

基于 FDD-OFDMA 系统的多用户下行传输跨层优化

胡莹^{*①②} 黄永明^{①③} 杨绿溪^{①③}

^①(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

^②(江苏科技大学电子信息学院 镇江 212003)

^③(东南大学水声信号处理教育部重点实验室 南京 210096)

摘要: 该文针对 FDD-OFDMA 移动通信下行系统受限干扰的问题, 提出了一种资源调度跨层设计方法。所提方法在满足目标误包率的前提下, 以最大化系统 goodput(发射端成功发射的比特率)为准则建立优化模型, 能在发射端完全不知道信道状态信息(CSI)的情况下, 利用反馈的确认/否定确认(ACK/NAK)信息实现用户调度以及速率分配的优化。仿真结果表明, 所提算法在较低复杂度前提下获得很接近发射端完全已知信道状态信息的系统 goodput。

关键词: 无线通信; 频分双工; 正交频分多址; 资源调度; 下行系统

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)12-2954-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00347

Cross-layer Optimization for Multiuser Downlink Transmission Based on FDD-OFDMA Systems

Hu Ying^{①②} Huang Yong-ming^{①③} Yang Lu-xi^{①③}

^①(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

^②(Institute of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

^③(Key Laboratory of Underwater Acoustic Signal Processing of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A resource scheduling cross-layer design scheme in FDD-OFDMA mobile communication downlink system about the issue of limited interference is proposed. A mathematical formulation of optimization issue is provided with the objective of maximizing system goodput under target Packet Error Rate (PER) constraint. The proposed method can use ACK/NAK feedback information to implement user selection and rate allocation without Channel State Information (CSI) at the base station. Simulation results demonstrate that the system goodput of proposed algorithms is close to the condition of with channel state information at the base station, it also has low complexity.

Key words: Wireless communication; Frequency Division Duplex (FDD); OFDMA; Resource scheduling; Downlink system

1 引言

作为一种能有效解决频选信道环境下多径干扰问题的可行方案, OFDM 技术在无线通信中得到了广泛的应用。正交频分多址(OFDMA)技术源于 OFDM 并继承了其对多径衰落的鲁棒性和较高频谱效率等优点^[1]。多用户 OFDMA 系统同时存在频

率分集和多用户选择分集增益, 充分利用该增益通常需要包含用户调度、速率分配等过程的跨层优化设计。文献[2]在假设发射端完全已知用户信道状态信息(CSI)情况下提出了一种跨层优化方法, 该方法虽能获得优越的性能, 但实际频分双工(FDD)系统中由于反馈信道容量受限发射端很难获得完整的信道状态信息。文献[3]给出了一种基站已知部分 CSI 的跨层优化方法, 但是, 该方法中基站只能根据已知的部分 CSI 进行速率加载, 很可能出现加载速率超过信道容量而导致误包或者发生中断^[4]。针对该问题, 文献[5,6]研究了基于部分 CSI 的鲁棒性优化设计方法。与此类似, 文献[7]给出了一种发射端已知延时 CSI 的闭环跨层优化设计方法。这些方法都需

2011-04-14 收到, 2011-08-04 改回

国家 973 计划项目(2007CB310603), 国家自然科学基金(60902012, 61071113), 国家科技重大专项(2011ZX03003-001, 2011ZX03003-003)和教育部博士点基金(20090092120013, 20100092110010)资助课题

*通信作者: 胡莹 zlfhy116118@126.com

要假设基站可得到 CSI 误差统计信息(如误差的方差和 CSI 误差的概率分布),这在实际系统中很难实现。为满足实际系统的现实约束条件并简化实现,文献[8,9]研究了发射端完全不知道 CSI 的 OFDM 跨层优化。文献[8]采用了启发式的信道探测发送(CP-TX)算法,该算法把一个时隙分为信道探测(CP)和发送(TX)两个阶段。文献[9]把单小区 FDD-OFDM 系统的跨层设计问题转化为马尔可夫决策过程并给出了闭合解,但是文献中仅考虑了存在噪声的情况,而实际蜂窝系统一般属于干扰受限系统,尤其是边缘用户,来自其他小区的干扰功率通常远大于噪声功率。因此,本文针对 FDD-OFDMA 移动通信下行系统受限干扰的问题,考虑小区用户存在相邻小区基站干扰,提出了一种资源调度跨层设计方法,在发射端完全不知道信道信息的情况下,利用反馈的 ACK/NAK 信息实现用户调度以及速率分配,该方法具有较低的复杂度和较小的反馈量,同时获得更好的性能。

