

基于时延约束的认知链路自适应传输策略研究

穆晓敏, 梁 晓, 赵海峰, 高昊民

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对时延敏感性信道的频谱效率, 提出一种新的自适应调整传输参数的优化框架, 该框架以 Underlay 与 Interweave 混合接入模式为背景, 以最大化有效频谱效率为目标, 将问题建模为在主用户有效频谱效率、认知用户平均发送功率、平均误包率和时延双重服务质量(QoS)约束条件下, 主用户和次用户都采用自适应调制编码(AMC)技术调整传输速率的优化问题。数值仿真结果表明引入时延后, 在满足上述约束条件的同时, 在保护主用户和认知网络频谱效率之间有了更好的权衡。

关键词: 时延; 有效频谱利用率; 混合接入模式; 自适应调制编码

中图分类号: TN925 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.03.010

0 引言

基于认知无线电(CR)的频谱接入技术以改变频谱授权分配政策为出发点, 提供了提高频谱利用率的途径; 自适应调制编码(AMC)技术也是提高通信系统频谱效率的措施, 其出发点是根据信道质量反馈, 自适应地选择和当前信道状况匹配的最大传输速率调制方式。无疑, 将 AMC 技术引入 CR 系统, 可以更有效地提升频谱效率。

文献[1-2]研究了 Underlay 接入模式下, 认知用户采用 AMC 传输方案, 根据信道反馈的信干噪比(SINR)调整认知用户的调制编码方式和发射功率, 以主用户接收端的平均干扰功率和次用户平均发送功率为约束条件, 最大化平均频谱效率; Taki M. 等人^[3]提出了 Interweave 接入模式下优化认知链路的频谱效率, 与 Underlay 接入相比, 由于次用户是在主用户不占用信道机会式接入, 所以不考虑主用户对次用户的功率干扰。在无线通信中, 传输时应服从于服务质量(QoS)约束, 以上都只考虑服从误包率(PER)约束, 而没有考虑时延约束。Wu D. 等人^[4]考虑了时延约束, 提出了有效频谱效率的概念, 即受时延约束的可达到的频谱效率。在文献[1]的基础上, Jalil S. H. 等人^[5]最大化认知链路的有效频谱效率。

上述的研究成果主要在 Underlay 或 Inter-

weave 单一接入机制下研究认知链路的频谱资源利用率及传输策略, 而实际的无线链路环境中, 有可能提供上述两种模式混合接入的机会, 文献[6]说明了混合接入的可能性, 笔者研究的重点是在这种模式下考虑 PER 和时延双重约束条件, 建立有效频谱利用率优化函数, 通过数值仿真, 分析影响有效频谱利用率的主要因素。

1 系统模型

1.1 系统描述和信道模型

考虑一个认知无线网络和主网络共存的网络环境。通信场景如图 1 所示: 主用户的发送端 PT 与其接收端 PR 进行通信, 次用户的发送端 ST 占用主用户频带与其接收端 SR 进行通信, 在时刻 n , 接收端 PR 和 SR 的信号可表示为

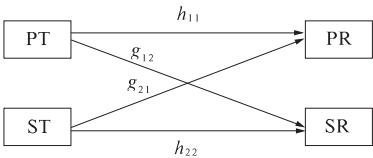


图 1 系统模型: 一个主用户和一个次用户

Fig. 1 System configuration:
a primary and a cognitive radio

$$y_i(n) = h_{ii} \cdot x_i(n) + g_{ji} \cdot x_j(n) + z_i(n);$$
$$i = 1, 2; j = 1, 2; i \neq j. \quad (1)$$

收稿日期:2013-11-12; 修订日期:2014-01-19

基金项目:河南省重大科技攻关计划项目(112102210507);教育部新世纪优秀人才计划项目(NECT-12-0699)

作者简介:穆晓敏(1955-),女,河南郑州人,郑州大学教授,博士生导师,主要研究方向为通信信号处理、图像数字水印技术及认知无线电技术等,E-mail:iexmmu@zzu.edu.cn.

