



优化公平性的多用户 OFDM 系统下行链路资源分配算法

汤丽梅¹, 曹海燕¹, 李 君², 谢时场¹

(1. 杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018;

2. 中国计量学院信息工程学院 杭州 310018)

摘 要:研究了优化公平性的多用户 OFDM 系统下行链路的资源分配算法,根据系统各用户的业务需求,在保证用户所得数据速率满足一定比例以及系统总功率限制的前提下,提高系统总数据速率。首先,根据公平性原则进行用户的子载波分配,子载波功率分配使用注水算法;子载波分配完成后,利用贪婪功率分配算法,以最大化用户数据速率和提高功率利用率为目标,对各用户内部子载波功率和比特数进行再分配。仿真结果表明,相比参考文献[10]的算法,该算法在提高系统总速率的同时,更好地保证了用户数据速率的公平性;相比参考文献[12]的算法,该算法虽然牺牲了一定的系统总速率,但能提供更高的用户数据速率公平性。

关键词: OFDM; 公平性; 数据速率; 子载波; 功率

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015296

Resource Allocation Algorithm for the Downlink of Multi-User OFDM System with Optimized Fairness

Tang Limei¹, Cao Haiyan¹, Li Jun², Xie Shiyi¹

(1. College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A resource allocation algorithm for the downlink of multi-user OFDM system with optimized fairness was studied. Firstly, assign the subcarriers to users with the constraint on proportional fairness and the water-filling algorithm was used in this process for the power allocation of each subcarrier. Then update the bits and power for each subcarrier of all the users using greedy power allocation to achieve higher data rates and power efficiency. Simulation results show that the proposed algorithm improves the capacity of the system while ensuring the performance of fairness better compared with the algorithm in[10]. To[12], the fairness is considerable improved with a little loss of capacity.

Key words: OFDM, fairness, data rate, subcarrier, power

收稿日期:2015-06-24;修回日期:2015-10-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61501158),浙江省自然科学基金资助项目(No. GK140901208048)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61501158),The National Natural Science Foundation of Zhejiang (No. GK140901208048)

论文引用格式:汤丽梅,曹海燕,李君等. 优化公平性的多用户 OFDM 系统下行链路资源分配算法. 电信科学, 2015296

Tang L M, Cao H Y, Li J, *et al.* Resource allocation algorithm for the downlink of multi-user OFDM system with optimized fairness. Telecommunications Science, 2015296

1 引言

正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术是 4G 的核心技术,也是目前无线通信的热门技术之一。目前,人们对无线通信系统越来越高的数据速率以及通信质量的要求,使得如何在有限的无线资源和恶劣的无线信道条件下有效地利用无线通信资源,成为无线通信领域的研究热点问题之一。

OFDM 系统资源分配算法主要有两大类:一类是在满足最小总用户数据速率要求的情况下,最小化系统总的传输功率,称为余量自适应(margin adaptive, MA)算法^[1,2];另一类是在每个用户的最小数据传输速率、总的传输功率和误比特率(BER)等条件限制下,最大化系统总的传输速率,称为速率自适应(rate adaptive, RA)算法^[3-8]。本文主要研究的是优化用户数据速率公平性的 RA 算法,即在更好地满足用户速率比例以及系统总功率限制的条件下,最大化系统容量。

参考文献[3]研究了功率和 BER 条件限制下的 RA 算法,但未考虑公平性问题。在参考文献[4]中公平性得到了一定体现,算法保证了各个用户能够取得最小的数据速率。首先用一种贪婪算法确定分配给各用户的子载波数目以及功率大小,再利用 Hungarian 算法进行子载波分配。参考文献[5]提出了一种满足用户最小速率需求且计算量少的算法:首先假设各个用户发射功率相同,按比例分配子载波,然后按照各用户的最小速率要求,确定其最小发射功率,最后根据总功率以及用户所需最小发射功率,最大化系统容量。仿真结果表明,该算法提高了系统数据传输速率,能取得接近最优的发射功率,能量使用效率高,且算法能够快速分配子载波和功率,满足无线通信实时性的要求。