2 系统模型与问题描述

2.1 系统模型

本文考虑 3 个小区(小区 A, B 和 C)的下行多用户系统,其中每个小区包括 K 个用户。由于采用 OFDMA 系统,则小区内不存在干扰。 $\{A_k, k=1, \dots, K\}$, $\{B_k, k=1, \dots, K\}$ 和 $\{C_k, k=1, \dots, K\}$ 分别表示小区 A, B 和 C 中的用户。假设信道为块衰落(block fading)模型,若有 N 个子载波分成 D 个频率块,则一个频率块(其中包含 N/D 个子载波)作为资源调度的基本单元。假设一个时隙 T 秒内每个频率块的信道保持不变,不同频率块之间信道独立变化。本文主要分析在一个时隙内的情况。小区 A 中第 A_k 个用户在频率块 d 上收到的基带接收信号可以表示为

$$y_{A_k,d} = h_{A_k,d}^{(\tilde{A})} s^{(\tilde{A})} + \sqrt{\alpha_{\tilde{B}}} h_{A_k,d}^{(\tilde{B})} s^{(\tilde{B})} + \sqrt{\alpha_{\tilde{C}}} h_{A_k,d}^{(\tilde{C})} s^{(\tilde{C})} + n_{A_k,d} \quad (1)$$

其中 $s^{(\tilde{A})}$, $s^{(\tilde{B})}$ 和 $s^{(\tilde{C})}$ 分别表示基站 \tilde{A} , \tilde{B} 和 \tilde{C} 在频率块 d 上的发送信号符号。假设每个基站具有相同的平均发送功率约束,并归一化为 $E[|s^{(\tilde{A})}|^2] = E[|s^{(\tilde{B})}|^2] = E[|s^{(\tilde{C})}|^2] = 1$ 。 $h_{A_k,d}^{(\tilde{A})}$ 为基站 \tilde{A} 到小区 A 中第 A_k 个用户在频率块 d 的信道频率响应,对其长期平均功率归一化并假设 $h_{A_k,d}^{(\tilde{A})} \sim CN(0,1)$ 。 $h_{A_k,d}^{(\tilde{B})}$, $h_{A_k,d}^{(\tilde{C})}$ 分别为相邻基站 \tilde{B} 和 \tilde{C} 到用户 A_k 在频率块 d 的信道频率响应,假设都服从 $CN(0,1)$ 分布。 $\alpha_{\tilde{B}}$ 和 $\alpha_{\tilde{C}}$ ($\alpha_{\tilde{B}} < 1, \alpha_{\tilde{C}} < 1$) 表示相邻基站 \tilde{B} 和 \tilde{C} 到用户 A_k 信道的长期平均功率。 $n_{A_k,d} \sim CN(0, \sigma^2)$ 为加性高斯白噪声。

由于蜂窝系统一般属于干扰受限系统,尤其是

对于边缘用户来说,来自其他小区的干扰信号功率通常远大于噪声功率,所以为了简化分析,假设 $\sigma^2 = 0$,即主要对用户的信干比进行分析。不失一般性,下面以用户 A_k 为例,其在频率块 d 上的信干比表示为

$$\text{SIR}_{A_k,d} = \frac{\|h_{A_k,d}^{(\tilde{A})}\|^2}{\|\sqrt{\alpha_{\tilde{B}}} h_{A_k,d}^{(\tilde{B})}\|^2 + \|\sqrt{\alpha_{\tilde{C}}} h_{A_k,d}^{(\tilde{C})}\|^2} \quad (2)$$

假设每个频率块在时隙 T 秒内发送 M 个数据包,接收端用户 A_k 依次对每个数据包进行解码并反馈 1 bit ACK/NAK 给基站。在时刻 m 的 ACK/NAK 反馈记为 $v_{A_k,m,d}$,表示如下:

$$v_{A_k,m,d} = \begin{cases} 1, & \text{正确解码时} \\ 0, & \text{错误解码时} \end{cases} \quad (3)$$