式中: n 表示某个时刻; $i = 1$ 或 $j = 1$ 代表主用户链路; $i = 2$ 或 $j = 2$ 代表次用户链路; x_i, x_j 分别表示主、次用户发送的数据; 假设信道是瑞利块衰落信道, h_{ii}, g_{ji} 分别表示主、次用户、干扰链路的信道衰落系数; z_i 是高斯白噪声。

整个链路中, 将要传输的数据排队。每帧中, 以某一特定速率传输数据, 根据大偏差原理, 队列时延(D) 违反某一特定阈值 x 的概率和链路的有效频谱效率 $E_c(\theta)^{[5]}$ 分别为

$$\text{Prob}(D > x) \cong \exp(-\theta x); \quad (2)$$

$$E_c(\theta) = -1/\theta \cdot \ln(E\{\exp(-\theta \cdot R)\}). \quad (3)$$

式中: θ 代表了队列溢出概率的指数衰减速率; R 是衰落信道的服务速率。

在某一帧内主用户占用此信道时, 认知用户采用 Underlay 共享模式; 在另一帧内主用户不在时, 认知用户采用 Interweave 共享模式, 我们把这种工作模式称为混合接入的频谱共享模式。

主用户长期占用信道时, 采用 Underlay 接入模型, 认知链路在保证满足主用户链路达到其有效频谱效率 η_p 和认知链路的平均功率的条件下选择传输功率, 主、次用户链路根据反馈的 SINR 选择传输速率。则认知链路的有效频谱效率为

$$\max_{P_2} (-1/\theta) \cdot \ln\left(\sum_{n=1}^N \exp(-\theta \cdot R_n)\right) \cdot \text{Prob}\{\gamma_n^2 \leq \gamma_2 < \gamma_{n+1}^2\}; \quad (4)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} (-1/\theta) \cdot \ln(P_{\text{on}} \cdot \sum_{n=1}^N \exp(-\theta \cdot R_n)) \cdot \text{Prob}\{\gamma_n^1 \leq \gamma_1 < \gamma_{n+1}^1\} \geq \eta_p; \\ \sum_{n=1}^N P_2 \cdot \text{Prob}\{\gamma_n^2 \leq \gamma_2 < \gamma_{n+1}^2\} \leq P_s. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{on}}, P_{\text{off}}$ 分别表示主用户是否占用信道时的概率; γ_1, γ_2 分别表示主、次用户接收端的 SINR。为了简化计算复杂度, 干扰远远大于噪声, 忽略噪声, γ_1, γ_2 可以简化为

$$\gamma_1 = P_1 \cdot h/P_2; \quad (6)$$

$$\gamma_2 = P_2 \cdot g/P_1. \quad (7)$$

式中: $h = H_{11}/G_{21}$ 和 $g = H_{22}/G_{12}$ 表示归一化信道增益; 因为是瑞利块衰落信道, $H_{ii} = |h_{ii}|^2$; $G_{ji} = |g_{ji}|^2$; $h_{ii} \sim CN(0, \sigma_{h_{ii}}^2)$; $g_{ji} \sim CN(0, \sigma_{g_{ji}}^2)$, 所以 H_{ii} 和 G_{ji} 服从参数为 $\sigma_{h_{ii}}^2$ 和 $\sigma_{g_{ji}}^2$ 的指数分布; γ_1 和 γ_2 是关于 h 的线性函数, 所以概率密度函数 $f(\gamma_1)$ 和 $f(\gamma_2)$ 能表示出来。主用户选择模式 n 进行传输的概率为

$$\text{Prob}\{\gamma_n^1 \leq \gamma_1 < \gamma_{n+1}^1\} = \int_{\gamma_n^1}^{\gamma_{n+1}^1} f(\gamma_1) d\gamma_1. \quad (8)$$

同样, 次用户选择模式 n 进行传输的概率也可以表示出来。

主用户不占用信道时, 采用 Interweave 接入模型, 此时, $P_1 = 0$, 认知链路有效频谱效率为

$$\max_{P_2} (-1/\theta) \cdot \ln(P_{\text{off}} \cdot \sum_{n=1}^N \exp(-\theta \cdot R_n)) \cdot \text{Prob}\{\gamma_n^2 \leq \gamma_2' < \gamma_{n+1}^2\}; \quad (9)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} (-1/\theta) \cdot \ln(P_{\text{on}} \cdot \sum_{n=1}^N \exp(-\theta \cdot R_n)) \cdot \text{Prob}\{\gamma_n^1 \leq \gamma_1 < \gamma_{n+1}^1\} \geq \eta_p; \\ P_{\text{off}} \cdot \sum_{n=1}^N P_2' \cdot \text{Prob}\{\gamma_n^2 \leq \gamma_2' < \gamma_{n+1}^2\} \leq P_s. \end{cases} \quad (10)$$

