

正交频分多址系统中最低速率限制下的 自适应载波分配

吕刚明, 朱世华, 种稚萌

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对用户有最低传输速率要求的正交频分多址系统中, 传统资源分配算法频谱利用率低的问题, 提出了一种自适应载波分配算法. 该算法根据用户最低传输速率的要求、信道状态和当前载波分配状况, 确定子载波分配给用户的效用, 进而将子载波分配给可以带来最大效用的用户. 该算法综合考虑了效率和公平性, 从而显著改善了系统性能. 仿真结果表明, 当用户数不超过系统负载时, 与效率和公平分开考虑的算法相比, 所提出的算法频谱效率可提高 10%, 系统负载在同样中断概率下可提高 60%.

关键词: 正交频分多址; 自适应载波分配; 最低传输速率

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)02-0222-04

Adaptive Sub-Carrier Allocation for Orthogonal Frequency Division Multiple Access Systems with Minimum Transmission Rate Request

LU Gangming, ZHU Shihua, ZHONG Zhimeng

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Focusing on the problem that traditional resource allocation algorithms result in low spectrum efficiency, an adaptive sub-carrier allocation algorithm was proposed for orthogonal frequency division multiple access systems with minimum transmission rate request. In the algorithm, the utility value of each sub-carrier that can be achieved by different users is first evaluated based on users' minimum transmission rate request, the channel state and the current sub-carrier allocation state. Then, the sub-carrier is allocated to the user, who can achieve the maximum utility value. As both efficiency and fairness are taken into account in the algorithm, the performances of the system are improved remarkably. Simulation results show that, compared with algorithms which consider efficiency and fairness separately, when the number of users is within the system load, the frequency efficiency of the proposed algorithm increases by 10% and the system load within the same range of outage probability increases by 60%.

Keywords: orthogonal frequency division multiple access; adaptive sub-carrier allocation; minimum transmission rate

正交频分多址(OFDMA)是一种基于正交频分复用的多址接入技术, 在正交频分多址系统中, 用户不仅可以自适应地选择最佳子载波进行传输, 而且可以动态分配每个子载波上的发射功率和比特

数^[1-2]. 众多研究表明, 在正交频分多址系统中, 通过对载波、比特以及功率的自适应分配, 可以显著地提高系统性能^[3-7].

在一些实际应用中, 系统需要保证用户的最低

传输速率以满足实时性要求. 文献[4]针对最低传输速率限制下最小化系统总发射功率的问题,提出了一种自适应载波、比特和功率分配算法,该算法可以显著提高功率效率,但复杂度很高^[8]. 文献[5]以最大化系统总传输速率为目标,通过将原问题分为两步求解,大大降低了复杂度,但缺乏公平性. 文献[6-7]研究了利用效用函数进行自适应资源分配的理论框架和算法,但对具有实时性要求的业务仍未提出解决方案.

本文提出一种基于动态效用函数的自适应载波分配算法,目标是在用户最低传输速率限制下,最大化系统总传输速率. 算法通过综合考虑用户传输速率要求、当前信道状态和资源分配状况来确定子载波分配方案,在增加少量复杂度的情况下,能显著降低用户中断概率并提高系统频谱利用率.

1 系统模型

考虑一个带宽为 W 、子载波数为 N 的单小区下行 OFDMA 系统,现有 K 个用户需要与基站通信,用户 k 的最低传输速率要求为 R_k^{req} . 假设基站已知信道状态信息,且在一个调度周期内信道保持不变, $p_{k,n}$ 和 $c_{k,n}$ 分别表示用户 k 在子载波 n 上的发射功率和传输比特数,在固定误码率时, $p_{k,n}$ 和 $c_{k,n}$ 满足如下关系

$$c_{k,n} = f(R_k^{\text{FE}}, p_{k,n}, g_{k,n}) \quad (1)$$

式中: R_k^{FE} 为用户 k 的误码率需求; $g_{k,n}$ 为用户 k 在载波 n 上的信道增益,定义如下

$$g_{k,n} = -L_p(d_k) - X_k^q + 10\lg(|h_{k,n}|^2) \quad (2)$$

其中 $L_p(\cdot)$ 表示路径损耗, d_k 是用户 k 与基站间的距离, X_k^q 是用户 k 上的对数正态衰落,标准差为 σ , $|h_{k,n}|^2$ 是用户 k 在子载波 n 上的多径衰落. 定义 $I_{k,n}$ 为载波分配指示因子,若 $I_{k,n}=1$,表示子载波 n 被分配给用户 k , $I_{k,n}=0$,则表示子载波 n 不分配给用户 k . 由于同一个载波只能分配给一个用户,因此若 $I_{k_0,n}=1$,则对任意 $k \neq k_0$ 均有 $I_{k,n}=0$.

