



一种提高小区边缘用户性能的多用户子载波功率分配策略

章坚武, 李方, 许方敏

(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018)

摘要: 在 OFDMA 系统中, 小区边缘用户由于受到来自相邻小区的同频干扰, 通信质量严重下降。有效地抑制小区间干扰, 极大地提升无线网络性能尤其是小区边缘用户性能是 5G 移动通信系统的目标之一。基于速率自适应(RA)准则提出了一种提高小区边缘用户性能的子载波和功率的联合资源分配算法, 该算法分为子载波分配和混合功率分配两步, 在提高小区边缘用户性能的同时, 最大化链路吞吐量。仿真结果表明, 小区边缘用户吞吐量增益为 25% 以上, 混合功率分配下的系统吞吐量逼近全部用户使用注水法时的系统吞吐量, 并且降低了运算复杂度。

关键词: 正交频分多址; 子载波分配; 功率分配; 小区间干扰; 小区边缘用户

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015112

A Multiuser Subcarrier and Power Allocation Scheme to Improve the Performance of Cell Edge Users

Zhang Jianwu, Li Fang, Xu Fangmin

(College of Telecommunication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In the OFDMA system, the communication quality of cell edge users decline seriously, due to the same frequency interference from the adjacent cells. To restrain the inter cell interference effectively and greatly enhance the performance of wireless networks especially the performance of cell edge users is one of the goals of 5G mobile communication system. Based on the rate adaptive(RA) criterion, a joint resource allocation algorithm to improve the performance of cell edge users was proposed. The algorithm was separated into two steps with subcarrier and hybrid power allocation respectively. The proposed scheme could maximize link capacity with the consideration of the performance of cell edge users. The simulation results show that the edge user throughput is greatly increased, the throughput of system of mixed power distribution approximation is approximate to the throughput that all users use liner water-filling algorithm. Besides, the proposed scheme reduces the computation complexity.

Key words: OFDMA, subcarrier allocation, power allocation, inter cell interference, cell edge user

收稿日期: 2015-03-24; 修回日期: 2015-04-27

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(No.LQ15F010004)

Foundation Item: Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.LQ15F010004)

论文引用格式: 章坚武, 李方, 许方敏. 一种提高小区边缘用户性能的多用户子载波功率分配策略. 电信科学, 2015112

Zhang J W, Li F, Xu F M. A multiuser subcarrier and power allocation scheme to improve the performance of cell edge users. Telecommunications Science, 2015112



1 引言

OFDMA (orthogonal frequency division multiple access) 技术^[1]是 OFDM 技术和 FDMA 技术结合下的多址方案,采用 OFDM 调制技术,具有对抗多径衰落信道造成的码间干扰、实现高速率、具有较高的频谱利用率和较大的用户容量等优点,这些优点使得 OFDMA 技术成为第四代移动通信的关键技术之一。

然而,在多小区 OFDMA 系统中,小区用户总会受到来自其他小区的同频干扰,用户的传输性能也因此受到严重影响,小区边缘用户就是小区间干扰的最大受害者。有效地抑制无线接入网络中的小区间干扰,极大地提升无线网络性能尤其是小区边缘用户性能是 5G 移动通信系统的目标之一。因此,如何提高小区边缘用户性能成为一个重点研究问题。