即在 m 时刻能正确解码的时候接收到 ACK,在 m 时刻发生解码错误的时候接收到 NAK。

定义基站 \tilde{A} 到小区 A 中第 A_k 个用户的信道信息为

$$\mathbf{h}_{A_k}^{(\tilde{A})} = [h_{A_k,1}^{(\tilde{A})} \quad h_{A_k,2}^{(\tilde{A})} \quad \dots \quad h_{A_k,D}^{(\tilde{A})}] \quad (4)$$

则 $\mathbf{h}_{A_m} = [h_{A_m}^{(\tilde{A})}, h_{A_m}^{(\tilde{B})}, h_{A_m}^{(\tilde{C})}]^T$, $\mathbf{h}_{A_m,d} = [h_{A_m,d}^{(\tilde{A})}, h_{A_m,d}^{(\tilde{B})}, h_{A_m,d}^{(\tilde{C})}]^T$,其中下标 A_m 表示在 m 时刻 D 个频率块调度到的用户集合,下标 A_m,d 表示在 m 时刻,频率块 d 上调度到的用户。因此时刻 m 基站 \tilde{A} 在所有频率块上能传输的最大速率可以计算为

$$C(\mathbf{h}_{A_m}) = \sum_{d=1}^D c(\mathbf{h}_{A_m,d}) = \sum_{d=1}^D \frac{NT}{DM} \log_2(1 + \text{SIR}_{A_m,d}) \quad (5)$$

其中 $c(\mathbf{h}_{A_m,d})$ 表示时刻 m 基站 \tilde{A} 在频率块 d 上能传输的最大速率。

因此式(3)可以表示为

$$v_{A_k,m,d} = \begin{cases} 1, & r_{m,d} \leq c(\mathbf{h}_{A_k,d}) \\ 0, & r_{m,d} > c(\mathbf{h}_{A_k,d}) \end{cases} \quad (6)$$

其中 $r_{m,d}$ 表示在 m 时刻,频率块 d 上分配到的速率; $c(\mathbf{h}_{A_k,d})$ 表示用户 A_k 在频率块 d 上能传输的最大速率。假设 $\alpha_{\tilde{B}} = \alpha_{\tilde{C}} = \alpha$,则

$$\begin{aligned} c(\mathbf{h}_{A_k,d}) &= \frac{NT}{DM} \log_2(1 + \text{SIR}_{A_k,d}) \\ &= \frac{NT}{DM} \log_2 \left(1 + \frac{\|h_{A_k,d}^{(\tilde{A})}\|^2}{\|\sqrt{\alpha_{\tilde{B}}} h_{A_k,d}^{(\tilde{B})}\|^2 + \|\sqrt{\alpha_{\tilde{C}}} h_{A_k,d}^{(\tilde{C})}\|^2} \right) \\ &= \frac{NT}{DM} \log_2 \left(1 + \frac{\|h_{A_k,d}^{(\tilde{A})}\|^2}{\alpha (\|h_{A_k,d}^{(\tilde{B})}\|^2 + \|h_{A_k,d}^{(\tilde{C})}\|^2)} \right) \\ &= c(X_{A_k,d}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$X_{A_k,d} = \frac{\|h_{A_k,d}^{(\bar{A})}\|^2}{\|h_{A_k,d}^{(\bar{B})}\|^2 + \|h_{A_k,d}^{(\bar{C})}\|^2} \quad (8)$$

