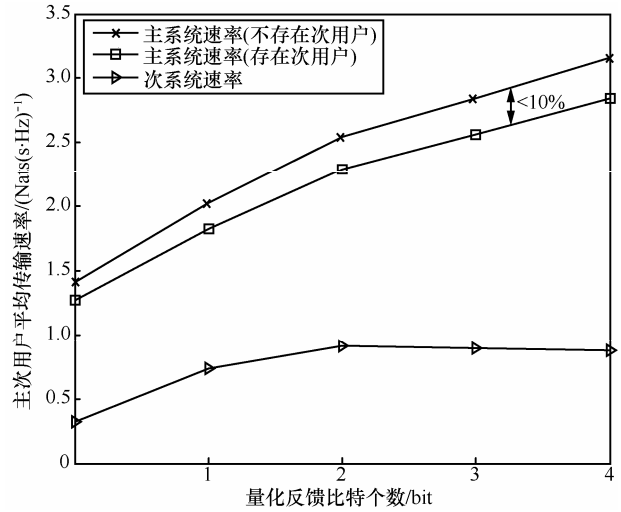


图 6 存在和不存在次用户传输时主系统传输速率比较

7 结束语

本文提出了一种认知无线网络中基于主系统有限反馈的频谱共享方案, 适用于一对次用户收发信机与多个主用户共存的网络结构。次用户根据偷听到的主系统信道质量信息的量化反馈, 可确定使得次系统吞吐量最大化的发射功率及传输速率最佳分配方案, 同时能够满足次用户平均发射功率约束及主系统速率损失约束。数值分析结果表明, 主接收端对于每个主用户信道质量信息只需要反馈 3~4 个量化比特, 次系统的吞吐量就可堪比于主次发射端均完全已知主系统信道质量信息时的情况。仿真结果显示所提出的频谱共享方案能够满足主系统的速率损失约束。

附录 式(10)的推导过程

$$\begin{aligned}
 R^p &= \sum_{i=1}^M \sum_{l=0}^{L-1} \Pr\{\gamma_l \leq \tilde{g}_{ip}, \gamma_l \leq g_{ip} < \gamma_{l+1}\} R_l^p \\
 &= \sum_{i=1}^M \sum_{l=0}^{L-1} \Pr\left\{g_{sp} \leq \frac{\left(\frac{g_{ip}-1}{\gamma_l}\right) N_0}{P_i^s}, \gamma_l \leq g_{ip} < \gamma_{l+1}\right\} R_l^p \\
 &= \sum_{i=1}^M \sum_{l=0}^{L-1} \int_{\gamma_l}^{\gamma_{l+1}} \left[1 - e^{-\frac{\left(\frac{g_{ip}-1}{\gamma_l}\right) N_0}{\bar{g}_{ip} P_i^s}} \right] \frac{1}{\bar{g}_{ip}} e^{-\frac{g_{ip}}{\bar{g}_{ip}}} d g_{ip} R_l^p
 \end{aligned}$$

$$= \sum_{i=1}^M \sum_{l=0}^{L-1} \left[\left(e^{-\frac{\gamma_l}{\bar{g}_{ip}}} - e^{-\frac{\gamma_{l+1}}{\bar{g}_{ip}}} \right) + I \right] R_i^p$$

其中,

$$\begin{aligned} \underline{R}^p &= \sum_{i=1}^M \Pr \{ \gamma_0 \leq \tilde{g}_{ip}, \gamma_0 \leq g_{ip} < +\infty \} R_0^p \\ &= \sum_{i=1}^M \left[e^{-\frac{\gamma_0}{\bar{g}_{ip}}} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{\bar{g}_{ip} N_0}{\gamma_1 \bar{g}_{sp} P_0^s}} \right) \right] R_0^p \end{aligned}$$

参考文献:

- [1] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radios: making soft-ware radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4):13-18.
- [2] GASTPAR M. On capacity under receive and spatial spectrum-sharing constraints[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(2): 471-487.
- [3] GHASEMI A, SOUSA E S. Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(2): 649-658.
- [4] ZHANG R. Optimal power control over fading cognitive radio channel by exploiting primary user CSI[A] Proceedings of IEEE Global Communications Conference[C]. 2008.1-5.
- [5] MARQUES A G, WANG X, GIANNAKIS G B. Dynamic resource management for cognitive radios using limited-rate feedback[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009,57(9):3651-3666.
- [6] TAKI M, LAHOUTI F. Spectral efficiency optimized adaptive trans-mission for interfering cognitive radios[A] Proceedings of IEEE International Conference Communications[C]. 2009.1-6.
- [7] HE Y, DEY S. Power allocation in spectrum sharing cognitive radio networks with quantized channel information[J]. IEEE Transactions on

Communications, 2011, 59(6):1644-1656.

- [8] HUANG S, LIU X, DING Z. Decentralized cognitive radio control based on inference from primary link control information[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(2):394-406.
- [9] ESWARAN K, GASTPAR M, RAMCHANDRAN K. Cognitive radio through primary control feedback[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(2):384-393.
- [10] JAMES C F, ZHANG W, YUAN J H. Opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks based on primary limited feedback[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(12):3272-3277.
- [11] KIM T T, SKOGLUND M. On the expected rate of slowly fading channels with quantized side information[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(4):820-829.
- [12] BOYD S P. Sequential convex programming[EB/OL]. http://www.stanford.edu/class/ee364b/lectures/seq_slides.pdf.
- [13] YU W, LUI R. Dual methods for nonconvex spectrum optimization of multicarrier systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(7):1310-1322.
- [14] LUO J, YATES R, SPASOJEVIC P. Service outage based power and rate allocation for parallel fading channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(7):2594-2611.

作者简介:



高欢芹 (1980-), 女, 江苏淮阴人, 南京邮电大学讲师, 主要研究方向为宽带无线通信理论与技术。

宋荣方 (1964-), 男, 江苏武进人, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信理论与技术。