参考文献[6]研究了在满足严格的用户速率比例限制条件下,如何得到最大总数据速率,但该算法包含的功率分配涉及同时解多个非线性方程,这就使得算法复杂度太高。参考文献[7]提出了一种放宽严格的用户数据速率比例限制的非迭代算法。该算法先进行子载波的分配,再在子载波分配已知的条件下给各用户及各子载波分配功率。相比于参考文献[8]中所提出的寻根法,该算法放弃了高信噪比的子信道限制,复杂度大大降低,并能得到较高的用户数据速率。

参考文献[9]中算法分为子载波分配和功率分配两步。

其中,子载波分配方法是首先在信道容量矩阵中将信道容量最好的子载波进行分配,功率分配采用注水算法。虽然极大地提高了用户数据传输速率,但却忽视了不同用户对数据速率的要求不同这一关键点。

参考文献[10]利用了参考文献[7]中的子载波分配方法,功率分配预先使用平均分配的方式,载波分配结束后再利用一种贪婪功率分配算法^[11]对各用户子载波的功率和比特数进行调整,充分利用各子载波的额外功率,在保证一定的用户速率公平性的同时,增加每个用户可传输的比特数。仿真结果表明,该算法能取得比参考文献[7]高的数据速率。

参考文献[12]采用了与参考文献[10]不同的子载波分配方法,利用了避免最差子载波(worst subcarrier avoiding, WSA)的方法^[13,14],将所有用户按各自的最差子载波信道增益从小到大排序,依次分配一个信道状态最好的子载波,循环执行该操作,直到各用户子载波数达到要求。子载波分配结束后,再进行功率预分配:各用户功率大小与该用户所分得子载波的总信道增益成正比,用户内部各子载波功率大小与该子载波的信道增益成正比。接下来再利用贪婪功率分配算法对各用户的子载波功率和比特数进行调整,以提高功率利用率以及比特数据速率。

参考文献[10,12]中的算法虽然提高了系统总数据速率以及功率利用率,但在一定程度上忽视了用户数据速率公平性的问题。本文提出的算法更加注重公平性,子载波分配结合了 WSA 算法并充分考虑了用户数据速率比例要求,不断赋予最不满足数据比例限制条件的用户优先选择子载波的权利。子载波分配过程中用户功率与该用户分配到的子载波数成正比,用户内部子载波的功率由注水算法求得。子载波分配结束后,再利用贪婪功率分配算法对各用户内部子载波的功率和比特数进行调整,提高功率利用率和传输比特数。

2 多用户 OFDM 系统下行链路模型

图 1 是多用户 OFDM 系统下行链路结构。假设系统有 K 个用户, N 个子载波,并且所有用户同在一个小区内,并假定各用户的信道状态信息(CSI)能够被执行资源分配任务的信号发送端准确掌握,从而寻求一种在 L 个 OFDM 符号时长内有效的资源分配方案。其中, L 是由瞬时信道变化和一个 OFDM 符号的持续时间决定的,在快速时变环境中 L 不能太大。

