

基于非合作博弈模型的跨层资源分配算法

张 皓, 周志杰, 郑 翔, 张文强, 范章君

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘 要: 针对多用户多输入多输出-正交频分复用(multiple input multiple output-orthogonal frequency division multiple, MIMO-OFDM)系统的上行链路提出一种基于非合作博弈模型的跨层资源分配算法。基站为用户分配初始上行速率后,各用户间通过非合作博弈方式实现功率最小化。功率未饱和的用户向基站申请增加吞吐量,基站在调整用户吞吐量时综合考虑用户信道条件与媒体访问控制(media access control, MAC)层缓存的状态。仿真表明,算法既降低了用户终端的功率开销,同时兼顾了多用户间的公平性。

关键词: 多输入多输出; 正交频分复用; 非合作博弈; 资源分配

中图分类号: TN 913

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.06.049

Cross-layer resource allocation algorithm based on non-cooperative game theory model

ZHANG Hao, ZHOU Zhi-jie, ZHENG Xiang, ZHANG Wen-qiang, FAN Zhang-jun

(Inst. of Communications Engineering, Univ. of Science and Technology of the PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: A cross-layer resource allocation algorithm based on non-cooperative game theory model is proposed for the uplink of multi-user multiple input multiple output-orthogonal frequency division multiple (MIMO-OFDM) systems. After the base station (BS) assigning an initial uplink rate for each user, users minimize their power by a non-cooperative game approach. Users whose power does not saturate can still require BS for additional throughput. Users' channel conditions and buffer states in media access control (MAC) layer are taken into consideration when the BS adjusts users' throughput. Simulation results show that the algorithm can not only reduce power assumption but also maintain the fairness among users.

Keywords: multiple input multiple output (MIMO); orthogonal frequency division multiple (OFDM); non-cooperative game theory; resource allocation

0 引 言

多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)和正交频分复用(orthogonal frequency division multiple, OFDM)技术已经成为下一代无线通信系统的发展方向,OFDM技术以其抗干扰能力强、频带利用率高的优点受到人们青睐,而MIMO技术能够显著提高系统容量,结合这两种技术的优点和潜力将会大大改善无线通信系统的性能。

在多用户通信系统中,用户的性能不仅与自己的发射功率和信道条件有关,还受到其他用户的影响,这就启发了我们采用博弈论的分析方法,进行分布式功率控制,从而优化系统资源。目前博弈论已经在无线网络中得到了广泛应用,如文献[1]提出了一种基于非合作博弈模型的分布式算法;文献[2]论证了非合作博弈模型得到的解决方案可能不

是 Pareto 最优,无法保证用户公平性;文献[3-4]研究了多用户 OFDMA 系统中联合分配子载波,比特和功率的合作博弈算法。但是他们都没有将博弈理论引入到多用户 MIMO-OFDM 系统的资源分配问题中。

文献[5]通过研究多小区 OFDMA 网络中的非合作博弈算法降低了用户功率。文献[6]在文献[5]的基础上引入了虚拟仲裁机制,进一步提高了资源利用率。但上述研究没有考虑媒体访问控制(media access control, MAC)层中用户的队列状态,在基站调整用户上行速率时可能会造成公平性的下降,使信道条件较差的用户吞吐量偏低。服务的公平性是实际通信需要考虑的重要因素,仅仅从物理资源最优化的角度来设计系统,将无法满足不同用户的服务质量(QoS)需求。

在上述文献的基础上,本文将跨层设计与非合作博弈模型引入资源分配的过程中,提出了一种基于非合作博弈

模型的跨层资源分配算法。算法适用于子载波可复用的大区环境,在 MIMO-OFDM 系统上行链路中通过非合作博弈方式最小化用户功率。功率富余的用户申请增加上行速率,在基站调整用户吞吐量时综合考虑了 MAC 层用户缓存的空闲状态,保证了用户服务的公平性。

1 系统模型

多用户 MIMO-OFDM 系统上行链路模型如图 1 所示,系统共有 K 个用户, M 个子载波,发射总功率为 P_{total} ,每个用户的功率上限为 P_{max} 。用户根据基站分配的比特数通过多天线将数据发送出去,到达基站的数据包采用先进先出(first in first out, FIFO)的方式进行排队,用户缓存容量为 L 个数据包。基站根据 MAC 层用户队列状态对用户终端的上行速率进行调整。