发射端通过每个时隙反馈的 ACK/NAK 信息, 即 $v_{A_k,d,m}$ 的值来更新 $X_{A_k,d}$ 所有可能值的集合, 由此来实现用户调度以及速率分配。

$$Z_{A_k,m+1,d} = \begin{cases} Z_{A_k,m,d} \cap \{X_{A_k,d} : c(X_{A_k,d}) \geq r_{m,d}\}, \\ v_{A_k,m,d} = 1 \\ Z_{A_k,m,d} \cap \{X_{A_k,d} : c(X_{A_k,d}) < r_{m,d}\}, \\ v_{A_k,m,d} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中 $Z_{A_k,m+1,d}$ 表示在第 $m+1$ 时刻 $X_{A_k,d}$ 所有可能值的集合。如: 集合 $Z_{A_k,1,d}$ 为所有的正实数, 由此进行用户选择和速率分配, 在第 1 个时刻结束以后, 小区 A 中所有的用户接收到 ACK/NAK 反馈 $v_{A_k,d,1}$, 则根据式(9)进行 $Z_{A_k,2,d}$ 的更新, 以此类推, 逐步估计用户 A_k 在频率块 d 上的 SIR 与 α 的乘积值。

2.2 优化目标函数

传统的跨层优化都是考虑系统的容量作为优化目标, 即只考虑基站发送的比特数/秒/赫兹, 而不考虑误包率。但是当发射端完全不知道信道信息时, 通过优化分配的数据速率会造成传输中断, 因而产生系统误包。因此, 本文在考虑误包的情况下, 采用系统如下定义的平均 goodput G 作为优化目标函数:

$$G = \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D \Pr(c(X_{A_m,d}) \geq r_{m,d}) r_{m,d} \quad (10)$$

给定目标误包率(PER) ε , 由式(7)可得

$$1 - \varepsilon = \Pr(c(X_{A_m,d}) \geq r_{m,d} | Z_{A_m,m,d}) \\ = \Pr(X_{A_m,d} \geq \theta_{m,d} | Z_{A_m,m,d}) \quad (11)$$

其中

$$\theta_{m,d} = \alpha \left(2^{\frac{r_{m,d} DM}{NT}} - 1 \right) \quad (12)$$

基于以上分析, 最优化问题可以描述为如下约束的最大化问题:

$$\left. \begin{aligned} \text{优化目标: } G^* &= \max_{r_{m,d}, A_m, d} \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D \Pr(c(X_{A_m,d}) \geq r_{m,d}) r_{m,d} \\ \text{约束条件: } \Pr(X_{A_m,d} \geq \theta_{m,d} | X_{A_m,d} \in Z_{A_m,m,d}) &= 1 - \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

这里把小区 A 中所有用户从 1 到 $m-1$ 时刻在频率块 d 上的 ACK/NAK 反馈记为矩阵 $\mathbf{V}_{A,m,d}$

$$\mathbf{V}_{A,m,d} = \begin{pmatrix} v_{A_1,1,d} & v_{A_1,2,d} & \cdots & v_{A_1,m-1,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{A_K,1,d} & v_{A_K,2,d} & \cdots & v_{A_K,m-1,d} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{v}}_{A_1,d}^m \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{v}}_{A_K,d}^m \end{pmatrix} \quad (14)$$

定义从 m 到 M 时刻最大的 goodput 为

$$F_{m,d}(W_{m-1,d}) = \max_{r_{m,d}, A_m, d} \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D \Pr(c(X_{A_m,d}) \geq r_{m,d}) r_{m,d} \quad (15)$$

其中 $W_{m-1,d} = (\mathbf{V}_{A,m-1,d}, A_{1,d}, \dots, A_{m-1,d}, \theta_{1,d}, \dots, \theta_{m-1,d})$, 由文献[9]可知,

$$F_{m,d}(W_{m-1,d}) = \max_{r_{m,d}, A_m, d} \left\{ (1 - \varepsilon) r_{m,d} + (1 - \varepsilon) \cdot F_{m+1,d}(W_{m,d} | v_{A_m,m,d} = 1) + \varepsilon F_{m+1,d}(W_{m,d} | v_{A_m,m,d} = 0) \right\} \quad (16)$$

当 ε 较小时, 式(16)可以简化为

$$F_{m,d}(W_{m-1,d}) = \max_{r_{m,d}, A_m, d} \left\{ (1 - \varepsilon) r_{m,d} + (1 - \varepsilon) \cdot F_{m+1,d}(W_{m,d} | v_{A_m,m,d} = 1) \right\} \quad (17)$$

因此最优化问题可以描述为如下约束的最大化问题:

$$\left. \begin{aligned} \text{优化目标: } G^* &= \sum_{d=1}^D F_{1,d}(W_{0,d}) \\ \text{约束条件: } \Pr(X_{A_m,d} \geq \theta_{m,d} | X_{A_m,d} \in Z_{A_m,m,d}) &= 1 - \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