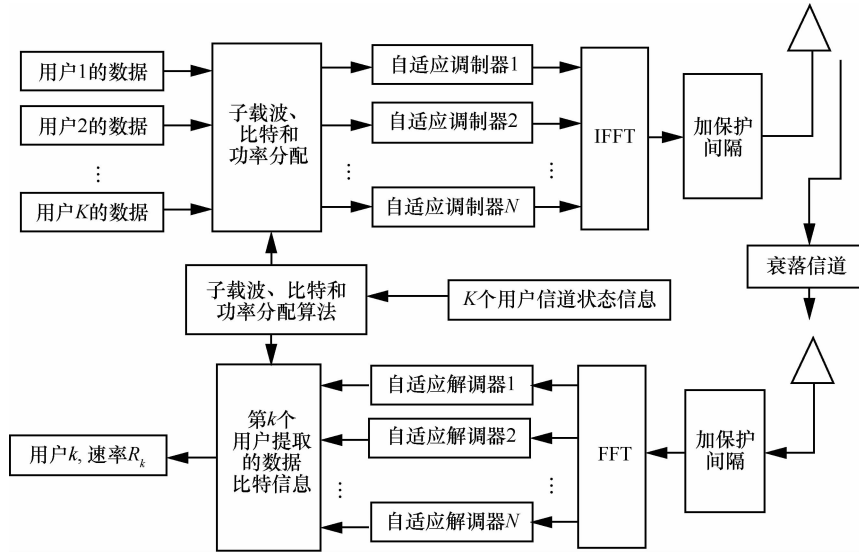


图1 包含子载波、比特和功率分配的多用户 OFDM 系统下行链路

在发送端, \$K\$ 个用户的串行数据进入子载波、比特和功率分配模块, 该模块将不同用户的数据分配到不同子载波上, 假设每个子载波的带宽远小于信道的相关带宽, 且所有用户的全部子载波的瞬时信道状态都通过一个独立的控制信道发送到发射机。利用这些信道状态信息, 发射机就可以使用联合子载波、功率和比特分配的算法为不同用户分配不同的子载波以及每个子载波上分配的功率和比特/OFDM 符号的数目。根据每个子载波上分配的比特数, 自适应调制器选择使用相应的调制方式。调制器的输出端输出的信号通过 IFFT 转换成时域的抽样值, 再利用时域抽样值的循环扩展作为保护间隔加在信号前端, 保证子载波之间的正交性。同时, 为了减少由于多径干扰造成的信道间干扰 (ICI), 要使保护间隔大于最大时延。

信号经过不同的衰落信道到达用户接收机。在接收机端, 首先去掉保护间隔来消除 ISI, 然后第 \$k\$ 个用户的时间抽样值输入 FFT 模块将其转换成调制符号。比特和子载波分配信息模块分别用来配置解调器和精确地解调第 \$k\$ 个用户的子载波上所携带的比特信息, 得到数据速率为 \$R_k\$ bit/OFDM 符号的用户数据。

3 多用户 OFDM 系统动态资源分配算法

参考文献[3,8]证明, 在一个多用户 OFDM 系统中, 如果每一个子载波被分配给该子载波上信道增益达到最大的用户, 并且使用注水算法给每个子载波分配功率^[4], 则该系统的总容量将达到最大, 这种算法称为贪婪算法。然而, 当各用户之间的路径损耗差异较大时, 具有较高信道增益

的用户将占用大部分的资源, 而那些具有低信道增益的用户则只能分配到少部分的资源。这样, 就使得部分用户的服务质量达不到要求, 需要寻求一种满足用户数据速率要求的最优算法。本文所研究的算法目标函数如下:

$$\max_{\omega_{k,n}, p_{k,n}} R_T = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \omega_{k,n} r_{k,n} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \omega_{k,n} \text{lb} \left(1 + \frac{\gamma_{k,n}}{I} \right) \quad (1)$$

$$(C1) \omega_{k,n} \in \{0, 1\}, \forall k, n$$

$$(C2) \sum_{k=1}^K \omega_{k,n} = 1, \forall n$$

$$\text{s. t. } (C3) p_{k,n} \geq 0, \forall k, n \quad (2)$$

$$(C4) \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \omega_{k,n} p_{k,n} \leq P_{\text{total}}$$

$$(C5) R_1 : R_2 : \dots : R_K = \alpha_1 : \alpha_2 : \dots : \alpha_K$$

其中, \$\omega_{k,n}\$ 为子载波分配参数, \$\omega_{k,n}=1\$ 表示子载波 \$n\$ 被分配给用户 \$k\$, 同一子载波不能同时被多个用户占用, 即对于 \$\forall k' \neq k\$, 都有 \$\omega_{k',n}=0\$。\$N_0\$ 为高斯白噪声 (AWGN) 的功率谱密度, \$N\$ 为子载波数, 则每个子载波上的噪声功率为 \$\sigma^2=N_0B/N\$。假设每个用户经历的衰落不相关, 用户 \$k\$ 在子载波 \$n\$ 上的信道增益为 \$g_{k,n}\$, 则相应的信道噪声比 (channel-to-noise ratio, CNR) 为 \$h_{k,n}=g_{k,n}^2/\sigma^2\$。第 \$k\$ 个用户数据通过子载波 \$n\$ 得到的信噪比 (SNR) 为 \$\gamma_{k,n}=p_{k,n}h_{k,n}/p_{k,n}\$ 表示用户 \$k\$ 为子载波 \$n\$ 分配的功率。当使用正方形 MQAM 与格雷编码联合调制时, 传输误码率为:

$$BER_{\text{MQAM}}(\gamma_{k,n}) \approx 0.2 \exp \left(\frac{-1.6\gamma_{k,n}}{2^{r_{k,n}} - 1} \right) \quad (3)$$

