

基于预期容量损失的 OFDMA 子载波分配算法^①沈 骏^② 依 那^③ 蒋 伟 项海格

(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

摘 要 针对正交频分多址接入(OFDMA)系统的子载波分配问题,提出了一种基于预期容量损失的分配算法,该算法将子载波的联合分配分解为逐次分配以降低复杂度。每次分配时,该算法利用多用户频率选择性信道的特性,将用户在不同子载波上的速率差值作为每次分配中预期容量损失的度量,优先对预期容量损失最大的用户分配子载波,以期避免由逐次分配的非最优性导致的系统容量损失。理论分析和仿真结果表明,此算法能够在低复杂度的条件下得到近似最优解,在保证用户服务质量的同时,有效地提高了系统容量。

关键词 正交频分多址接入(OFDMA), 资源管理, 多用户分集, 子载波分配, 服务质量

0 引 言

如何通过无线资源管理提高正交频分多址接入(OFDMA)系统容量并保证用户的服务质量要求,一直是研究的热点。OFDMA 系统的资源分配主要包括动态子载波分配和自适应功率分配。早期的研究^[1]利用信道状态信息完成子载波和功率的联合分配,获得多用户分集增益^[2]以降低发送功率,但需要通过多次迭代才能获得最优解,具有很高的复杂度。^[3]在总功率约束的条件下,为了降低复杂度,将功率与子载波的联合分配问题分解为独立的功率分配和子载波分配两步,首先根据平均信噪比确定用户使用子载波的数量和功率,然后使用匈牙利算法^[4]完成最优的子载波分配,从而降低复杂度并获得接近^[1]中最优解的性能。但是,文献[5]指出,当信道矩阵维度增加时,匈牙利算法仍具有较高的复杂度。文献[6]假设 OFDMA 系统各子载波分配的功率相同,提出了一种次优的 max-max 算法用于替代匈牙利算法,在每一步的子载波分配中,计算每个用户所有子载波上的速率的最大值,并选择这些值中的最大值对应的用户分配最好的子载波,进一步降低了子载波分配的复杂度。文献[7]也使用了 max-max 算法求解子载波分配问题。文献[8]研究了当用户使用子载波数量具有限制条件时的分配问题,同样提出了 max-max 算法以降低复杂度。本文

提出了一种基于预期系统容量损失的分配算法,该法能够有效地降低复杂度,获得与匈牙利算法相近的性能,且优于 max-max 算法。该算法针对多载波系统设计,可推广应用于宽带卫星通信系统等多信道无线系统的资源分配中。

1 系统模型

本文研究的系统由一个使用全向天线的基站和 K 个单天线用户终端组成,下行链路采用 OFDMA 技术,共有 N 个子载波。基站和用户之间的信道是慢衰落频率选择性信道,用户 k 使用第 n 个子载波的接收信号方程是

$$Y_{k,n} = H_{k,n}X_{k,n} + W_{k,n} \quad (1)$$

其中, $X_{k,n}$ 、 $Y_{k,n}$ 、 $W_{k,n}$ 和 $H_{k,n}$ 分别是第 k 个用户在第 n 个子载波上的基站发送信号、终端接收信号、接收机噪声和信道复增益。假定在每个时隙开始前,基站通过用户反馈可以获得下行链路的当前信道状态信息,即信道复增益 $H_{k,n}$ 。基站发送总功率为 P_T 时,基于平均分配功率的假设^[6,9],子载波 n 的功率 $p_n = \frac{P_T}{N}$, $\forall n$ 。用户 k 在子载波 n 上的信噪比为 $\gamma_{k,n} = \frac{|H_{k,n}|^2 p_n}{N_0 B_n}$, N_0 为信道的噪声功率谱密度, $B_n = B/N$ 为子载波带宽。引入由误码率决定的信噪比差额(SNR gap) $\Gamma = -\frac{\ln(5BER)}{1.5}$, 则相应的信道传

① 863 计划(2008AA01Z226)和国家自然科学基金(60462002)资助项目。

② 男,1979 年生,博士生;研究方向:无线网络资源管理;E-mail: shenjun@pku.edu.cn

③ 通讯作者, E-mail: yinacui@vip.sina.com
(收稿日期:2008-05-21)