式中: γ_2' 表示次用户的信噪比(SNR) 为

$$\gamma_2' = P_2' \cdot H_{22}/N_0. \quad (11)$$

1.2 AMC 传输模型

发送端根据接收端反馈的 SINR 自适应地选择调制编码模式。设有 $N+1$ 种模式供选择, SINR 的值域被划分为 $N+1$ 个互不相交的区域, 边界点为 $\{\gamma_n^i\}_{n=0}^{N+1}$, 若用户接收端反馈的 SINR 落在 γ_n^i 和 γ_{n+1}^i 之间, 则用户选择模式 n 传输。

即时 PER 完全由 SINR(γ_n^i) 和模式 n 有关^[7]; 令即时 PER 目标值为 B_i , 则 SINR 的阈值为

$$\begin{cases} \gamma_0^i = 0; \\ \gamma_n^i = -1/g_n \ln(B_i/a_n), n = 1, 2, \dots, N; \\ \gamma_{N+1}^i = +\infty. \end{cases} \quad (12)$$

2 混合模型下基于 AMC 的频谱接入策略优化问题

2.1 主用户活跃性的建模

当次用户接入授权频带后, 若有主用户出现, 系统状态会发生转换, 这种转换是随机的。将主用户活跃性模拟为两状态生死过程^[8], 出生率 α 和死亡率 β 分别表征处于空闲和繁忙时指数分布的参数。主用户存在和不存在的概率为

$$\begin{cases} P_{\text{on}} = \alpha/(\alpha + \beta); \\ P_{\text{off}} = \beta/(\alpha + \beta). \end{cases} \quad (13)$$

2.2 问题描述及优化求解

由于在接收端忽略了噪声, 有可能会违反 PER 约束, 则违反 PER 的概率^[3] 可以表示如下:

$$P_{\text{bv}} = \text{Prob}\left\{\frac{P_i H_{ii}}{P_j G_{ji} + N_0} < \gamma_n^i \mid \gamma_i \geq \gamma_n^i\right\}. \quad (14)$$

引入主用户的活跃性, 并考虑忽略噪声所造成的影响, 在主用户最小频谱效率、次用户平均发送功率和 PER 的约束下, 主、次用户均采用 AMC

技术,最大化认知链路有效频谱效率:

$$\max_{P_2, P_2'} (-1/\theta) \cdot \ln((1 - P_{bv}) \cdot P_{on} \sum_{n=1}^N \exp(-\theta R_n) \cdot \text{Prob}\{\gamma_n^2 \leq \gamma_2 < \gamma_{n+1}^2\}) + (-1/\theta) \cdot \ln(P_{off} \cdot \sum_{n=1}^N \exp(-\theta R_n) \cdot \text{Prob}\{\gamma_n^2 \leq \gamma_2' < \gamma_{n+1}^2\}). \quad (15)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} -1/\theta \cdot \ln((1 - P_{bv}) \cdot P_{on} \sum_{n=1}^N \exp(-\theta R_n) \cdot \text{Prob}\{\gamma_n^1 \leq \gamma_1 < \gamma_{n+1}^1\}) \geq \eta_p; \\ P_{on} \cdot \sum_{n=1}^N P_2 \cdot \text{Prob}\{\gamma_n^2 \leq \gamma_2 < \gamma_{n+1}^2\} + P_{off} \cdot \sum_{n=1}^N P_2' \cdot \text{Prob}\{\gamma_n^2 \leq \gamma_2' < \gamma_{n+1}^2\} \leq P_s; \\ P_e(\gamma_n^1) \leq B_1; \\ P_e(\gamma_n^2) \leq B_2. \end{cases} \quad (16)$$