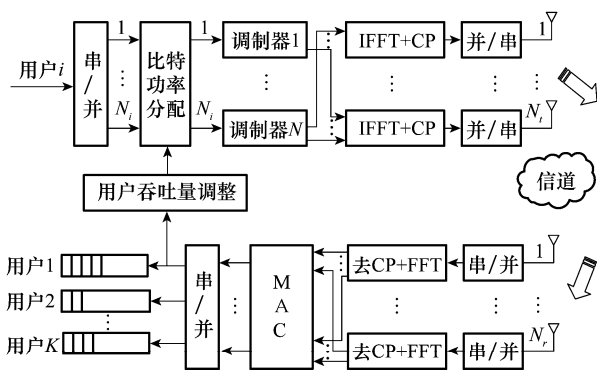


图 1 系统模型

基站端有 N_r 根接收天线,每个用户端有 N_t 根发送天线, M 个子载波被所有用户共用。用户 i 的数据经串/并转换后得到并行的数据流,每路数据流对应 OFDM 的一个子载波。由于方形正交幅度调制(quadrature amplitude modulation, QAM)的调制和解调易于实现,并且频谱效率较高,所以本系统采用了方形 QAM,并且假设每个子载波都采用 Gray 编码映射到方形多进制正交幅度调制(multiple quadrature amplitude modulation, MQAM), $M = 2^Q$, $r_l \in \{0, 1, 2, 4, 6, 8\}$, r_l 表示每个子载波传输的比特数目。假定用户在一个时隙中的信道增益不变,各用户的信道估计信息通过反馈信道反馈,且接收端和发送端能够完全获知信道状态信息(channel state information, CSI)。

对于上行链路,假设基站收到第 i 个用户在子载波 l 上的传输信号为

$$x_l^i(n) = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k^l h_k^l} s_k^l(n) + n_l^i(n) \quad (1)$$

式中, P_k^l 、 h_k^l 与 s_k^l 分别是第 k 个用户在子载波 l 上的传输功率、信道增益和传输信号; n_l^i 为高斯白噪声。由于采用了子载波复用,基站接收到的信号不仅包含了用户 i 的信号,也包括了其他用户的干扰。定义 $N_l^i = E(\|n_l^i\|^2) = N_0$, 用户 i 在子载波 l 上的接收信噪比为^[8]

$$\Gamma_l^i = \frac{P_l^i h_l^i}{\sum_{k \neq i} P_k^l h_k^l + N_0} \quad (2)$$

假设用户 i 的误比特率为 BER_i ,根据香农定理,用户 i 在第 l 个子载波上可传送的比特数为 r_l^i ,可表示为

$$r_l^i = W \log_2(1 + c_i \Gamma_l^i) \quad (3)$$

式中, $c_i = -1.5 / \ln(5BER_i)$; W 表示带宽。

基站为每个用户分配上行链路的传输速率,即用户吞吐量 R_i ,用户将把自己的传输速率合理地分配到 M 个子载波上。优化的目标是使系统总吞吐量最大,且用户通过最小的功率实现基站给定的速率。具体描述为

$$\max \sum_{i=1}^K \sum_{l=1}^M r_l^i \quad (4)$$

限制条件

$$R_i = \sum_{l=1}^M r_l^i, \forall i, \sum_{l=1}^M P_l^i \leq P_{max}, \forall i, \min \sum_{l=1}^M P_l^i$$

2 基于非合作博弈模型的跨层设计

博弈论是一门交互式分析冲突的决策理论,它是使用严谨数学模型解决现实世界中的利害冲突的理论^[7]。博弈问题中一般有 5 个要素:局中人、局中人的可行方案集、局中人决策的先后顺序、局中人的收益函数和信息。策略式博弈由 3 种元素组成、局中人集合(K -player)、策略集合(Action)和收益函数($u_i(\cdot)$),可表示为 $G = \{K, A, u_i(\cdot)\}$ 。其中,收益函数是博弈最后结果中各个局中人利益的表示。在非合作博弈理论中,纳什均衡^[7]也是一个非常重要的概念。纳什均衡是关于博弈将会如何进行的“一致”预测,也就是说,如果所有参与者预测特定的纳什均衡会出现,那么没有参与者会愿意采用与均衡不同的行动策略。但是纳什均衡不一定存在,也不具有唯一性。

