

基于 OFDMA 系统的改进型功率分配贪婪算法研究

张天瑜

(无锡市广播电视大学 机电工程系, 江苏 无锡 214011)

摘要: 根据功率分配中 OFDMA 系统的吞吐量与用户间公平性能的平衡问题, 在公平约束条件下, 提出一种改进型功率分配贪婪算法。该算法根据用户请求进行子载波的预分配, 可以有效地实现每个用户具体的比特分配和功率分配。仿真结果表明, 该算法的吞吐量逼近于迭代注水功率分配算法, 可以在 OFDMA 系统的吞吐量与用户间的公平性能之间寻求到一个理想的平衡点。

关键词: 正交频分多址; 功率分配; 公平约束条件; 贪婪算法

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Research on modified power allocation greedy algorithm based on OFDMA system

ZHANG Tian Yu

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Wuxi Radio & Television University, Wuxi 214011, China)

Abstract: By considering the equilibrium problem between OFDMA system throughput and the fair performance among users in power allocation, a modified power allocation greedy algorithm is proposed under the fair constraint condition. The proposed algorithm pre-allocates the sub-carrier according to user request and can realize the concrete bit allocation and power allocation of every user effectively. The simulation results show that the throughput of the proposed algorithm is approximate to that of the iterative water-filling power allocation algorithm. And it is possible to seek a ideal equilibrium between OFDMA system throughput and the fair performance among users.

Key words: OFDMA; power allocation; fair constraint condition; greedy algorithm

作为对抗宽带无线通信传输过程中频率选择性衰落的有效手段, 正交频分复用 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)正受到越来越多的关注。对于多用户的 OFDM 系统, 由于传输路径各不相同, 并且各用户的信道衰落是相互独立的, 因此, 这就使得对于某一用户发生衰落严重的子载波对于其他用户也发生严重衰落的可能性极小。利用这个特性, 正交频分多址 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)依据各个用户的信道条件和相应的优化准则, 将 OFDM 符号的子载波动态地分配给不同的用户, 相对于频分多址 FDMA(Frequency Division Multiple Access)、时分多址 TDMA(Time Division Multiple Access), OFDMA 可以实现通信系统总体的频谱效率和功率资源的优化。OFDMA 系统利用子载波的正交特性来实现用户的多址接入, 系统中的资源调度模块可以利用多用户分集和信道衰落特性,

根据信道增益自适应地进行资源分配, 能够明显地提高 OFDMA 系统的吞吐量。

目前, 常见的两种最优自适应资源分配算法分别是边缘自适应 MA(Margin Adaptive)算法和速率自适应 RA(Rate Adaptive)算法。MA 算法的目标是在满足各个用户传输速率的前提下, 根据各个用户的瞬时信道状况, 动态地为用户分配子载波, 并确定在各个子载波上传输的比特和功率, 使总的发射功率达到最小值。而 RA 算法的目标是在总的发射功率和每一个用户的最小速率的限制下, 动态分配系统资源, 使得 OFDMA 系统的吞吐量达到最大值。

功率分配是一个经典的研究问题, 迭代注水功率分配算法是其理论上界^[1], 但是需经多次的迭代运算才能求出吞吐量达到最大值时的最优解。参考文献[2]详细地讨论了在线性条件下功率分配的方案。参考文献[3]

研究了在功率约束下,OFDMA 系统的吞吐量达到最大值时的功率分配问题,给出了在用户间速率成比例和高信噪比限定条件下的线性功率分配算法。这种算法简化了运算,不需进行迭代运算,但该算法只关注吞吐量达到最大值,忽视了功率分配时用户间的公平性能。此外,通过研究发现,系统的吞吐量与用户间的公平性能是相互矛盾的^[4-8]。本文在研究上述各种功率分配算法基础上,在公平约束条件下,提出一种改进型功率分配贪婪算法。该算法根据用户请求进行子载波的预分配,不仅可以有效地实现每个用户具体的比特分配和功率分配,而且可以在 OFDMA 系统的吞吐量与用户间的公平性能之间寻求到一个理想的平衡点。