3 多用户 FDD-OFDMA 系统的跨层设计

3.1 优化算法

本节考虑用户调度和速率分配基于 ACK/NAK 的跨层联合优化设计。由式(18)可知, 最优化目标函数的过程可以转换成马尔可夫决策过程(MDP)。传统 MDP 的解是进行向前或者向后迭代得到, 因此计算复杂度较高。文献[9]给出了 MDP 的闭合解。本文和文献[9]的主要区别在于: 文献[9]中研究的是 FDD-OFDM 系统, 本文研究的是 FDD-OFDMA 系统。文献[9]中研究了单小区的情况, 在仅考虑噪声存在的情况下, 进行相关 CSI 估计、功率分配和速率分配; 本文针对移动通信下行系统受限干扰的问题, 在考虑小区用户存在相邻小区基站干扰的情况下, 进行相关 CSI 估计和速率分配。

本文所提的算法主要包含以下几个步骤:

(1) 最优的状态更新 由式(11)可知式(9)可以写成

$$Z_{A_k,m+1,d} = \begin{cases} Z_{A_k,m,d} \cap \{X_{A_k,d} : X_{A_k,d} \geq \theta_{m,d}\}, v_{A_k,m,d} = 1 \\ Z_{A_k,m,d} \cap \{X_{A_k,d} : X_{A_k,d} < \theta_{m,d}\}, v_{A_k,m,d} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

由式(11), 式(12)可知, 集合 $Z_{A_k,m,d}$ 的上下限必定是 $\theta_{m,d}$ 的值。因此集合 $Z_{A_k,m+1,d}$ 的上下限可以表示为

$$L(\theta_{m,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^m) = \max \{ \theta_{i,d} : v_{A_k,i,d} = 1, 1 \leq i \leq m \} \quad (20)$$

$$U(\theta_{m,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^m) = \min \{ \theta_{i,d} : v_{A_k,i,d} = 0, 1 \leq i \leq m \} \quad (21)$$

由式(11), 式(20), 式(21)可以得到

$$\Pr\left(X_{A_k,d} \geq \theta_{m,d} \mid X_{A_k,d} \geq L(\Theta_{m-1,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^{m-1}), X_{A_k,d} < U(\Theta_{m-1,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^{m-1})\right) = 1 - \varepsilon \quad (22)$$

定义变量 $X_{A_k,d}$ 的 CDF 为

$$\varphi(u) = \Pr(X_{A_k,d} \leq u) \quad (23)$$

由式(8)可知, 变量 $X_{A_k,d}$ 的分子服从自由度为 2 的卡方分布函数, 分母服从自由度为 4 的卡方分布函数, 由文献[10]得到 $2X_{A_k,d} \sim F(2, 4)$ 。

因为 F 函数的概率密度函数为 $f(m, n) =$

$$\frac{\Gamma\left(\frac{m+n}{2}\right)}{\Gamma(m/2)\Gamma(n/2)} (m/n)^{m/2} v^{m-1} \left(1 + \frac{m}{n}v\right)^{-\frac{m+n}{2}}, v \geq 0。$$

因此

$$\begin{aligned} \varphi(u) &= 2 \int_0^u \frac{\Gamma(3)}{\Gamma(1)\Gamma(2)} \left(\frac{1}{2}\right) \left(1 + 2 \times \frac{2}{4}v\right)^{-3} dv \\ &= 1 - \frac{1}{(1+u)^2} \end{aligned} \quad (24)$$

其中 $\frac{\Gamma(3)}{\Gamma(1)\Gamma(2)} = \frac{1}{B(1,2)}$ 可以通过 Beta 分布的密度

函数对照表得其值。图 1 给出了式(24)和实际 $X_{A_k,d}$ 的累积分布函数曲线。

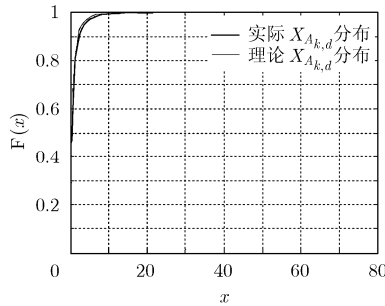


图1 $X_{A_k,d}$ 的累积分布函数曲线

因此式(22)可以写成

$$\frac{\varphi(U(\Theta_{m-1,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^{m-1})) - \varphi(\theta_{m,d})}{\varphi(U(\Theta_{m-1,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^{m-1})) - \varphi(L(\Theta_{m-1,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^{m-1}))} = 1 - \varepsilon \quad (25)$$