得到比特数:

$$r_{k,n} = \text{lb} \left(1 + \frac{\gamma_{k,n}}{\Gamma} \right) = \text{lb} \left(1 + \frac{p_{k,n} h_{k,n}}{\Gamma} \right) \quad (4)$$

其中, Γ 为信噪比差额, 反映了要达到某个速率理论上需要的信噪比和实际需要的信噪比之间的差异, 由目标 BER、编码增益和系统性能决定:

$$\Gamma = -\frac{\ln(5BER)}{1.6} \quad (5)$$

式(2)中(C4)表明系统总的传输功率限制为 P_{total} , 各用户得到的数据速率 R_k 要满足条件(C5)中的比例约束, 保证一定的用户速率公平性。

$$R_k = \sum_{n=1}^N \omega_{k,n} r_{k,n} = \sum_{n=1}^N \omega_{k,n} \text{lb} \left(1 + \frac{\gamma_{k,n}}{\Gamma} \right) \quad (6)$$

3.1 基于公平性的子载波以及功率分配

算法步骤如下。

(1)初始化: 子载波集 $\Omega = \{1, 2, \dots, N\}$, 用户 k 所占子载波集 $\Omega_k = \emptyset$, 用户 k 的数据速率 $R_k = 0$ 。

(2)预分配: 找出 K 个用户在所有子载波上信道增益的最小值, $h_k^{\min} = \min_{n \in \Omega} h_{k,n}$, 将用户按其最小子载波信道增益从小到大排序, 拥有最差子载波的用户具有优先选择一个最优子载波的权利。这样能够避免各用户分配到最差子载波, 提高了系统总数据速率。假设 $h_1^{\min} < h_2^{\min} < \dots < h_K^{\min}$, 则:

for $k = 1$ **to** K

$$n_k = \text{argmax}_{n \in \Omega} h_{k,n}$$

$$\Omega_k = \{n_k\} \cup \Omega_k, \quad \Omega = \Omega - \{n_k\}, \quad \omega_{k,n_k} = 1$$

$$R_k = \text{lb} \left(1 + \frac{(P_{\text{total}}/N) h_{k,n_k}}{\Gamma} \right)$$

end

(3)按公平性优先原则分配剩余子载波:

①当 $\Omega \neq \emptyset$ 时, 找出 $i = \text{argmin}_{i \in \{1, 2, \dots, K\}} R_i / \alpha_i$;

② $n_i = \text{argmax}_{n \in \Omega} h_{i,n}$, $\Omega_i = \{n_i\} \cup \Omega_i$, $\Omega = \Omega - \{n_i\}$, $\omega_{i,n_i} = 1$, $p_i = p_i +$

P_{total}/N ;

③ $R_i = \sum_{j \in \Omega_i} \omega_{i,j} \text{lb} \left(1 + \frac{p_{i,j} h_{i,j}}{\Gamma} \right)$, 其中, $p_{i,j} = \frac{1}{m_i}$

$\left(p_i + \sum_{j \in \Omega_i} \frac{1}{h_{i,j}} \right) - \frac{1}{h_{i,j}}$, 是由注水算法求得的分配给各子载波的功率, 注水总功率为 p_i , 是根据用户 i 当前分配的子载波数 m_i 决定的, 即 $p_i = P_{\text{total}} \cdot \frac{m_i}{N}$ 。

④若 $\Omega \neq \emptyset$, 返回①继续执行。

3.2 各用户内部的子载波功率和比特再分配

以上基于公平性的子载波与功率分配保证了一定的用户速率公平性, 在此基础上对各用户的子载波功率和比特数进行再分配, 以最大化用户数据速率。已知各用户分得的功率正比于其分配的子载波数, 各子载波功率和比特数再分配算法如下。

(1)计算误比特率为 P_b 时, 子载波利用 QAM 调制传输 m bit 信息所需要的 SNR, $\gamma_m^{\text{QAM}} = (2^m - 1) \cdot \Gamma$, $1 \leq m \leq M$, 其中 $\gamma_m^{\text{QAM}} = 0, m = 0$ 。