1 OFDMA 系统模型

在 OFDMA 系统资源的分配中,用户间公平性能和用户服务质量 QoS(Quality of Service)性能的保证主要是在分配子载波和功率给用户时考虑的问题。如果用户间的公平性能达不到合理的要求,就会导致某些用户的数据传输速率太低,甚至会让用户放弃服务。

假设 OFDMA 系统的用户数为 K , 系统的子载波个数为 N , 并且一个子载波在同一时刻只能被 1 个用户所占用, 系统的可用带宽为 B , 用户 k 在子载波 j 上的信道增益为 $g_{k,j}$; 加性高斯白噪声 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 的方差为 $\sigma^2 = N_0 B/N$ 。其中, N_0 为加性高斯白噪声的单边功率谱密度; 相应的信道噪声功率比为 $H_{k,j} = g_{k,j}^2 / \sigma^2$; 第 k 个用户在第 j 个子载波上分得的功率为 $p_{k,j}$, 若第 j 个子载波分配给了第 k 个用户, 则 $p_{k,j} = 1$, 否则, $p_{k,j} = 0$ 。

基于以上的假设, 在 RA 算法中, 最优化自适应资源分配的数学模型可以构建为:

$$C = \max_{\rho_{k,j}, p_{k,j}} \frac{B}{N} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N \rho_{k,j} \log_2(1 + p_{k,j} H_{k,j}) \quad (4)$$

式(1)中, C 为系统的吞吐量; $\rho_{k,j}$ 为子载波占用概率。

并且满足以下条件:

$$p_{k,j} \in \{0, 1\}, \forall k, j \quad (2)$$

$$\rho_{k,j} \geq 0, \forall k, j \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^K \rho_{k,j} = 1, \forall j \quad (4)$$

式(4)表示一个子载波在同一时刻仅可以分配给一个用户所使用。

$$P_T = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \rho_{k,j} p_{k,j} \leq P_C \quad (5)$$

式中, P_T 表示所有子载波的功率和, P_C 为系统可用的总功率。

上述的最优化自适应资源分配的数学模型是一个非确定多项式 NP(Nondeterministic Polynomial)问题, 简化上述 NP 问题的一个办法就是把上述的联合子载波-功

率分配方案分成两步来完成:(1)分配子载波;(2)确定各子载波的功率、调制方式和加载比特数^[9-12]。通常由于 OFDMA 系统已经按照子载波的调度算法对子载波完成了分配, 因此只需讨论子载波的功率分配问题。

2 迭代注水功率分配算法

迭代注水功率分配算法是以 OFDMA 系统的吞吐量达到最大值为目标的。对于这个优化问题, 根据式(1), 利用 Lagrange 算法, 构造 Lagrange 函数:

$$L = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \rho_{k,j} \log_2(1 + p_{k,j} H_{k,j}) - \lambda [\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \rho_{k,j} p_{k,j} - P_T] \quad (6)$$

为了求出 $p_{k,j}$, 使得式(1)达到最大值, 对式(6)求偏导数, 并令其偏导数为 0, 可得:

$$\frac{\partial L}{\partial p_{k,j}} = \rho_{k,j} \frac{1}{\ln 2} \frac{H_{k,j}}{1 + p_{k,j} H_{k,j}} - \rho_{k,j} \lambda = 0 \quad (7)$$

令 $\beta = \lambda \ln 2$, 通过式(7)可以计算出:

$$\beta = \frac{H_{k,j}}{1 + p_{k,j} H_{k,j}} \quad (8)$$

$$p_{k,j} = [1/\beta - 1/H_{k,j}]^+ \quad (9)$$

式中, $[1/\beta - 1/H_{k,j}]^+$ 表示当 $1/\beta - 1/H_{k,j} > 0$ 时, $p_{k,j} = 1/\beta - 1/H_{k,j}$; 当 $1/\beta - 1/H_{k,j} < 0$ 时, $p_{k,j} = 0$ 。

最后, 利用迭代算法计算出一个适当的功率注水门限 β , 由此就可以确定出最优的功率分配。因此, 这种功率分配算法被称为迭代注水功率分配算法。

利用迭代算法计算 β 的过程为:

(1) 设定 β 的初始值

$$\beta_0 = \frac{1}{N} [P_T + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \frac{1}{H_{k,j}}] \quad (10)$$