整理后得到

$$\begin{aligned} \varphi(\theta_{m,d}) &= \varepsilon \varphi(U(\Theta_{m-1,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^{m-1})) \\ &\quad + (1 - \varepsilon) \varphi(L(\Theta_{m-1,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^{m-1})) \end{aligned} \quad (26)$$

因此

$$\begin{aligned} \theta_{m,d} &= \varphi^{-1} \left[\varepsilon \varphi(U(\Theta_{m-1,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^{m-1})) \right. \\ &\quad \left. + (1 - \varepsilon) \varphi(L(\Theta_{m-1,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^{m-1})) \right] \end{aligned} \quad (27)$$

(2)用户选择 最优的用户选择策略为

$$A_{m,d} = \arg \max_{A_k,d} L(\Theta_{m-1,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^{m-1}) \quad (28)$$

(3)速率分配 根据 ACK/NAK 反馈以及信道信息估计值 $\theta_{m,d}$, 得到小区 A 中第 d 个频率块上选择的用户在 m 时刻的速率分配为

$$r_{m,d} = \frac{NT}{DM} \log_2(1 + \theta_{m,d}/\alpha) \quad (29)$$

具体的算法步骤:

初始化状态信息 L, U

for 时刻 $m=1:M$

for 频率块 $d=1:D$

(1)根据用户的状态信息采用式(28)进行用户选择;

(2)采用式(27)进行状态信息更新;

(3)采用式(29)进行速率分配;

(4)根据分配的速率采用式(20), 式(21)进行状态信息更新

endfor {d}

endfor {m};

(5)根据分配的速率和目标误包率代入式(18)计算系统的 goodput。

3.2 性能分析

由最优状态更新可知, 随着 M 的增大, 集合 $Z_{A_k,m+1,d}$ 的上限 $U(\Theta_{m,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^m)$ 和下限 $L(\Theta_{m,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^m)$ 逐渐逼近, 当 $M \rightarrow \infty$ 时, $U(\Theta_{m,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^m) = L(\Theta_{m,d}, \bar{\mathbf{v}}_{A_k,d}^m)$, 因此

$$\lim_{m \rightarrow \infty} r_{m,d} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{NT}{DM} \log_2(1 + \theta_{m,d}/\alpha) = c(X_{A_m,d})$$

即当 $M \rightarrow \infty$ 时, 所分配的速率 $r_{m,d}$ 等于当发射端完全已知信道信息时候的最大速率。因此, 随着 M 的增大, 本文所提算法是渐进最优的。

4 仿真结果与分析

仿真中设定系统带宽为 5 MHz 分成 320 个子载波 ($N = 320$), 所有的子载波分成 $D=16$ 个相互独立的频率块, 每个频率块内子载波是相邻的, 因此假设每个频率块内子载波的信道响应都是一样的。时隙 $T = 0.1$ s, 分成 $M = 30$ 个时刻, 干扰信号功率水平取 $\alpha = -3$ dB。

图 2 给出了 $K=4$ 时, 最大 SIR 估计 θ_m 和时刻 m 的关系。从图中可以看出, 当 $\varepsilon = 0.05$, $m < 25$ 时, 用户都反馈 ACK; 当 $\varepsilon = 0.08$, $m < 15$ 时, 用户都反馈 ACK; 当 $\varepsilon = 0.12$, $m < 10$ 时, 用户都反馈 ACK。当用户反馈 NAK 信号时, 进行 θ_m 上限值的更新, 由此估计到实际的最大 SIR。收敛时间是随着 PER 的增大而减小的。这是因为较大的 PER 提供了估计时更高的灵活性。