根据以上假设,用户 k 的传输速率和系统总传输速率可以分别表示为

$$R_k = \frac{W}{N} \sum_{n=1}^N I_{k,n} c_{k,n} \quad (3)$$

$$T = \sum_{k=1}^K R_k = \frac{W}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N I_{k,n} c_{k,n} \quad (4)$$

2 自适应载波分配算法

本文的目标就是寻找最优的分配矢量 $\mathbf{I} =$

$\{\mathbf{I}_{k,n}\}$, $\mathbf{C} = \{c_{k,n}\}$, $\mathbf{P} = \{p_{k,n}\}$,使系统在尽量满足用户最低传输速率要求的条件下,总传输速率达到最大. 这样,资源分配问题可描述为下面的最优化问题

$$\max_{\mathbf{I}, \mathbf{C}, \mathbf{P}} \frac{W}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N I_{k,n} c_{k,n} \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} R_k = \frac{W}{N} \sum_{n=1}^N I_{k,n} c_{k,n} \geq R_k^{\text{req}} \quad \forall k \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N I_{k,n} p_{k,n} \leq P_{\text{total}} \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K I_{k,n} \leq 1 \quad \forall n \quad (8)$$

上述最优化问题是一个带约束的非线性整数规划问题,难以通过常规的规划算法求解,并且由于无线信道的时变性和发射功率的限制,可能不存在满足条件式(6)的解,若将一个用户在一个调度周期内没有得到满足记作一次中断,此时问题转化为使系统中断概率尽量小的前提下最大化系统总传输速率. 以此为目标,文献[5]中提出一种两步式算法:

(1)不考虑约束条件式(6),将每个子载波分配给能传输最多比特数的用户;

(2)考虑约束条件式(6),对部分子载波重新分配,将高速率用户占用的多余子载波在不影响其本身满意的情况下,重新分配给尚未满足最低速率要求的用户.

考虑到在采用自适应速率分配的系统中,固定功率分配引起的容量损失可以忽略^[6-7],因此文献[5]采用等功率分配方法. 虽然文献[5]的算法可显著降低系统中断概率并提高系统频谱利用率,但由于总是首先将载波分配给信道好的用户,因此导致信道差的用户发生中断的概率高,这对信道差的用户缺乏公平性,并且由于信道差的用户较难找到相对好的子载波,若这样的子载波恰好被占用,在保证该用户的服务质量时就需要更多的资源,导致多用户分集性能降低. 本文提出基于效用的资源分配算法,改进了这一问题,进一步提高了系统性能.

在综合分析资源分配的目标,以及影响资源分配的各种因素后,本文定义如下效用函数,表示将子载波 n 分配给用户 k 的效用

$$U(k,n) = \frac{(1 + \exp(-5(\gamma_k - 1)))c_{k,n}}{G_k + a\gamma_k} \quad (9)$$

式中: $\gamma_k = \min\left(\frac{R_k}{R_k^{\text{req}}}, 1\right)$ 表示用户 k 的满意度; $G_k =$

$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g_{k,n}$ 是用户 k 的平均信道增益; $a \gg 1$ 是一个较

大的常数,用来结合 γ_k 随着用户满意度的变化调节用户的优先性. 分析可知,该效用函数具有以下特性:

(1)分子的 $1+\exp(-5(\gamma_k-1))$ 项表明,载波 n 分配给用户 k 带来的效用随用户 k 的满意度 γ_k 动态改变,当 γ_k 较小时效用大,而 γ_k 较大时则效用小,从而使离目标速率远的用户具有相对的优先性;

(2)分子的 $c_{k,n}$ 项表明,子载波 n 分配给用户 k 的效用随用户在该子载波上的信道增益而改变,信道增益越大效用越大,则用户获得该载波的可能性就越高. 这一特性使各子载波总是被分配给信道增益较大的用户,从而获得多用户分集增益;

(3)考察系数 $\frac{1}{(G_k+a\gamma_k)}$, 当 γ_k 较小时,系数的取值主要由平均信道增益决定,此时平均信道差的用户具有优先性,这样做可使信道差的用户优先选到相对较好的子载波. 随着 γ_k 增大直到 1, 平均信道增益的影响越来越小,优先性逐渐向信道好的用户转移. 此时,信道差的用户已经难以选到较好的子载波,而将子载波分配给信道好的用户则可显著提高传输速率. 极端情况下,当所有用户都满意时,资源分配退化为速率最大化(MSR)算法^[3],从而最充分地利用多用户分集.