(2) 修正 β 的迭代方法

$$\beta^s \leftarrow \beta + \mu \frac{1}{N_{ON}} [P_T - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N p_{k,j}] \quad (11)$$

式中, μ 为调整步长, $0 < \mu < 1$; N_{ON} 为本次实际分配功率的子载波总数。

3 改进型功率分配贪婪算法

由于迭代注水功率分配算法只关注吞吐量达到最大值, 而忽视了功率分配时用户间的公平性能, 即子载波信道状态好的功率分配较多, 而子载波信道状态差的功率分配较少甚至是不分配。为此, 需要对迭代注水功率分配算法进行改进。针对 OFDMA-TDD 系统下行链路的功率分配, 在公平约束条件下, 提出一种改进型功率分配贪婪算法。该算法考虑在保证用户公平性能的前提下, 通过迭代分配比特和相应的功率, 每次选择吞吐量增量与功率增量比值最大的子载波来分配功率, 使每功率单位所带来的吞吐量达到最大值。

公平约束条件设置为:

$$x\% r_k > R_k \text{ 或 } r_k > \delta r_{avg} \quad (12)$$

式中, $x\%$ 为时分双工 TDD(Time Division Duplex) 的下行

网络与通信 Network and Communication

比例因子, r_k 为用户 k 的下行数据传输速率, R_k 为用户 k 的下行流量, r_{avg} 为所有用户的平均下行数据传输速率, δ 为公平因子, $x\%r_k > R_k$ 表示用户 k 的下行流量能被系统全部传输, $r_k > \delta r_{avg}$ 表示用户 k 的下行数据传输速率高于一定的公平限定值。

在 OFDMA 系统中, 各子载波分配到的比特数目决定了该子载波所采用的调制方式。假设第 i 个子载波在某一符号期间分配到 b_j 个比特数据, 则该子载波应该采用多电平正交幅度调制 MQAM(Multilevel Quadrature Amplitude Modulation), 其中 $M=2^{b_j}$ 。在调制时, 不同的调制方式对发射功率的要求是不相同的。对于 QAM 调制方式, 由于矩形 QAM 星座包括 4QAM、16QAM 和 64QAM 等, 因此在星座图中的每个星座点所对应的调制比特数量 b_j 分别为 2、4、6 等。

假设子载波的传输功率增量为 Δp_k , 用户分配到的功率为 p_a , 用户的功率增量为 Δp , 则改进型功率分配贪婪算法的流程为:

当 $p_a + \Delta p < p_c$ 时, 存在功率余量, 做以下的循环:

(1) 对所有子载波 j , 计算其功率增量:

$$\Delta p_j = P(j, b_j + \Delta b_j) - P(j, b_j) \quad (13)$$

式中, Δb_j 为子载波的相邻调制比特数与当前调制比特数的差值, $P(j, b_j)$ 为子载波 j 每传输 b_j 比特时所需分配的功率。

$$P(j, b_j) = (2^{b_j} - 1) \Gamma / H_{k,j} \quad (14)$$

式中, $H_{k,j}$ 为子载波 j 的信道噪声功率比, Γ 为与物理层编码调制关联的冗余量。考虑传输的误码率为 BER 和物理层编码调制方式为 MQAM 与格雷编码联合时, $\Gamma = -\ln(5BER)/1.5$ 。

(2) 如果 $p_a + \Delta p_j > p_c$, 则令 $p_j = +\infty$, 这样第 j 个子载波就不会在下面的步骤(5)中被选择。

(3) 计算功率每增加 Δp_j 所产生的吞吐量增量:

$$\Delta R_j = x\% \Delta b_j B_s \quad (15)$$

式中 B_s 为子载波的带宽。

(4) 令 \min 为用户 k 下行数据传输速率的最小值, 即保证公平性能的最小吞吐量。

(5) 对于所有的子载波, 在公平约束条件下, 计算最优的子载波 j^* :

$$j^* = \operatorname{argmax}(\Delta R_j / \Delta p_j) \quad (16)$$

式中 arg 为辐角计算。

其公平约束条件设置为:

$$(x\%r_k < R_k) \& [r_k = \min \text{ 或 } \min > \delta(r_{avg} + \Delta b_j B_s / N)] \quad (17)$$