OFDMA 系统是一个资源分配自由度很大的系统,可通过合理的资源分配来提高系统吞吐量等性能指标。手段之一就是 OFDMA 系统按某公平原则把频带分成相互正交的子载波分配给用户,对每个子载波进行功率分配优化。而子载波功率分配算法的研究重点是保证系统中小区边缘用户的公平性和各个用户的服务质量(QoS),在这个基础上使得系统吞吐量最大化,降低运算复杂度。目前国内针对子载波分配问题已做了大量研究。参考文献[2]提出了一种理论上最佳的子载波功率分配方案,以系统容量最大化为目标,把信道增益高的子载波分给相应的用户,利用迭代注水法进行功率分配。但该算法更有利于小区中心用户,忽略了小区边缘用户,无法保证小区边缘用户的公平性,而且运算量较大。参考文献[3]提出了避免最差子载波(worst subcarrier avoiding, WSA)算法,避免了把信道增益差的子载波分配给用户,使系统容量相对较大。但是在算法最后阶段的子载波分配时,由于子载波数量有限,造成一些信道状况差的子载波也分配给了用户,没有保证用户的公平性。参考文献[4]中的算法(因为作者是 Jin L,以下简称 JIN 算法)虽然保证了次级用户的公平性,但是小区边缘用户的吞吐量没有达到最大化。参考文献[5]提出了 BCCF (best channel capacity first)算法,采用注水法来计算系统容量,在最大化系统容量的基础上分配子载波。虽然用平均功率分配进行优化局部,但系统整体容量提升不明显。参考文献[6]提出的算法在子载波、速率、功率公平分配的前提下,使得系统整体速率最大化,但是实现的复杂度比较大。

本文在总的传输功率的约束下提出一种以提高小区边缘用户吞吐量、降低复杂度为目的的子载波功率分配联合算法。这个算法分为两部分:子载波分配和功率分配。在子载波分配算法中,让小区边缘用户优先选择信道状况好的子载波,利用 WSA 算法提高吞吐量;在功率分配算法中,采用混合功率分配,即对小区中心用户进行平均功率分配,对小区边缘用户进行注水法功率分配。

2 系统模型

多用户 OFDMA 系统自适应资源分配模型如图 1 所示。

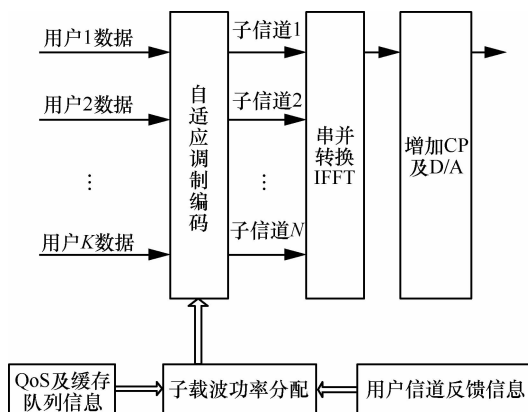


图 1 多用户 OFDMA 系统自适应资源分配模型

在图 1 中,假设有 K 个用户和 N 个子载波,各个用户的信道都是相互独立的。每个用户都有一个单独的分组队列缓存器,分组以先进先出(first input first output, FIFO)的方式进入队列。资源分配模块根据得到的物理信道状态反馈和用户业务队列缓存信息为用户选择最合适的子载波,当用户选择了相应的子载波后,在单位 OFDMA 符号内此子载波上的比特由自适应调制编码模块确定。

目前,资源分配存在两种方案:一种是静态资源分配方案,另一种是动态资源分配方案。相对于静态资源分配方案,动态资源分配方案可以根据信道状况自适应地分配资源,利用多用户分集获得更好的性能。多用户 OFDMA 系统的动态资源分配方案有两个准则:MA (marginal adaptive, 裕量自适应)和 RA (rate adaptive, 速率自适应)^[7]。本文考虑的是基于 RA 准则的多用户 OFDMA 系统的资源分配,即在总发射功率一定的情况下,使得系统吞吐量最大。目标函数吞吐量为:

$$C = \max_{\rho_{k,n}, P_{k,n}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \log \left(1 + \frac{P_{k,n} |h_{k,n}|^2}{\sigma_{k,n}^2 \Gamma} \right) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n} \leq P, p_{k,n} \geq 0, \forall k, n \\ \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} = 1, \rho_{k,n} \geq 0, \forall k, n \\ \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} = S_k, \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \end{cases} \quad (2)$$