输速率(bps/Hz)为

$$c_{k,n} = \log(1 + \frac{\gamma_{k,n}}{\Gamma}) \quad (2)$$

定义分配系数为 $\alpha_{k,n} \in \{0,1\}$, $\alpha_{k,n} = 1$ 表示将子载波 n 分配给用户 k 。由于每个子载波只能分配给一个用户使用,约束条件为

$$\sum_{k=1}^K \alpha_{k,n} = 1, \forall n \quad (3)$$

在 OFDMA 子载波分配问题中,用户通常存在基本速率要求,系统中用户的服务质量需求即为对用户基本传输速率的保证,用户 k 的需求可表述为

$$\sum_{n=1}^N \alpha_{k,n} c_{k,n} \geq r_k, \forall k \quad (4)$$

其中, r_k 是用户的基本速率要求。式(4)表述了用户 k 在所获得分配的子载波上的总速率应当大于其要求的基本速率,但该式不能直观地描述用户对子载波数量的需求情况。为了简化式(4),由文献[3]中的方法,可根据速率要求 r_k 以及用户 k 在所有子载波上的平均速率估算所需的子载波数 R_k 为

$$R_k = \frac{Nr_k}{\sum_{n=1}^N c_{k,n}} \quad (5)$$

由此,式(4)可简化为用户对子载波数量的要求:

$$\sum_{n=1}^N \alpha_{k,n} \geq R_k, \forall k \quad (6)$$

综合上述分析,OFDMA 系统在下行链路基站总功率为 P_T 和平均分配功率的条件下的子载波分配问题可以表述为:基站根据用户反馈的信道状态信息 $H_{k,n}$ 分配子载波,在满足用户服务质量的基础上使系统容量最大,即

$$\max_{\alpha_{k,n}} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \alpha_{k,n} c_{k,n} \quad (7)$$

相应的约束条件由式(3)和式(6)表示。

2 基于预期容量损失的 OFDMA 子载波分配算法

对于 OFDMA 系统子载波分配的最优化问题,可用匈牙利算法通过对所有子载波进行联合分配获得最优解,在满足用户服务质量的同时实现系统容量的最大化。在子载波的联合分配过程中,需要进行多次迭代以确定最优方案,造成算法的复杂度很高,不利于实际应用。

针对匈牙利算法复杂度高的问题,本文将所有子载波的联合分配拆分为逐个子载波分配,每次完

成单个子载波在本次分配过程中的最佳分配,以降低复杂度。在子载波的逐次分配过程中,由于用户都具有获得最好子载波的倾向,当一个子载波同时是两个或多个用户的最好信道时,为了满足约束条件,以预期容量损失作为分配原则以避免冲突,对于预期损失最大的用户,优先为其分配信道最好的子载波以避免较大的损失。

预期容量损失由用户在不同子载波上的信道增益决定。在频率选择性信道上,同一用户在不同子载波上的信道特性不同,对于某些用户,可能具有多个信道增益较为接近最好信道的子载波,而对于另外一些用户,则可能除了只有少数几个条件较好的子载波外,大部分子载波都较差。很明显,前一类用户相对于后一类用户在子载波的选择上具有更大的自由度。在一次分配中,如果能够合理地利用这种自由度,将为系统容量带来明显的增益;而如果忽视这种选择上的自由度,将后一类用户最好的子载波分配给了前一类用户,那么后一类用户只能在下次分配获得较差的子载波,这必然会给系统容量造成较大损失,使两次分配的综合效果不能达到最佳。这种由当前分配对后续分配的影响而造成的损失即可定义为一次分配的预期容量损失。如果一个用户在一次分配中没有获得最好的子载波,那么在下次分配时,该用户的最好分配结果是获得次好的子载波,用户在这两个子载波上的速率差值即可作为衡量本次分配预期的系统容量损失。

本文提出的基于预期容量损失的 OFDMA 子载波分配算法(下称差值算法)的具体流程如下:

步骤 1 初始化待分配用户集合 K ,待分配子载波集合 N ,以及由式(2)决定的 $c_{k,n}$ 构成的速率矩阵 C 。

步骤 2 对速率矩阵 C 的每一行 k 选择该行最大和次大值对应的子载波 n_1 和 n_2 ,相应的速率为 c_{k,n_1}, c_{k,n_2} , 计算差值 $d_k = c_{k,n_1} - c_{k,n_2}, \forall k$ 。

步骤 3 选择 $k^* = \arg \max_k d_k$, 分配给用户 k^* 的子载波为 $n^* = \arg \max_n c_{k^*,n}$, 分配系数 $\alpha_{k^*,n^*} = 1$ 。

步骤 4 从待分配子载波集合中消去已分配子载波 $N = N - \{n^*\}$, C 矩阵中删去已分配的列 n^* 。如果用户 k^* 已获得满足其需求的子载波数, $\sum_{n=1}^N \alpha_{k^*,n} = R_{k^*}$, 则删除行 k^* ,并更新待分配用户集合 $K = K - \{k^*\}$;如果 $K = \emptyset$,执行步骤 5,否则,返回步骤 2。