(2)计算用户 k 的各子载波每个 OFDM 符号所传输的信息比特数 $B_{k,n}$:

$$B_{k,n} = \begin{cases} \text{lb} \left(1 + \frac{p_{k,n} h_{k,n}}{\Gamma} \right) & , B_{k,n} < M \\ M & , B_{k,n} \geq M \end{cases} \quad (7)$$

(3)由注水算法分配给各子载波功率为 $p_{k,n}$, 则 SNR 为 $\gamma_{k,n} = p_{k,n} h_{k,n}$, $n \in \Omega_k$, 于是就可以产生额外功率,

$$p_{k,n}^{\text{extra}} = \begin{cases} \frac{\gamma_{k,n}}{h_{k,n}}, & \gamma_{B_{k,n}}^{\text{QAM}} = 0 \\ \frac{\gamma_{k,n} - \gamma_{B_{k,n}}^{\text{QAM}}}{h_{k,n}}, & 0 < \gamma_{B_{k,n}}^{\text{QAM}} \leq M \end{cases}, \text{可以将这部分功率}$$

收集起来, 得到 $p_k^{\text{extra}} = \sum_{n \in \Omega_k} p_{k,n}^{\text{extra}}$, 利用用户总的额外功率更新子载波的比特分配。

(4)各子载波功率变为 $p_{k,n} = p_{k,n} - p_{k,n}^{\text{extra}}$, 计算各子载波增加一个比特时需要多分配的功率,

$$p_{k,n}^{\text{up}} = \begin{cases} \frac{\gamma_{B_{k,n}+1}^{\text{QAM}} - \gamma_{B_{k,n}}^{\text{QAM}}}{h_{k,n}}, & 0 \leq B_{k,n} < M \\ +\infty, & B_{k,n} \geq M \end{cases}, \text{为代价最低者多分配 1 bit。}$$

while $p_k^{\text{extra}} \geq \min(p_{k,n}^{\text{up}})$ and $\min(B_{k,n} < M)$, $n \in \Omega_k$

$$j = \text{arg min}_{n \in \Omega_k} (p_{k,n}^{\text{up}})$$

$$B_{k,j} = B_{k,j} + 1, p_k^{\text{extra}} = p_k^{\text{extra}} - p_{k,j}^{\text{up}},$$

$$p_{k,j} = p_{k,j} + p_{k,j}^{\text{up}}$$

if $B_{k,j} < M$

$$p_{k,j}^{\text{up}} = \frac{\gamma_{B_{k,j}+1}^{\text{QAM}} - \gamma_{B_{k,j}}^{\text{QAM}}}{h_{k,j}}$$

else

$$p_{k,j}^{\text{up}} = +\infty$$

end

end

$$B_k = \sum_{n \in \Omega_k} B_{k,n}$$



3.3 算法公平性

引入参数指标 $F^{[14]}$ 来衡量算法公平性的好坏:

$$F = \frac{\left(\sum_{k=1}^K \frac{R_k}{\alpha_k} \right)^2}{K \sum_{k=1}^K \left(\frac{R_k}{\alpha_k} \right)^2}, \quad 0 \leq F \leq 1 \quad (8)$$

当所有用户所得数据速率比满足式(2)中的条件(C5) $R_1:R_2:\cdots:R_K=\alpha_1:\alpha_2:\cdots:\alpha_K$ 时, F 取最大值 1, 表明用户速率公平性最好; F 越小, 说明用户速率公平性越差。

4 仿真与性能分析

将本文算法与参考文献[10]中的 GPA 算法以及参考文献[12]中的 WSA 算法进行仿真比较。仿真参数如下: 系统带宽 $B=1$ MHz, 用户数 $K=2, 4, \dots, 24$, 子载波数 $N=512$, 总功率 $P_{\text{total}}=1$ W, 噪声功率谱密度 $N_0=1.156 \times 10^{-8}$, 误比特率 $BER=10^{-5}$, 采用瑞利衰落信道。

图 2 为 3 种算法在用户数分别为 $K=2, 4, \dots, 24$ 时各自得到的用户数据速率。可以看出, 本文算法取得的数据速率接近于 WSA 算法, 明显优于 GPA 算法。