本文的自适应载波分配算法就是基于式(9)所定义的效应函数. 首先,将功率在各载波间平均分配,根据用户在各载波上的信道状态信息,通过式(1)计算用户在各载波上可能传输的最大比特数. 然后,在未分配的子载波与用户之间寻找一个最佳配对 $(k^*, n^*) = \arg \max_{k,n} U(k, n)$, 并将载波 n^* 分配给用户 k^* . 最后,在所有载波分配完毕后,再按照文献[5]算法进行重分配以进一步保证用户最低传输速率的要求. 算法可以通过下面的步骤实现:

(1)初始化, $I_{k,n}=0, \gamma_k=0, R_k=0, p_{k,n}=\frac{p_{\text{total}}}{N}$, 计算 $c_{k,n}, W=\{1, 2, \dots, N\}$;

(2)若 $W=\phi$, 则结束初始分配,转步骤(5)进行重分配,否则继续;

(3)寻找 $(k^*, n^*) = \arg \max_{k,n} U(k, n), k=1, \dots, K, n \in W$, 并将子载波 n^* 分配给用户 k^* , 即 $I_{k^*, n^*}=1$;

(4)更新用户实际分配到的速率 $R_k^* = R_k + c_{k^*, n^*}$, 更新 $\gamma_k^* = \min\left(\frac{R_k^*}{R_k^{\text{req}}}, 1\right), W=W-\{n^*\}$, 回到步骤(2).

(5)重分配,步骤如下:① $W=\{1, 2, \dots, N\}, k=1$; ② 若 $R_k > R_k^{\text{req}}$, 则 $k=k+1$, 否则寻找 $n' = \arg \min_n \left(\frac{c_{k,n}^* - c_{k,n}}{c_{k,n}} \right), \forall n \in W$, 其中 k_n^* 表示在首次分配中获得载波 n 的用户; ③ 若重分配载波 n' 不改变原用户的满意度, 即 $R_{k_{n'}}^* - c_{k_{n'}, n'} \geq R_{k_{n'}}^{\text{req}}$, 则执行重分配, 即 $I_{k,n'}=1, I_{k_{n'}, n'}=0$, 更新 $R_k = R_k + c_{k,n'}, R_{k_{n'}} = R_{k_{n'}} - c_{k_{n'}, n'}$, 并回到步骤②, 否则, $W=W-\{n'\}$; ④ 若 $W=\phi$, 则结束重分配, 否则回到②.

3 仿真结果及分析

假设小区半径为 1 km, 系统带宽 $W=5$ MHz, 子载波数 $N=128$. 用户在每个子载波上的信道仿真为准静态平坦瑞利衰落信道, 且在一个资源分配周期内信道保持不变, 并且不失一般性, 假设用户在各子载波上的信道增益相互独立, 用户在小区内随机均匀分布, 各用户最低传输速率要求 $R_k^{\text{req}}=0.8$ Mb/s, 误码率要求 $R_k^{\text{EC}}=10^{-6}$, 路径损耗模型 $L_p(d)=128+35\lg(d/1000)$, 对数阴影衰落标准差 $\sigma=8$ dB. 仿真中效用函数的 a 值取为 10^6 . 对本文算法、文献[5]算法、文献[7]算法, 以及采用自适应调制编码的 OFDM-TDMA 算法^[4]进行了仿真, 比较了 4 种算法在不同发射功率和用户数下频谱效率和中断概率的性能, 仿真结果如图 1、图 2 所示. R_{WSN} 表示不考虑快衰落和阴影衰落时小区边缘处的接收信噪比^[8].

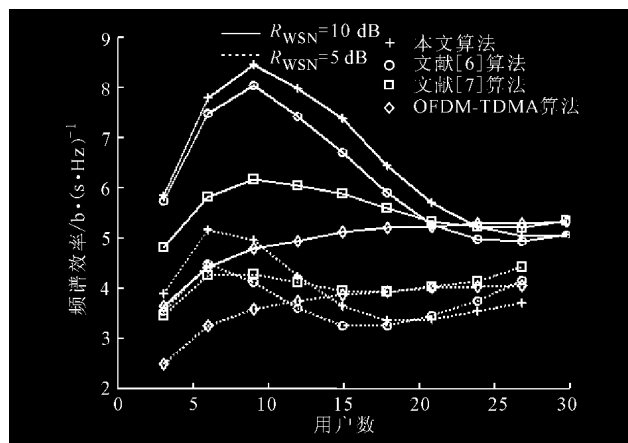


图1 系统频谱效率随用户数变化的曲线

由图 1 可以看出, 在用户数较小时, 3 种动态分配算法的频谱效率显著高于采用固定分配的 OFDM-TDMA 算法, 并且都随着用户数的增加而提高, 这是由于多用户分集增益的结果. 然而, 当用户数超过一定数量后, 动态分配算法的频谱效率反