图 3 给出了 $K=4$ 时, 速率分配和时刻 m 的关系。图中的速率是基站 \tilde{A} 在所有频率块上分配的速率之

和, 即 $\sum_{d=1}^D r_{m,d}$ 。因为速率分配和 SIR 成正比, 因此速率分配的变化趋势和 θ_m 的变化趋势相似。

图 4 给出了 $K=4$, 不同目标 PER 对系统 goodput 的影响。当目标 PER 较小时, 本文所采用方法的 goodput 较小, 这是因为为了避免由于信道中断引起的误包率, 发送数据的速率较小, 随着目标 PER 的增加, 发送速率逐渐增加, 当 $\varepsilon > 0.03$ 时, 本文所采用方法比 FDD-OFDM 系统中发射端完全已知 CSI 时的 goodput 大。但是当目标 PER 增大到一定的时候, goodput 会减小, 这是因为较大的信道中断概率导致 goodput 的值变化受限。因此, 可以选择一个最优的目标 PER 最优化系统的 goodput (本文中 $\varepsilon = 0.13$ 时具有最优的系统 goodput)。从图中还可以看出, 当发射端完全已知 CSI 和采用轮询调度策略时, goodput 性能随目标 PER 的变化基本不变。在轮询调度策略中^[8], 用户选择和信道状态信息估计都是随机进行的, 即在小小区所有用户中随机选择一个用户, 并随机估计一个 SIR 值。在不考虑 MAC 层信息的情况下, 当发射端完全没有 CSI 的时候, 轮询调度策略是一个很合理的实际应用策略。在基于 FDD-OFDM 系统的策略中, 采用文献[9]中提出的用户选择策略, 即选择 D 个 SIR 乘积值最大的用户。

图 5 给出了 $\varepsilon = 0.13$ 时, 不同用户数对系统 goodput 的影响。从图中可以看出, 随着用户数的增加, 系统 goodput 增大, 并且采用 OFDMA 系统

的增益更加明显。这是因为多用户 OFDMA 系统同时存在频率分集和多用户选择分集增益。但是随着用户数的增加, 反馈量也会增加, 因此可以在兼顾反馈量要求的同时选择合适的用户数。从图中还可以看出, 采用轮询调度策略时, 系统 goodput 性能随用户数的变化基本不变。

图 6 给出了 $\varepsilon = 0.13$ 时, 不同独立频率块数 D 对系统 goodput 的影响。从图中可以看出, 随着独立频率块数 D 的增加, 采用 OFDMA 系统的 goodput 几乎不变。而采用 OFDM 系统的 goodput 随着 D 的逐渐减小, 这是因为该系统没有充分利用频率分集, 在每个频率块都是选择同一个用户。从图中还可以看出, 采用轮询调度策略时, 系统 goodput 性能随 D 的变化基本不变。

5 结束语

本文针对 FDD-OFDMA 移动通信下行系统受限干扰的问题, 在发射端完全不知道 CSI 的情况下, 对基于 FDD-OFDMA 系统中的用户选择和速率分配进行了研究, 并利用马尔可夫决策过程(MDP)提出了一种跨层资源调度设计方法。所提的算法采用了系统 goodput 为准则建立优化模型, 利用 ACK/NAK 的反馈信息给出了用户选择, 以及速率分配的方法。仿真结果表明, 与传统的算法相比, 所提出的算法具有较低的复杂度, 同时能够得到较好的系统 goodput。