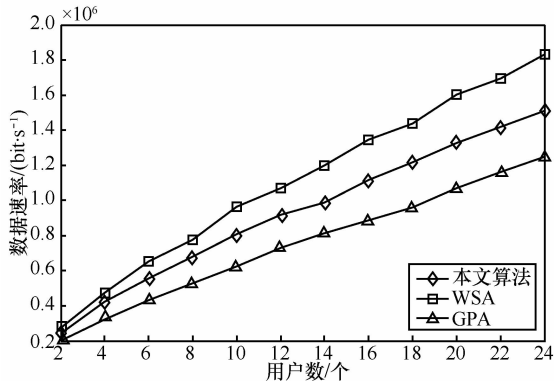


图 2 3 种算法在不同用户数时得到的用户数据速率的比较

图 3 为各算法在用户数分别为 $K=2, 4, \dots, 24$ 时公平性指标 F 的比较。可以看出, 本文算法用户速率公平性优势明显, WSA 算法公平性性能最差, GPA 算法公平性略优于 WSA 算法。

结合图 2 和图 3, 说明本文算法相比 WSA 算法牺牲了部分系统总数据速率, 大大提高了用户数据速率公平性, 更符合通信系统中不同用户对数据速率要求不同这一实际情况。

图 4 为 3 种资源分配算法进行仿真的 CPU 时间比较, 反映了各算法的复杂度。可以看出, GPA 算法计算复杂度比其他两种算法稍低, WSA 算法表现出稍高的计算复杂度, 所提算法介于两者中间。总体来说, 3 种算法的复杂

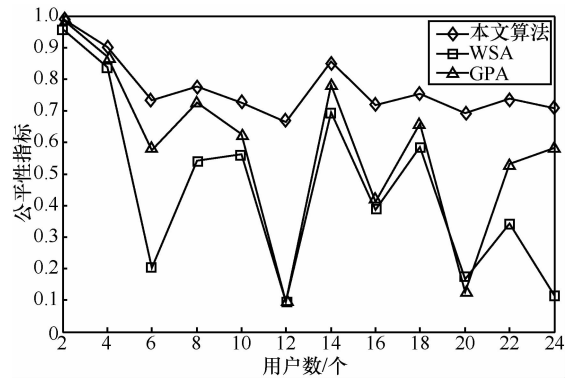


图 3 3 种算法在不同用户数时用户数据速率公平性性能的比较

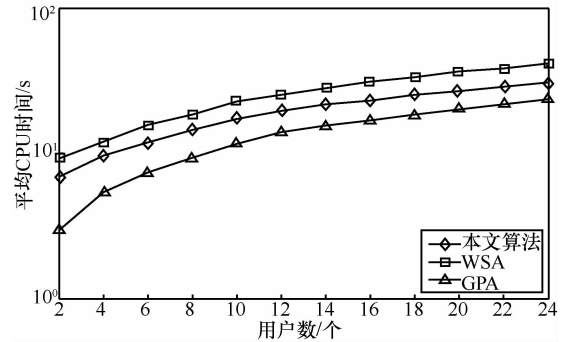


图 4 3 种算法仿真过程中 CPU 时间的比较

度差异较小, 在同一数量级上。

5 结束语

本文提出了一种优化用户数据速率比例公平性的 RA 算法。该算法中子载波与功率分配分步进行, 子载波分配分为两步: 首先为避免用户分配到信道增益最差的子载波, 根据各用户最差信道增益值从小到大将所有用户排序, 依次为各用户分配一个最优子载波, 提高了系统总数据速率; 剩余子载波的分配以保证公平性为原则, 为当前用户数据速率比例公平性最差的用户优先选择最优子载波, 直到所有子载波分配结束。功率分配则结合了平均分配与贪婪分配原则, 有效地利用了额外功率, 大大提高了功率利用率, 增加了用户数据速率。仿真结果表明, 相比参考文献[10]的算法, 本文所提算法在提高系统总速率的同时, 保证了更优的用户数据速率公平性; 相比参考文献[12]的算法, 该算法也能够损失较少的系统总数据速率的情况下, 大大提高用户数据速率公平性, 更能满足不同用户的不同业务需求。

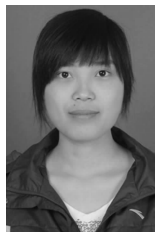
多用户 OFDM 系统资源分配是目前无线通信技术的研究重点之一, 在这方面的研究还不够完善, 仍需做出更加深入的研究。比如, 由于各用户的业务种类不同, 对误码