无线通信网络中,由于带宽限制,移动用户之间无法通过相互协调而实现资源的最优利用。每个用户都根据自己的需求来最大限度地抢占资源,这样导致资源的不合理分配与系统效能的降低,这同时也启发了我们采用非合作的博弈模型来解决这类问题。根据优化目标的要求,当上行速率被指定后,用户们可以通过博弈来获得最小的功率开销。为每个用户定义收益函数 u_i ,它反映用户付出的功率代价。用户传输速率越大,误码率(bit error rate, BER)越小,则意味着更高的功率开销。这里 BER 是根据实际业务类型确定的。博弈问题描述为

$$Game: \arg \min u_i = \sum_{l=1}^M P_l^i = P_i \sum_{l=1}^M r_l^i = R_i \quad (5)$$

式中, P_i 表示用户 i 消耗的功率。由式(2)和式(3)可知,用户速率和功率之间有着密切联系,因此 u_i 可以表示成关于速率的函数 $u_i(r_i)$, $r_i \in \Omega$ 。其中, $r_i = [r_1^i, r_2^i, \dots, r_M^i]^T$ 表示各个子载波上的速率分配; Ω 为策略集,是 r_i 的取值范围。由于本文的博弈问题满足下列条件:

(1) 策略集 Ω 为一个非空的凸集,且为欧式空间 \mathbb{R}^K 的一个紧子集。

(2) 收益函数 $u_i(r_i)$ 在策略集 Ω 上是连续的,且在 r_i 处是准凸的。

根据文献[7]可知,该博弈问题存在纳什均衡解。当达到纳什均衡解后,没有用户可以再通过调整自己的速率分配来降低功率。博弈过程结束后,用户还可以根据自己的需求,向基站提出增加速率的申请,基站根据用户信道条件调整其速率。

资源分配的公平性在多用户通信系统中也是一个不可忽视的因素。基站接收到用户数据后,进入 MAC 层的用户缓存等待后续处理。由于各用户上行速率不同,缓存队列中等待处理的数据包数量也不同。上行速率较大的用户,其等待处理的数据包较多,反之则较少。由于基站处理数据包的速度较快,如果某个用户的速率过小,就可能导致其缓存为空,得不到服务。为保证公平性,基站在调整用户速率时应当考虑用户缓存状态。当多个用户同时向基站申请增加上行速率时,基站应综合 MAC 层缓存的服务情况与用户信道状态,决定优先增加哪个用户的速率。用户收到基站反馈信息后,调整物理层的比特分配。设用户 i 的缓存中的空余容量为 Q_i 个数据包,定义判决函数

$$w_i = Q_i \times h_i \quad (6)$$

判决函数既反映了用户服务情况,又考虑了其信道增益。判决函数的值越大,说明用户越需要增加吞吐量。通过判决函数来确定调整用户上行速率时的优先级,可以避免用户信道条件差导致的吞吐量降低,同时也提高了用户的 QoS。

3 资源分配算法的实现

第 2 节中得到了多用户间基于非合作方式的博弈模型与跨层设计时要考虑的公平性指标,但基站与用户间如何进行吞吐量的分配仍是一个比较复杂的问题。本文提出了一种新的吞吐量分配算法。在上行链路中,基站首先为各用户分配初始速率。用户间通过非合作博弈方式达到平衡,以最小的功率实现传输速率。博弈结束后,功率还有剩余的用户向基站申请增加速率,基站根据判决函数调整用户上行速率。算法具体描述如下:

步骤 1 初始化参数。基站为各用户分配初始速率为 $R_i(\text{init})$ 。

步骤 2 用户间进行非合作博弈,寻找纳什均衡解^[7]。通过式(5)的非合作博弈可使得用户用较小的发送功率实现基站指定的传输速率。博弈算法具备以下特点:

(1) $u_i(r_i, r_{-i}) = u_i(\bar{r}_i, r_{-i}), \forall i, \forall \bar{r}_i \in \Omega, r_{-i} \in \Omega$, 其中 $r_{-i} = [r_1 \dots r_{i-1} r_{i+1} \dots r_K]$ 。即任何用户都无法通过改变自己功率来提高收益函数。

(2) 对于给定的 r_i , 从任何功率状态开始,都能收敛到纳什均衡解。

(3) Pareto 最优:对于每个 u_i 如果 $\bar{u}_i \geq u_i$, 则 $\bar{u}_i = u_i$ 。没有某个用户可以在不降低其他用户性能的条件下提高自己的性能。