式中: B_1 、 B_2 分别表示主、次用户的 PER 约束。

很容易证明,式(15)是关于 P_2 和 P_2' 的凸函数,可以用 Lagrange 进行求解。

3 数值仿真和结果分析

本节通过数值仿真评价所提出的优化框架的性能。参数设置如下:瑞利块衰落信道的参数 $\sigma_{h_{11}}^2 = \sigma_{h_{22}}^2 = 1$, $\sigma_{g_{12}}^2 = \sigma_{g_{21}}^2 = 0.05$, 主用户的发送功率 $P_1 = 10$, 次用户峰值功率 $P_2^{\max} = 50$, 违反 PER 约束的概率 $P_{bv} = 0.02$ 。主、次用户选用的传输速率参照文献[7]AMC 查找表。

3.1 不同 PER 下认知链路有效频谱效率

图2描述了次用户平均 PER 约束对其链路的影响,设置参数如下:出生率 $\alpha = 0.4$, 死亡率 $\beta = 0.6$, 次用户的平均发送功率 $P_s = 20$ 。固定 PER 时,认知链路有效频谱效率 η_s 随着主用户链路有效频谱效率 η_p 的增大而减小。固定 η_p 时,PER 约束越严格,由式(12)知,阈值 γ_n^i 越大,越选择速率小的模式, η_s 降低。当 η_p 小于一定值时, η_s 几乎不受 η_p 的影响,导致了相同的 η_s 。

3.2 功率与认知链路有效频谱效率关系

图3验证了认知用户的平均发送功率对其链路的影响,设置参数如下:出生率 $\alpha = 0.4$ 和死亡率 $\beta = 0.6$, 主、次用户的 PER 约束 $B_1 = B_2 = 0.0001$ 。固定主用户链路的有效频谱效率 η_p 时,次用户的发送功率 P_s 增加,由式(6)可知, SINR 就会增加,从而选择速率大的方式,导致其链路的有效频谱效率 η_s 增加。当 η_p 值较大时,由式(16)可知, P_2 减小, P_s 影响很小,所以不同的 P_s 导致了

几乎相同的 η_s 。

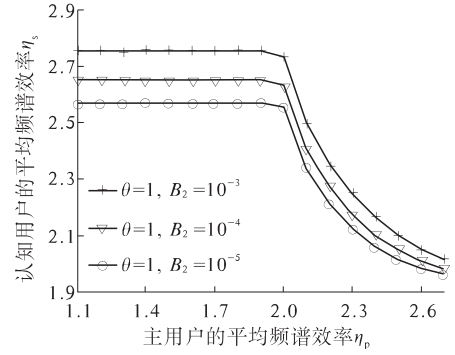


图2 不同 PER 下认知链路的有效频谱效率

Fig.2 The effective spectral efficiency of the cognitive link with different PER constraints

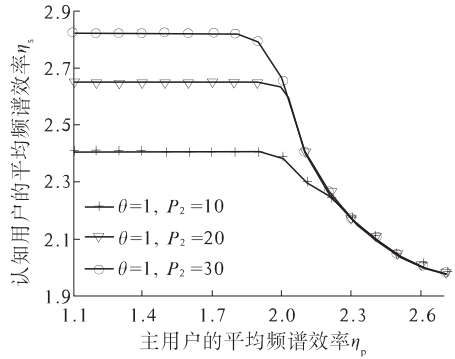


图3 不同功率约束下认知链路的有效频谱效率

Fig.3 The effective spectral efficiency of the cognitive link with different power constraints

3.3 不同时延下认知链路有效频谱效率

图4描述了认知用户时延参数会影响认知链路的有效频谱效率,设置参数如下:出生率 $\alpha = 0.4$ 和死亡率 $\beta = 0.6$, 主、次用户的 PER 约束 $B_1 = B_2 = 0.0001$ 。时延指数 θ 越小,从式(2)可知,队列溢出概率的衰减速率越小,系统能保证较宽松的 QoS,容忍较大的时延,则认知链路的有效频谱效率 η_s 就会提高;反之, η_s 降低。

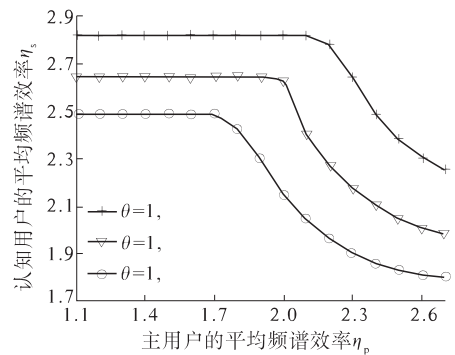


图4 不同时延因子下认知链路的有效频谱效率

Fig.4 The effective spectral efficiency of the cognitive link with different delay exponent constraints