率的要求也会有所差异,可以根据这一点有针对性地分配系统资源,提高资源利用率;另外,实际应用中信号发送端和接收端不可能准确无误地获取到信道状态信息,这与本文算法的假设相矛盾,所以需要考虑不完全的信道状态信息对资源分配算法的影响。

参考文献

- Wong C Y, Tsui C Y, Cheng R S, *et al.* A real-time sub-carrier allocation scheme for multiple access downlink OFDM transmission. Proceedings of IEEE VTC, Amsterdam, Holland, 1999: 1124~1128
- Zhang G. Subcarrier and bit allocation for real-time services in multiuser OFDM systems. Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Communications, Paris, France, 2004: 2985~2989
- Jang J, Lee K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. IEEE J Sel Areas Commun, 2003(21): 171~178
- Yin H, Liu H. An efficient multiuser loading algorithm for OFDM based broadband wireless systems. Proceedings of IEEE Globecom, San Francisco, CA, USA, 2000: 103~107
- 陈小毛, 欧阳缙, 肖海林等. OFDMA 系统动态资源分配快速算法. 武汉大学学报: 工学版, 2014, 47(1): 124~128
Chen X M, Ouyang S, Xiao H L, *et al.* Fast dynamic resources allocation algorithm for OFDMA systems. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(1): 124~128
- Zukang S, Andrews J G, Evans B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005(4): 2726~2737
- Wong C Y, Shen Z, Evans B L, *et al.* A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems. Proceedings of IEEE Workshop on Signal Processing Systems, Austin, Texas, USA, 2004: 1~6
- Zukang S, Andrews J G, Evans B L. Optimal power allocation in multiuser OFDM systems. Proceedings of IEEE Conference on GLOBECOM, San Francisco, USA, 2003: 87~341
- 叶兰兰, 李君, 金宁. 一种新颖的多用户 OFDM 资源分配算法. 中国计量学院学报, 2012(4): 37~382
Ye L L, Li J, Jin N. A novel power allocation algorithm in multiuser OFDM systems. Journal of China Jiliang University, 2012(4): 37~382
- Odah N A, Dessouky M I, Al-Hanafy W E, *et al.* C32. Greedy power allocation algorithm for proportional resource allocation in multi-user OFDM systems. Proceedings of Radio Science Conference (NRSC), California, USA, 2012: 421~428
- Al-Hanafy W, Weiss S. Greedy power allocation for multicarrier systems with reduced complexity. Proceedings of URSI National Radio Science Conference(NRSC), California, USA, 2010:16~18
- Sedhom G G, Abd-Elnaby M, Messiha N W. Efficient subcarrier-power allocation scheme for multiuser OFDM systems. Proceedings of 2014 International Conference on Engineering and Technology (ICET), Cairo, Egypt, 2014: 1~8
- Liu T, Yang C, Yang L L. A low-complexity subcarrier-power allocation scheme for frequency-division multiple-access systems. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1564~1570
- Zhang J, Chi J, Xu X. Worst subcarrier avoiding water-filling subcarrier allocation scheme for OFDM-based CRN. Journal of Electronics (China), 2012, 29(3-4): 204~210
- Liu H, Wang Q. A hybrid evolutionary algorithm for OFDM resource allocation. Proceedings of 2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Engineering Solutions (CIES), New Orleans, LA, USA, 2013: 43~47
- Nering E D, Tucker A W. Linear Programs and Related Problems. London: Academic Press, 1993

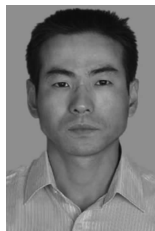
【作者简介】



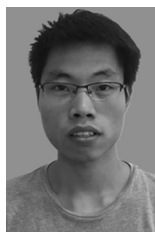
汤丽梅,女,杭州电子科技大学通信工程学院硕士生,主要研究方向为无线通信。



曹海燕,女,博士,杭州电子科技大学通信工程学院副教授,主要研究方向为无线通信系统的信道编码、信号检测、LTE 物理层标准等。



李君,男,博士,中国计量学院信息工程学院副教授,主要研究方向为无线通信系统的信道编码、信号检测、LTE 物理层标准等。



谢时场,男,杭州电子科技大学通信工程学院硕士生,主要研究方向为无线通信。