而降低,这是由于动态分配算法需要尽量保证每个用户

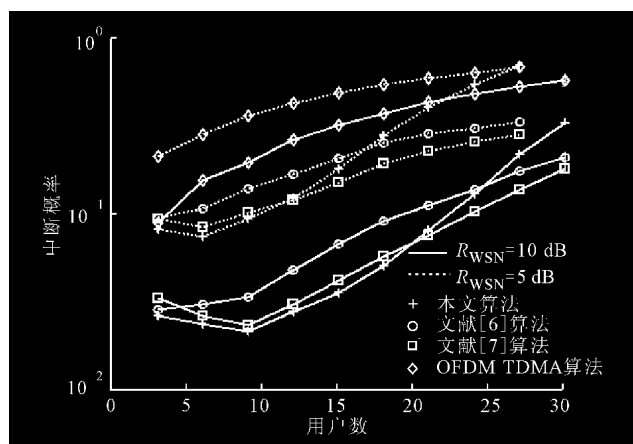


图2 系统中中断概率随用户数变化的曲线

的最低传输速率需求,从而导致多用户分集增益减小,但此时3种动态分配算法的中断概率远低于OFDM-TDMA算法。此外,在 R_{WSN} 为10 dB、用户数为15时,本文所提算法的频谱效率分别比文献[5]算法和文献[7]算法提高了10%和25%左右,验证了前文的分析,即文献[5]算法存在一定的分集增益损失,而文献[7]算法由于仅考虑用户在传输速率上的公平性,在频谱效率性能上必定有所下降。

由图2可以看出,当用户数较少时,本文所提算法可以明显降低系统中中断概率,也就意味着系统可以为更多的用户提供服务。以 $R_{WSN}=10$ dB、中断概率为 4×10^{-2} 时为例,文献[5]算法只能为10个用户同时提供服务,而本文所提算法则可同时为16个用户服务,系统负载提高了近60%,文献[7]算法也具有较低的中断概率,体现了效用函数在提高资源分配公平性上的优点。

结合图1和图2,当系统中用户数较少时,本文所提算法综合了文献[5]和文献[7]两者的优点,在频谱效率和中断概率性能上均有显著改善,但是当用户数超过一定数量后,本文所提算法的性能会逐渐恶化。这是由于当用户数超过系统负荷后,文献[5]算法和文献[7]算法会放弃为信道差的用户服务,而本文算法仍然在所有用户间寻求公平的资源分配,从而导致频谱效率和中断概率性能都下降。因此,本文所提算法需要与接入控制算法一起应用,通过接入控制协议控制系统中的用户数,以保证算法的性能。此外,文献[5]算法的复杂度为 $O(3KN+2N^2)$,而本文所提算法的复杂度为 $O(KN^2+2N^2)$,

比文献[5]算法的复杂度略高。

4 结 论

本文针对OFDMA下行链路,提出一种自适应载波分配算法。该算法通过综合考虑用户的服务质量要求、信道状态和资源分配状态来决定载波分配,克服了效率和公平不能兼顾的问题,在两方面性能上都取得了优化。与文献[5]相比,本文算法不仅可以提高系统频谱利用率,并且可以显著降低系统的中断概率,从而提高系统负载。

参考文献:

- [1] KELLER T, HANZO L. Adaptive multicarrier modulation: a convenient framework for time-frequency processing in wireless communications [J]. IEEE Proceedings, 2000, 88(5): 611-640.
- [2] ROHLING H, GRUNHEID R. Performance comparison of different multiple access schemes for the downlink of an OFDM communication system [C] // Proc IEEE Vehicular Technology Conference, Piscataway, USA: IEEE, 1997:1365-1369.
- [3] JIANG J, LEE K. Transmit power adaptation for multiuser OFDM Systems [J]. IEEE JSAC, 2003, 21(2): 171-178.
- [4] WONG C, CHENG R, LETAIEF K, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation [J]. IEEE JSAC, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [5] ZHANG Y, LETAIEF K. Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2004, 13(5):1566-1575.
- [6] SONG Guocong, LI Ye. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-part I: theoretical framework [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2005, 4(2):614-624.
- [7] SONG GUOCONG, LI Ye. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks:part II: algorithm development [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2005, 4(2):625-634.
- [8] KIVANC D, LI Guoqing, LIU Hui. Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2003, 2(6):1150-1158.

(编辑 刘杨)