步骤 3 各个用户计算是否需要增加上行速率。博弈结束后,各用户以最小的功率获得吞吐量。如果用户功率未达到

P_{\max} , 则存在提高吞吐量的可能。由于用户采用 MQAM 方式,根据式(2)和式(3),用户子载波 l 每增加 1 bit 吞吐量所需要的额外功率为 $\Delta P_l^i = P_l^i(2^{r_l^{i+1}} - 1)/(r_l^i - 1)$, 其中 P_l^i 为当前功率。选择所需额外功率的最小值 $\Delta P_i^{\min} = \min \{\Delta P_l^i, \Delta P_l^j, \dots, \Delta P_l^M\}$, 如果 $\Delta P_i^{\min} + P_i \leq P_{\max}$, 则用户 i 可以向基站申请增加 1 bit 吞吐量。

步骤 4 基站调整用户速率。当基站接收到用户的申请后,按照式(6)的判决函数选择一个最合适用户

$$\hat{i} = \arg \max \{w_i\}, i \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (7)$$

基站为用户 \hat{i} 增加 1 bit 的吞吐量,基站每次为一个用户增加吞吐量。然后返回步骤 2。

步骤 5 当用户都不再增加吞吐量后,系统达到吞吐量最大值,算法结束。

4 仿真与性能分析

利用 Matlab/Simulink 平台,按照图 1 的模型搭建仿真平台。假设信道为时变频率选择性多径信道,最大时延为 $\tau_{\max} = 5 \mu\text{s}$,最大多普勒频移 $f_{\max} = 70 \text{ Hz}$,路径数目为 5,每个路径的功率服从指数衰减分布,可建模为抽头延时滤波器。子载波数目为 64 个,循环前缀长度为 32,带宽 12.8 MHz。基站端发射天线数目 $N_T = 4$,用户端接收天线数目 $N_R = 4$ 。假定系统中有 8 个用户,每个用户期望的误码率为 $BER_i = 10^{-3}$,最大功率为 $P_{\max} = 30 \text{ mW}$,噪声功率为 -70 dBmW 。

图 2 将本文算法和未考虑公平性的算法进行了对比,未考虑公平性的算法是指基站在调整用户上行速率时只根据用户信道增益来选择为哪个用户增加吞吐量。缓存空闲率是指一段时间内,基站的用户上行缓存中没有待处理数据包的时间与观察时间的比值,它能够反映用户得到服务的质量。仿真时假设用户 4 与 5 的信道条件最差,信道增益较低,而用户 1 与 6 的信道条件最好。从图 2 中可以看出,在未考虑公平性的情况下用户 4 和 5 由于信道条件较差,所分配的吞吐量较少,其缓存队列处于空闲的时间较长,用户服务保证很差。而本文算法在调整吞吐量时充分考虑了用户公平性,当发现用户缓存空闲率过高时,能够优先响应这部分用户增加上行速率的申请,因此用户得不到服务的时间很少。

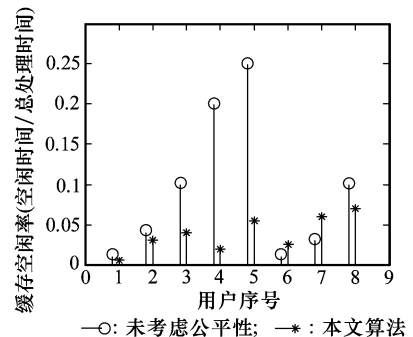


图 2 不同算法用户缓存空闲率比较

图 3 对比了本文算法和未考虑公平性算法的平均数据包时延。图中明显可以看出,在未考虑公平性情况下信道条件差的用户长期处于等待,平均数据包时延较大。而本文提出的算法缩短了各个用户的平均包延时。

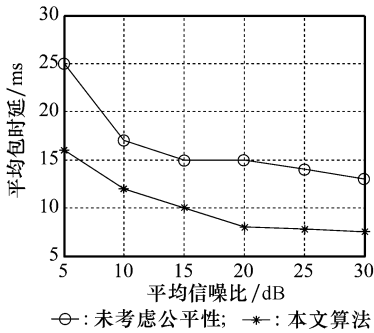


图 3 不同算法数据包时延的比较

图 4 对比了本文算法与贪婪算法、注水算法的平均用户功率。贪婪算法在分配传输比特时总是选择信道条件最好的子载波来传输尽可能多的比特。当其他用户的干扰增大后,贪婪算法会提高自己的功率以获得更高的信噪比,直到满足规定的传输速率或达到功率上限。由于用户间的干扰是相互影响的,提高了自身的功率也就增加了对他人的干扰,因此采用贪婪算法的分配方案,用户总功率的消耗会一直处于较高水平。注水算法能够根据拉格朗日极值定理求出满足给定速率条件下的最小功率开销。当基站指定了用户上行速率后,理论上存在一种最优的功率配置策略,使得各用户开销最小。但由于算法求解过程复杂,在实际系统中难以实现。本文算法采用博弈理论后大大降低了功率,性能接近注水算法。