步骤 5 如果存在剩余子载波 $n \in N$, 按贪婪算法分配给在该子载波上容量最大的用户, $k^* = \arg \max_k c_{k,n}, \alpha_{k^*,n} = 1$, 算法结束。

在算法的复杂度方面, 由于匈牙利算法要求处理的是 $N \times N$ 方阵, 即用户数等于子载波数, 为了使匈牙利算法、差值算法和文献[6,8]中的 max-max 算法具有可比性, 本文分析算法在用户数与子载波数都为 N 时的复杂度。此时, 最优的匈牙利算法的复杂度为 $O(N^3)$ [4,10]。差值算法在每一步的分配中选择最大和次大值并计算差值, 算法结束后, 等价于对每个用户在所有子载波上的速率作了排序, 对单个用户的排序开销为 $N \log_2 N$, 对 N 个用户的开销为 $N^2 \log_2 N$ 。在分配过程中, 当剩余用户数为 k 时, 差值算法在 k 个差值中选择最大值, 需要 $k-1$ 步操作, 开销为 $(N-1)N/2$, 与排序开销相比可忽略。差值算法的总复杂度为 $O(N^2 \log_2 N)$, 明显小于匈牙利算法。max-max 算法在每一步的分配中, 计算每个用户在所有子载波上的最大值, 并选择这些值中的最大值对应的用户分配最好的子载波, 也等价于对每个用户在所有子载波上的速率做了一次排序, 对 N 个用户 N 个子载波的情况, 复杂度与差值算法相同, 为 $O(N^2 \log_2 N)$ 。

3 仿真结果

仿真中使用的系统环境是单蜂窝 OFDMA 系统的下行链路, 信道采用文献[11]中的 COST 259 典型城区模型的 20 径模型, 平均信噪比为 10dB, 算法在系统容量上的性能用平均每个子载波上的速率(bps/Hz)来衡量。仿真中比较了本文提出的差值算法(d-value)、匈牙利算法(Hungarian)和 max-max 算法的性能。仿真结果如图 1 与图 2 所示。

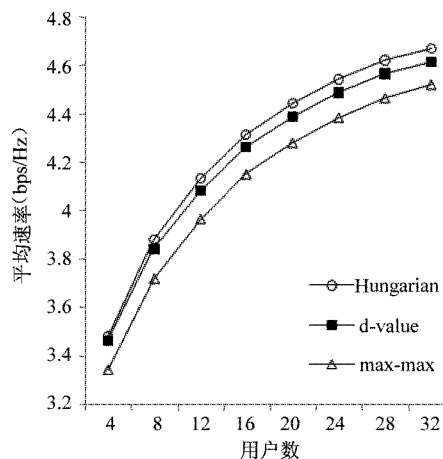


图 1 用户数与可用子载波数保持相等时的系统容量 ($R_k = 1$)

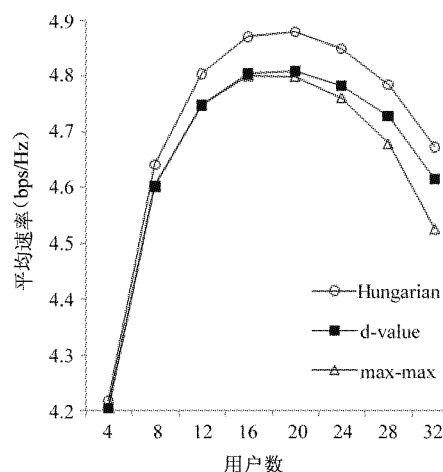


图 2 子载波数固定为 32 时的系统容量 ($R_k = 1$)

图 1 中, 用户数与可用子载波数相等, 任意用户 k 对子载波数分配的需求为 $R_k = 1$, 系统的容量随用户数和可用子载波数的增加而提高, 体现了多用户分集的效果。在各个仿真点上, 差值算法达到的平均速率均高于 max-max 算法。在子载波数和用户数为 32 时, 匈牙利算法、差值算法和 max-max 算法三者的平均速率分别是 4.6732、4.6160 和 4.4967, 差值算法与 max-max 算法分别是匈牙利算法的 98.8% 和 96.2%。相比于匈牙利算法, 差值算法不仅有效地降低了算法复杂度(对于 $N = 32$, 匈牙利算法与差值算法的复杂度之比为 $N^3/N^2 \log_2 N = 6.4$), 且在系统容量上损失较小, 为 1.2%, 而 max-max 算法的损失为 3.8%。