(6) 将功率分配给选定的子载波 j^* : $\Delta p = \Delta p_{j^*}$ 。

(7) 如果 $p_a + \Delta p < p_c$, 则表明还有功率余量, 更新以下参数:

$$p_a = p_a + \Delta p \quad (18)$$

$$b_j = b_j + \Delta b_{j^*} \quad (19)$$

$$r_j = r_j + \Delta b_{j^*} B_s \quad (20)$$

(8) 返回到开始进行条件判断及下一次分配, 直至确定每个子载波上的调制方式和分配到的功率。

4 仿真实验与结果分析

改进型功率分配贪婪算法是在确定子载波后执行的, 因此可以利用多用户情况下功率分配后的吞吐量变化来分析该算法的性能。在仿真实验中, 假设接收端的同步和信道估计良好, 考虑单小区 OFDMA 系统的下行链路数据传输, 系统带宽为 1 MHz, 划分为 64 个子载波。子载波上可分配的最大比特数为 6, 不采用信道编码。无线信道模型是 COST207 中的高密度建筑城区, 即 BadUrban 模型, 时延扩展为 2.5 μ s。信道状态信息抽样间隔为 0.5 ms, 系统可用的总功率 $p_c = 1$ W, 误码率 $BER = 10^{-4}$, TDD 的下行比例因子 $x\% = 70\%$, 公平因子 $\delta = 80\%$, 用户 k 下行数据传输速率的最小值 \min 归一化为 50 Kb/s, 其他用户的信噪比差额 SNRG (Signal to Noise Ratio Gap) 为 5 dB。

这里用来对比的迭代注水功率分配算法是一种不考虑用户速率请求及信噪比 SNR 需求的理想算法, 该算法要求把功率尽量分配给信道条件较好的子载波, 这样才能充分利用有限的功率资源, 提高 OFDMA 系统的吞吐量。

在用户数 $K=20$ 的情况下, 改变平均 SNR, 然后分别使用改进型功率分配贪婪算法和迭代注水功率分配算法, 通过 Matlab 软件仿真得到 OFDMA 系统的吞吐量随平均 SNR 变化的曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出, 随着平均 SNR 的提高, 基于改进型功率分配贪婪算法所得到的系统吞吐量逼近于迭代注水功率分配算法所得到的系统吞吐量, 但是在平均 SNR 较低时, 由于公平约束条件的限制, 基于改进型功率分配贪婪算法所得到的系统吞吐量低于迭代注水功率分配算法所得到的系统吞吐量。

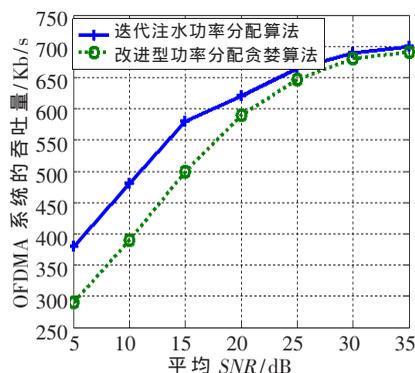


图 1 OFDMA 系统的吞吐量随平均 SNR 变化的曲线

在平均 SNR 为 30 dB 情况下, 改变用户数 K , 依次从 4~20, 然后分别使用改进型功率分配贪婪算法和迭

代注水功率分配算法,通过 Matlab 软件仿真得到 OFDMA 系统的吞吐量随用户数变化的曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,在 $K < 12$ 时,基于改进型功率分配贪婪算法所得到的系统吞吐量逼近于迭代注水功率分配算法所得到的系统吞吐量,但是随着用户数的增加,由于公平约束条件的限制,基于改进型功率分配贪婪算法所得到的系统吞吐量低于迭代注水功率分配算法所得到的系统吞吐量。