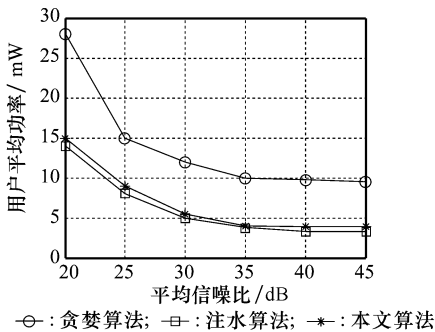


图 4 不同算法用户平均功率的比较

图 5 比较了本文算法、Max-Rate 方案和固定分配策略的平均系统吞吐量。固定分配策略中基站将每个用户的吞吐量预先设定,用户功率富余也不向基站申请增加吞吐量,所以其系统平均吞吐量最低。而 Max-Rate 方案以速率最大化为目标,用户博弈结束后申请增加吞吐量时,基站总是提高信道条件最好的用户的上行速率,而不考虑其他用户,因此其吞吐量最高。本文算法通过博弈降低了功率消耗,性能大大优于固定策略,但由于考虑了公平性,吞吐量略低于 Max-Rate 方案。

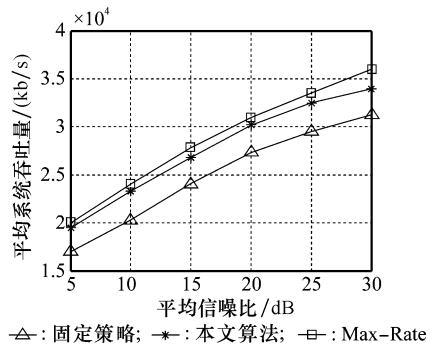


图 5 平均系统吞吐量的比较

5 结论

本文针对多用户 MIMO-OFDM 系统的上行链路,提出了一种基于非合作博弈模型的跨层资源分配算法,该算法在通过博弈方法实现用户功率最小化的基础上,同时兼顾了用户服务的公平性。仿真结果表明该算法的性能明显优于传统算法,比较适合大区子载波复用的通信环境。

参考文献:

- [1] Goodman D, Mandayan N. Network assisted power control for wireless data [C]// *IEEE 53rd Vehicular Technology Conference*, 2001:1022 - 1026.
- [2] Cao X R, Shen H X, Milito R, et al. Internet pricing with a game theoretical approach: concepts and examples [J]. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2002,10(2):208 - 216.
- [3] Han Z, Ji Z, Liu K J R. Fair multiuser channel allocation for OFDMA networks using nash bargaining solutions and coalitions [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2005,53(8):1366 - 1376.
- [4] Chee T K, Lim C C, Chooi J. A cooperative game theoretic framework for resource allocation in OFDMA systems [C]// *IEEE International Conference on Communication Systems*, 2006:1 - 5.
- [5] Zhu Han, Zhu Ji, Liu K J R. Power minimization for multi-cell OFDM networks using distributed non-cooperative game approach [C]// *IEEE Globecom*, 2005:3742 - 3747.
- [6] Zhu Han, Zhu Ji, Liu K J R. Non-cooperative resource competition game by virtual referee in multi-cell OFDMA networks [J]. *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, 2007, 25 (6): 1079 - 1090.
- [7] Fudenberg D, Tirole J. *Game theory* [M]. Cambridge, MA: MIT Press,1991.
- [8] Zhu Han. An optimization theoretical framework for resource allocation over wireless networks [D]. University of Maryland, 2003:121 - 145.
- [9] Yu Xinmin, Wu Tong, Huang Jing, et al. A non-cooperative game approach for distributed power allocation in multi-cell OFDMA-relay networks [C]// *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2008:1920 - 1924.
- [10] Wu Dan, Yu Dixiong, Cai Yueming. Subcarrier and power allocation in uplink OFDMA systems based on game theory[C]// *IEEE International Conference on Neural Networks and Signal Processing*, 2008:522 - 526.