其中, C 表示系统的传输速率, $p_{k,n}$ 表示用户 k 在子载波 n 上的功率, $\sigma_{k,n}^2 = N_0 B/N$ 表示高斯白噪声功率, 其中 B 是信道带宽。 Γ 表示编码调制的冗余量, 系统传输误码率 BER 和物理层编码调制方式为 MQAM 与格雷码联合时, $\Gamma = -\ln(5BER)/1.5$ 。 $h_{k,n}$ 表示用户 k 在子载波 n 上的增益。 $\rho_{k,n}$ 的值只能为 1 或者 0, 表示用户 k 是否占用子载波 n 。式(2)中第一个约束条件是所有子载波的功率不能大于总的发射功率; 第二个约束条件表示一个子载波只能分配给一个用户; 第三个约束条件表示用户 k 分配的总子载波数为 S_k 。

3 多用户子载波功率联合分配算法

本文所提的联合算法分为两步: 子载波分配和混合功率分配。在子载波分配算法中, 小区边缘用户优先选择信道增益好的子载波, 以提高边缘用户的性能, 再利用 WSA 算法最大化链路吞吐量; 在功率分配算法中, 采用混合分配, 即小区中心用户进行平均功率分配, 小区边缘用户采用一种可修正注水水面且复杂度相对较低的线性注水法进行功率分配。

在子载波功率分配之前, 要进行小区中心用户和小区边缘用户的划分。根据系统信道状态设定一个门限值 $SINR_{th}$ (signal to interference plus noise ratio, 信号与干扰加噪声比), 系统初始化后, 根据每个用户反馈的值, 判断用户类型, 即当 $SINR_k \geq SINR_{th}$ 时, 该用户 k 为小区中心用户; 当 $SINR_k \leq SINR_{th}$ 时, 该用户 k 为小区边缘用户。

为了方便讨论, 在以下描述中, 将式(1)中的 $\frac{h_{k,n}^2}{\sigma_{k,n}^2 \Gamma}$ 用 $H_{k,n}$ 来表示。

3.1 子载波分配算法

为了保证小区边缘用户的 QoS 和公平性, 按照小区边缘用户优先选择信道增益好的子载波的原则进行分配, 小区中心用户进行剩余子载波的分配。为了避免用户使用最差子载波, 对小区中心用户和小区边缘用户选择的子载波分别采用 WSA 算法, 使系统吞吐量最大化。算法具体过程如下。

(1) 初始化: $A = \{1, 2, \dots, N\}$, $\rho_{k,n} = 0, k = 1, 2, \dots, K$, A 为子载波集合, N 为子载波序号数。

(2) 调整信道增益矩阵 H : $H_n^{\min}$ 为 H 中第 n 列最小的值, 按照每列最小值从小到大的顺序排列, 即 $H_1^{\min} \leq H_2^{\min} \leq \dots \leq H_n^{\min}$, 然后调整 $H = [H_1, H_2, \dots, H_n]$ 。

(3) 取 H 矩阵的后 $\text{fix}(N \cdot (1-a))$ (a 表示小区中心用户占有所有用户的比例) 列重新组成一个新的矩阵 H'_n , 作为小区边缘用户信道增益矩阵, 剩余所有列重新组成新矩阵 H''_n 作为小区中心用户的信道增益矩阵。分别对两个矩阵采用 WSA 算法, 即从第一列开始, 找出该列最大值对应的用户 k , 判断用户的子载波数是否满足 S_k , 即 $S_k = \text{fix}(N/K)$, 若不满足, 把该子载波分配个该用户; 若满足, 继续寻找该列次最大值进行同样的分配。以小区中心用户子载波分配为例, 程序如下。

```
begin
  for  $n=1$  to  $\text{fix}(N \cdot a)$ 
     $k = \arg \max |h_{k,n}''|^2$ ;
    while  $\sum_n \rho_{k,n} = S_k$ 
       $|h_{k,n}''|^2 = 0$ ;
       $k = \arg \max |h_{k,n}''|^2$ ;
    end while
     $\rho_{k,n} = 1$ ;
  end for
end
```