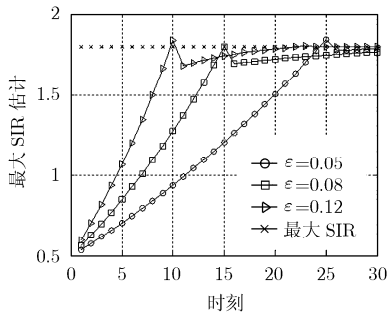


图 2 最大 SIR 估计和时刻 m 的关系

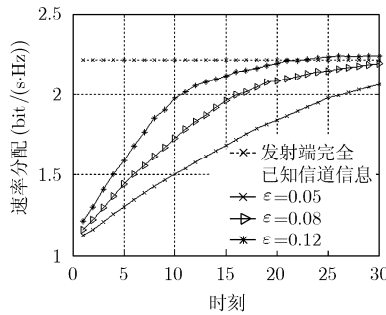


图 3 速率分配和时刻 m 的关系

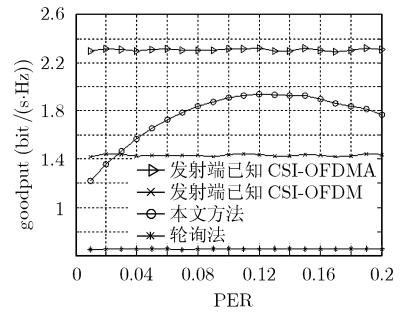


图 4 goodput 和 PER 的关系

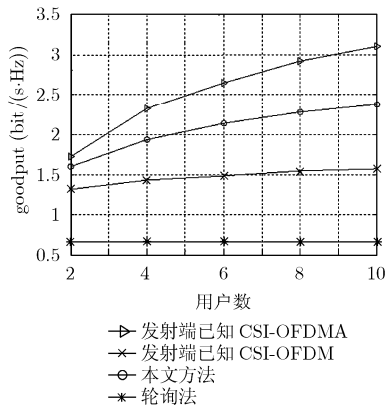


图 5 goodput 和用户数的关系

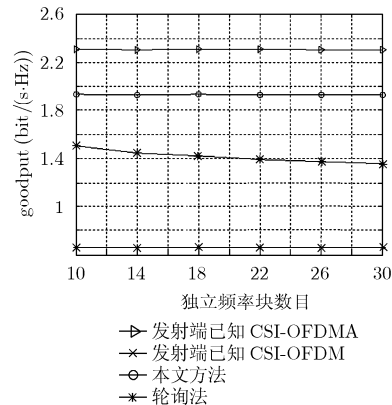


图 6 goodput 和独立频率块数目 D 的关系

参 考 文 献

- [1] 仲崇显. 多用户 MIMO-OFDM 系统中的资源分配与多小区协作研究. [博士学位], 东南大学, 2009.
- [2] Realp M, Perez-Neira A I, and Mecklenbrauker C. A cross-layer approach to multi-user diversity in heterogeneous wireless system. *IEEE International Conference on Communications 2005*, Seoul, Korea, May 16–20, 2005, V4: 2791–2796.
- [3] Wang Rui and Lau V K N. Robust optimal cross-layer designs for TDD-OFDMA systems with imperfect CSIT and unknown interferences: state-space approach based on 1-bits ACK/NAK feedbacks. *IEEE Transactions on Communications*, 2008, 56(5): 754–761.
- [4] Negi R and Cioffi J. Delay-constrained capacity with causal feedback. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, 48(9): 2478–2494.
- [5] Wang Rui and Lau V K N. Cross layer design of downlink multi-antenna OFDMA systems with imperfect CSIT for slow fading channel. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(7): 2417–2421.
- [6] Liu Chun-hui, Schmeink A, and Mathar R. Efficient power allocation for OFDM with imperfect channel state information. *Proc. 5-th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2009*, Beijing, China, Sep. 24–26, 2009: 1–4.
- [7] Wang Rui and Lau V K N. Closed-loop cross-layer SDMA designs with outdated CSIT. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(3): 1322–1328.
- [8] Zuleita K M H, Lau V K N, and Cheng R S K. Closed loop cross layer scheduling for goodput maximization in frequency selective environment with no CSIT. *Proc. IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC)*, Hong Kong, China, March 11–15, 2007: 299–303.
- [9] Zuleita K M H, Lau V K N, and Cheng R S K. Cross-layer design of FDD-OFDM systems based on ACK/NAK feedbacks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(10): 4568–4584.
- [10] 朱道元, 吴诚鸥, 秦伟良. 多元统计分析软件 SAS. 南京: 东南大学出版社, 1998: 80–81.
- 胡 莹: 女, 1981 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为 MIMO 通信信号处理、多用户信号处理和动态资源分配.
- 黄永明: 男, 1977 年生, 副教授, 研究方向为 MIMO 通信信号处理、多用户通信信号处理和协作通信.
- 杨绿溪: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信空时信号处理、协作通信和网络编码.