3.4 主用户活跃性与有效频谱效率关系

活跃性参数也影响认知链路的有效频谱效率. 主用户的有效频谱效率 $\eta_p = 2.2$, 次用户的平均发送功率 $P_s = 20$, 主、次用户的 PER 约束 $B_1 = B_2 = 0.0001$. 固定 β 时, α 越大, 由式 (13) 知 P_{on} 越大, 主用户占用信道时间越长, 认知链路有效频谱效率 η_s 降低. 固定 α 时, β 越大, P_{off} 越大, 主用户占用信道时间越短, η_s 升高.

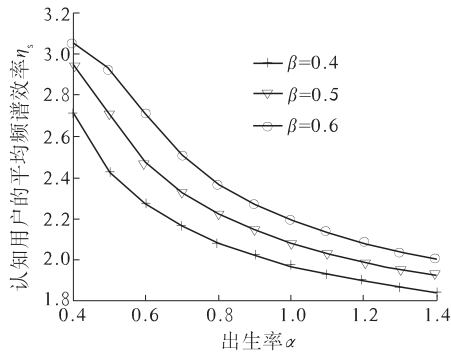


图 5 主用户活跃性与认知链路的有效频谱效率的关系
Fig.5 the primary activity versus the effective spectral efficiency of the cognitive link

4 结论

笔者提出了在保证主、次用户 PER 和时延双重 QOS 约束下, 基于主用户活跃性混合接入机制下认知链路的有效频谱效率的优化框架, 主、次用户均采用 AMC 技术的传输方案, 联合优化认知链路的速率和功率. 为了简化分析, 笔者假设仅有一个主用户和一个次用户的场景, 对多个主用户多个次用户的场景, 还有问题需要进一步研究: 如多个次用户对主用户的干扰、信道切换等.

参考文献:

[1] ASGHARI V, AISSA S. Adaptive rate and power transmission in spectrum-sharing systems[J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2010, 9(10):3272-3280.

[2] ZHANG Zhao-yang, LUO Hai-yan, ZHANG Jian-min, et al. Cognitive radio transmission strategies exploiting the primary-link adaptivity[J]. IEEE Trans Vehicular Technol, 2011, 60(8):3805-3813.

[3] TAKI M, LAHOUI F. Discrete rate interfering cognitive link adaptation design with primary link spectral efficiency provisioning[J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2011, 10(9):2929-2939.

[4] WU D, NEGI R. Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service[J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2003, 2(4):630-643.

[5] JALIL S H, FARSHAD L. Adaptive transmission policy design for delay-sensitive and bursty packet traffic over wireless fading channels[J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2009, 8(2):776-786.

[6] SENTHURAN S, ANPALAGAN A, DAS O. Throughput analysis of opportunistic access strategies in hybrid underlay-overlay cognitive radio networks [J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2012, 11(6):2024-2035.

[7] LIU Qing-wen, ZHOU Sheng-li, GEORGIOS B G. Cross-layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links[J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2004, 3(5):1746-1755.

[8] LEE W Y, AKYILDIZ I F. Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks[J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2008, 7(10):3845-3857.

Research on Cognitive Link Adaptation Transmission Strategies under Delay Constraint

MU Xiao-min, LIANG Xiao, ZHAO Hai-feng, GAO Hao-min

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to improve the spectral efficiency of delay sensitivity of channel, we present a novel framework of changing the transmission parameters according to the dynamic access mode. Based on the underlay-interweave hybrid access mode, this framework is modeled as a optimization problem in which the primary and secondary users adjust transmission parameters with the constraints of the effective spectral efficiency of the primary link, the average transmission power of the cognitive link, dual quality-of-service (QOS) measures, namely, average packet error rates and time delay, constraints of both links, to maximize the effective spectral efficiency of the cognitive user. The numerical results show that a better tradeoff can be achieved between the protection of primary user and the effective spectral efficiency of cognitive system when the delay is introduced and the constraint is satisfied.

Key words: time delay; effective spectral efficiency; hybrid access mode; adaptive modulation and coding