若有两个用户同时选择了同一个子载波, 则增益最大的用户选择该子载波, 另一个用户选择对自己增益次优的子载波, 以此类推; 若该子载波对两个用户的增益是一样的, 则实行排队法, 即排第一个的用户优先选择该子载波, 另一个用户选择对自己增益次优的子载波, 以此类推。

3.2 混合功率分配算法

平均功率分配算法是计算量最小、最简单的功率分配算法; 而注水法功率分配就提高吞吐量来说是最优的分配方法, 但复杂度较高。由于平均功率分配算法没有考虑变化的信道增益, 当信道的 SNR 较小时, 吞吐量要比用注水算法时小得多, 当信道 SNR 的较大时, 吞吐量逼近注水法。综合两种功率分配算法的优点, 本文对小区用户实施混合功率分配, 即小区边缘用户利用线性注水法^[9]进行功率分配, 对小区中心用户进行平均功率分配。

子载波分配完成后, 每个用户都要对已分配好的子载波



进行功率分配,把未被分配的子载波功率设置成0,这样用户在功率分配时就不会相互影响。由此,可将多用户 OFDMA 系统子载波功率分配转化成单用户子载波功率分配。

OFDMA 系统的总吞吐量是所有子载波的吞吐量之和,小区边缘用户采用线性注水法进行功率分配,吞吐量最大化目标可表示为:

$$C^* = \max \frac{B}{N_1} \sum_n \text{lb}(1+H'_n P_n) \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \sum_{n=1}^{N'} P_n \leq P_0, P_0 \geq 0, \forall n \quad (4)$$

其中, $H'_n = \Gamma \frac{h_n^2}{\sigma_n^2}$, P_n 表示每个子载波分配的功率, N' 为小区边缘用户总子载波数。

结合式(3)、式(4)构造 Lagrange 函数如下:

$$L = \sum_{n=1}^{N'} \text{lb}(1+H'_n P_n) - \lambda \left(\sum_{n=1}^{N'} P_n - P_0 \right) \quad (5)$$

对 P_n 求导得:

$$\frac{\partial L}{\partial P_n} = \frac{1}{1+H'_n P_n} - \lambda \quad (6)$$

令 $\frac{\partial L}{\partial P_n} = 0$, $\beta = \lambda \ln 2$, 得:

$$\beta = \frac{H'_n}{1+H'_n P_n} \quad (7)$$

由式(7)可推导出:

$$H'_m / (1+H'_m P_m) = H'_n / (1+H'_n P_n) \quad (8)$$

其中, $m, n = \{1, 2, 3, \dots, N_1\}$, 则:

$$P_n = P_m + \frac{1}{H'_m} - \frac{1}{H'_n} \quad (9)$$

由式(9)可得出,只要求出某个子载波的功率,就可以解出其他子载波的功率,再由约束条件可得出:

$$P_m \leq \frac{1}{N'} \left(P_0 - \frac{N'}{H'_m} + \sum_{n=1}^{N'} \frac{1}{H'_n} \right) \quad (10)$$

前面已经将各个子载波的 H_n 按顺序排列,所以求得的 P_m 也是按顺序排列的。已知有 $H'_1 \leq H'_2 \leq \dots \leq H'_n$, 则 $P_1 \leq P_2 \leq \dots \leq P_n$ 。根据式(10)可得:

$$P_i = \frac{1}{N'} \left(P_0 - \frac{N'}{H'_i} + \sum_{n=1}^{N'} \frac{1}{H'_n} \right) \quad (11)$$

若 $P_i < 0$, 则将该子载波设置为 0 并从子载波集中剔除,然后对下一个子载波进行功率计算,直到找到第一个 $P_i > 0$, 然后根据式(10)求出剩余子载波的功率。