差值算法与 max-max 算法两者具有相同的复杂度, 但差值算法达到的系统容量高于 max-max 算法, 其中的原因是: max-max 算法同样采用逐次分配的方式分配子载波, 其分配原则是在每次分配过程中, 选择速率矩阵中速率最高的用户-子载波组合, 但不考虑当前分配对后续分配的影响。对于仅拥有少量较好子载波的用户, 由于需要同其它用户竞争, 有可能只能分配到很差的子载波。差值算法则充分利用了用户在不同子载波上的信道的差异特性, 将子载波优先分给在不同子载波上信道增益差异显著的用户, 尽管每次分配的结果不一定最佳, 但多次分配的综合效果避免了系统容量的较大损失, 从而获得了比 max-max 算法更好的性能。

图 2 中, 可用子载波数为 32, 任意用户 k 对子载波数分配的需求为 $R_k = 1$ 。用户数较少时, 大部分子载波可以没有任何限制地分配给在该子载波上信道条件最好的用户, 随着用户数的增多, 这些自

由分配的子载波可选择用户范围扩大,有效地提高了这些子载波上的容量,曲线的上升趋势体现了多用户分集效果。但随着用户数的进一步增多,在保证每个用户使用子载波数的基本要求后,由于系统资源有限,可自由分配给信道条件最好的用户的子载波数量减小,导致系统性能下降。

差值算法在用户数较少时与 max-max 算法具有比较接近的性能,随着用户数的增加,差值算法体现出更好的性能。这是因为用户数越多,用户之间信道特性的差异就显著,差值算法能够更好地利用这种差异特性来提高系统容量。

4 结 论

本文研究了 OFDMA 系统的子载波分配问题,提出了基于预期容量损失的 OFDMA 系统子载波分配算法。该算法将子载波的联合分配分解为逐次分配,降低了复杂度;通过利用多用户频率选择性信道的特性,将用户在不同子载波上的速率差值作为每次分配中预期性能损失的度量,降低了由于逐次分配的非最优性导致的系统容量损失,算法性能优于 max-max 算法,接近于最优解。综合来看,该算法的性能由两部分因素决定:多用户分集带来的性能增益和为降低复杂度简化算法而带来的性能损失,因而该算法能够有效地实现性能和复杂度的折衷,提高 OFDMA 系统在保证用户服务质量要求下的资源分配效率。

参考文献

- [1] Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(10): 1747-1758
- [2] Knopp R, Humblet P A. Information capacity and power control in single-cell multiuser communications. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Seattle, WA, USA, 1995. 331-335
- [3] Yin H, Liu H. An efficient multiuser loading algorithm for OFDM-based broadband wireless systems. In: Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, San Francisco, CA, USA, 2000. 103-107
- [4] Hungarian Algorithm. http://en.wikipedia.org/wiki/Hungarian_Algorithm, 2007
- [5] Ying P, Armour S M D, McGeehan J P. An investigation of dynamic subcarrier allocation in MIMO-OFDMA systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(5): 2990-3005
- [6] Zhang Z, He Y, Chong E K P. Opportunistic downlink scheduling for multiuser OFDM systems. In: Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, New Orleans, LA, USA, 2005. 1206-1212
- [7] Zhang Z, He Y, Chong E K P. Opportunistic scheduling for OFDM systems with fairness constraints. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2008
- [8] Choi Y J, Bahk S. Multichannel wireless scheduling under limited terminal capability. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(2): 611-617
- [9] Jang J, Lee K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(2): 171-178
- [10] Zhang Y J, Letaief K B. Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(5): 1566-1575
- [11] Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) Deployment Aspects. 3GPP TR 25.943 Version 7.0.0 Release 7. France: European Telecommunications Standards Institute, 2007. 7

An OFDMA subcarrier allocation algorithm based on estimated difference value

Shen Jun, Yi Na, Jiang Wei, Xiang Haige

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

An estimated difference value based subcarrier allocation algorithm is proposed for orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) networks to minimize the capacity loss. The joint subcarrier allocation procedure is divided into multi-step allocation to reduce the complexity. By utilizing the characteristic of multiuser frequency selective channel and considering the impact on the next step's allocation, the algorithm allocates subcarriers to the users with high estimated capacity loss. The analysis and simulation results demonstrate that the proposed algorithm can achieve near optimal solution with lower complexity compared with the optimal Hungarian algorithm. It can well balance performance and complexity and effectively improve system capacity.

Key words: orthogonal frequency division multiple access (OFDMA), resource management, multiuser diversity, subcarrier allocation, quality of service