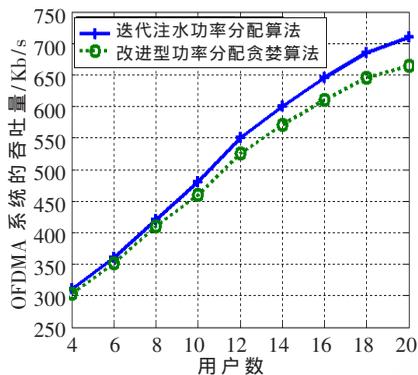


图 2 OFDMA 系统的吞吐量随用户数变化的曲线

在用户数 $K=20$ 的情况下,改变平均 SNR,然后分别使用改进型功率分配贪婪算法和迭代注水功率分配算法,通过 Matlab 软件仿真得到 OFDMA 系统公平性能的比较曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,改进型功率分配贪婪算法能够使 OFDMA 系统得到 100% 的公平性能,比迭代注水功率分配算法的公平性能提高了大约 50%。

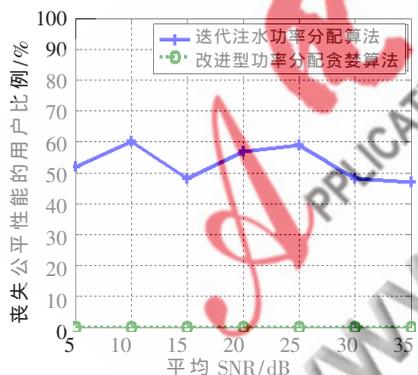


图 3 OFDMA 系统公平性能的比较曲线

从上述 3 次的仿真结果可以看出,改进型功率分配贪婪算法考虑了用户的速率请求和误比特率的需求,可以在 OFDMA 系统的吞吐量与用户间的公平性能之间寻求到一个理想的平衡点,其公平性能的提高是以牺牲一定的系统吞吐量作为代价的。

针对 OFDMA-TDD 系统下行链路的功率分配,在公平约束条件下,提出一种改进型功率分配贪婪算法,该算法根据用户请求进行子载波的预分配,不仅可以有效地实现每个用户具体的比特分配和功率分配,而且可以在 OFDMA 系统的吞吐量与用户间的公平性能之间寻求到一个理想的平衡点。这对于无线数据通信系统具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] KNOPP R, HUMBLET P A. Information capacity and power control in single-cell multiuser communications[C]. IEEE International Conference on Communications, Seattle, WA, USA, 1995:331-335.
- [2] WONG I C, SHEN Z K, EVANS B L, et al. A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems [C]. IEEE Workshop on Signal Processing Systems, Austin, Texas, USA, 2004:1-6.
- [3] SHEN Z K, ANDREWS J G, Evans B L. Optimal power allocation in multiuser OFDM systems [C]. IEEE Global Telecommunications Conference, San Francisco, CA, USA, 2003:337-341.
- [4] RONG B, QIAN Y, LU K. Revenue and fairness guaranteed downlink adaptive power allocation in WiMAX access networks [C]. Mobile and Wireless Communications Summit, Budapest, 2007:1-5.
- [5] PENG Y, DOUFEXIA, AMOUR S, et al. An investigation of adaptive sub-carrier allocation in OFDMA systems [C]. Vehicular Technology Conference, Stockholm, Sweden, 2005:1808-1811.
- [6] ERMOLOVA N Y, MAKAREVITCH B. Low complexity adaptive power and subcarrier allocation for OFDMA [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007,6(2): 433-437.
- [7] CHEN Y F. A fast subcarrier, bit, and power allocation algorithm for multiuser OFDM-based systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008,57(2):873-881.
- [8] MOHANRAM C, BHASHYAM S. Joint subcarrier and power allocation in channel-aware queue-aware scheduling for multiuser OFDM[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007,6(9):3208-3213.
- [9] NG C Y, SUNG C W. Low complexity subcarrier and power allocation for utility maximization in uplink OFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008,7(5):1667-1675.
- [10] SEO H, LEE B G. Proportional-fair power allocation with CDF-based scheduling for fair and efficient multiuser OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006,5(5):978-983.
- [11] FEITEN A, MATHAR R, REYER M. Rate and power allocation for multiuser OFDM: an effective heuristic verified by branch-and-bound [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008,7(1):60-64.
- [12] YAO Y, GIANNAKIS G B. Rate-maximizing power allocation in OFDM based on partial channel knowledge [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005,4 (3):1073-1083.

(收稿日期:2009-11-01)

作者简介:

张天瑜,男,1980 年生,技师,硕士研究生,主要研究方向:OFDM 调制技术及空时通信技术。