该线性注水法避免了迭代注水法需要进行的多次修正水位,因为在子载波分配阶段已经将 H_n 排好序,在功率分配阶段就大大减小了复杂度。

小区中心用户采用平均功率分配, $p_k = P_z / N_z$, N_z 表示小区中心用户占用的子载波数, P_z 表示小区中心用户的总发射功率。

3.3 复杂度分析

迭代注水功率分配算法是功率分配的理论上限,但是其迭代次数多,复杂度大,每次求出所有子载波功率后再修正注水水面值重新计算,而本算法采用基站排序,避免了这个问题,因为在子载波分配阶段已经将 H_n 排好序,在功率分配阶段就大大减小了复杂度。参考文献[5]提出的算法在子载波、速率、功率公平分配的前提下,使得系统整体速率最大化,但其算法的每一次迭代复杂度为 $O(K^2 N \ln^4 K + K^4)$, 而本算法中,根据式(9)计算每个子载波的功率,共有 $(2+2N+N_0)$ 次加法运算和 $(2+N_0)$ 次乘法运算 (N_0 为被剔除子载波数目),即本算法每一次迭代复杂度为 $O(N)^{[6]}$ 。另外,由于采用注水法进行功率分配的复杂度要比平均功率分配算法的复杂度高得多,本文算法只对小区边缘用户利用注水法进行功率分配,对小区中心用户采用平均功率分配法,减少了注水法不必要的迭代次数,相比于全部使用注水法进行功率分配降低了复杂度。

4 仿真结果与分析

将本文提出的子载波功率分配算法与 WSA^[3]、JIN^[4] 算法进行仿真对比。为了简便起见,假设每个子载波有相同的噪声功率谱密度且 $\sigma_n^2 = 1$, 误码率 $BER = 10^{-5}$, 用户数 $K = 16$, 小区中心用户 $SNR = 15$ dB, 小区边缘用户 $SNR = 5$ dB, 每个子信道为瑞利衰落信道。

随着系统子载波数的增加,不同算法的小区边缘用户吞吐量和系统吞吐量的比较结果如图2所示。很容易看出,在不同的子载波数下,本文算法相比 WSA 算法和 JIN 算法,小区边缘用户吞吐量增益为 25% 以上。这是因为在进行子载波分配时,小区边缘用户优先选择信道增益好的子载波,并且剔除了最差信道,小区边缘用户吞吐量得以大大提高。然而,从图2(b)中可以得知3种算法下的系统吞吐量都十分接近,这说明,为了提高小区边缘用户吞吐量,牺牲了部分小区中心用户的吞吐量。

图3给出了不同功率分配算法下的系统吞吐量比较。从图3中可以看出,本文算法得到的系统容量十分接近全部用户使用注水法,而又远大于平均功率分配算法。这是

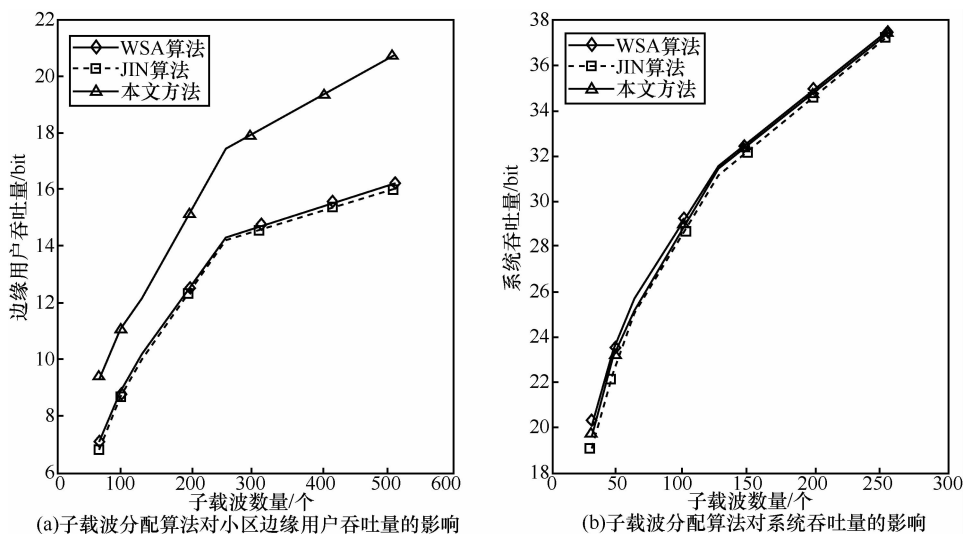


图 2 子载波分配算法对小区边缘用户吞吐量和系统吞吐量的影响

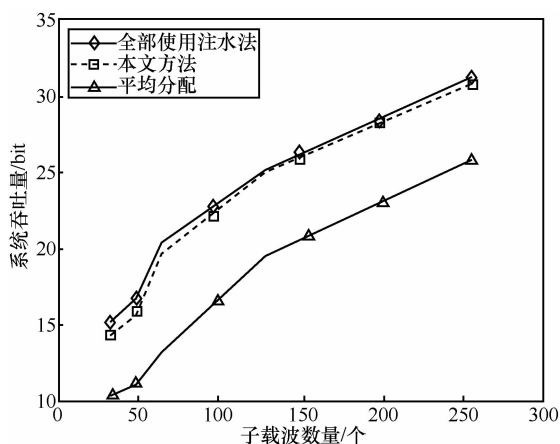


图 3 功率分配算法对系统吞吐量的影响

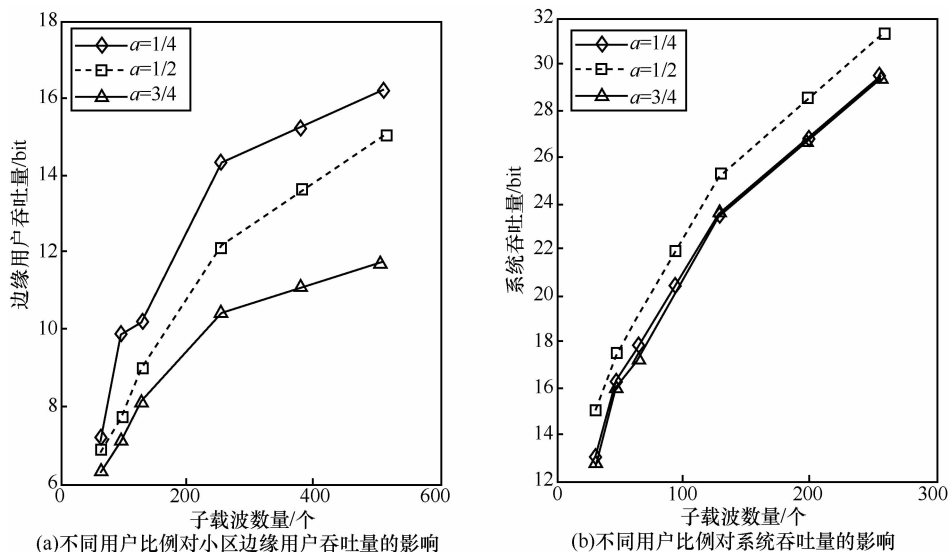


图 4 不同用户比例对小区边缘用户和系统吞吐量的影响

因为在低信噪比(小区边缘用户)时,各个子载波的传输状况差异被放大,有利于优化线性注水法,使得吞吐量增大;在高信噪比(小区中心用户)时,各个子载波的传输状况都处在一个比较好的水平,线性注水法效果不明显。

不同类型用户所占比例的不同对系统吞吐量影响也很大。本文主要针对小区边缘用户吞吐量的提高进行了研究,图 4 显示了在小区中心用户所占比例 α 取不同值时,小区边缘用户和系统吞吐量随子载波数的变化情况。在小区中心用户平均 $\text{SNR}=15\text{ dB}$, 小区边缘用户平均 $\text{SNR}=5\text{ dB}$ 的条件下,由图 4 容易看出,小区中心用户所占比例越低,小区边缘用户的吞吐量越高;小区中心用户和小区边缘用户各占一半时,系统吞吐量相对较大。



5 结束语

本文主要研究了多用户 OFDMA 系统中提高小区边缘用户性能的子载波功率资源分配问题。基于 RA 准则,本文提出了一种可以提高小区边缘用户性能、降低复杂度的子载波功率联合算法。在进行子载波分配时,按照小区边缘用户优先选择的准则并整体结合 WSA 算法来提高小区边缘用户和整体吞吐量;在分配好子载波的基础上,小区边缘用户利用注水法进行功率分配,小区中心用户进行平均功率分配,以进一步提高小区边缘用户吞吐量。仿真数据表明,小区边缘用户吞吐量增益为 25%以上,混合功率分配得到的系统吞吐量逼近全部使用注水法得到的吞吐量,并且大大降低了复杂度。

参考文献

1 艾渤,王劲涛,钟章队. 宽带无线通信 OFDM 系统同步技术. 北京:人民邮电出版社,2011
Ai B, Wang J T, Zhong Z D. Synchronization Technology in OFDM Broadband Wireless Communication System. Beijing: Posts and Telecom Press, 2011

2 Jang J, Lee K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(2): 171~178

3 Liu T, Yang C, Yang L. A low-complexity subcarrier-power allocation scheme for frequency-division multiple-access systems. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1564~1570

4 章坚武, 金露, 许晓荣. 一种兼顾速率公平的多用户子载波功率联合分配算法. 电信科学, 2013, 29(4): 57~61
Zhang J W, Jin L, Xu X R. A multi-user subcarrier power joint allocation algorithm based on rate fairness. Telecommunications Science, 2013, 29(4): 57~61

5 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, 23(4): 379~382

Ye L L, Li J, Jin N. A novel power allocation algorithm in multiuser OFDM systems. Journal of China Jiliang University, 2012, 23(4): 379~382

6 Han Z, Ji Z, Liu K J R. Fair multiuser channel allocation for OFDMA networks using nash bargaining solutions and coalitions. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(8): 1366~1376

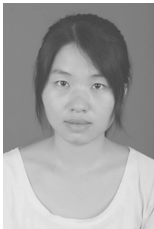
7 Sadr S, Anpalagan A, Raahemifar K. Radio resource allocation algorithms for the downlink of multiuser OFDM communication systems. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(3): 92~106

8 张冬梅, 徐友云, 蔡跃明. OFDMA 系统中线性注水功率分配算法. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1286~1289
Zhang D M, Xu Y Y, Cai Y M. Linear water-filling power allocation algorithm in OFDMA System. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(6): 1286~1289

[作者简介]



章坚武,男,博士后,杭州电子科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信与网络信号处理等。



李方,女,杭州电子科技大学硕士生,主要研究方向为无线资源管理。

许方敏,女,博士,杭州电子科技大学讲师,主要研究方向为宽带无线通信基础理论的研究,包括频率复用、资源调度等无线资源分配与管理策略。

2015112-6

2015 年第一季度通信业主要通信能力

指标名称	单位	本季末到达	比上年末新增
长途光缆线路长度	千米	929 332	2
固定长途电话交换机容量	万路端	932	-22.8
局用交换机容量	万门	14 287.2	-20.3
接入网设备容量	万门	19 124.6	-14.6
移动电话交换机容量	万户	208 521.9	4.8
互联网宽带接入端口	万个	42 456.6	15

(来源:工业和信息化部运行监测协调局)