

# 一种新型的多用户 OFDM 系统资源分配策略

薛晓洁, 赵林靖, 刘 鹏

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 信息科学研究所宽带无线通信实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 在多用户正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)系统中, 系统容量和用户公平性不能同时兼顾, 本文提出了一种综合考虑系统容量和用户公平性的资源分配算法. 该算法利用多用户的分集增益, 根据用户的实时信道状态和传输速率要求, 合理的选择用户接入的时刻, 既保证了用户公平性又提高了系统容量, 达到时频二维空间优化系统的效果. 仿真结果表明, 本算法在不增加算法复杂度和不损失用户公平性的前提下, 有效的提高了系统容量.

**关键词:** 多用户 OFDM; 系统容量; 公平性; 资源分配

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 6A-064-05

## A Novel Resource Allocation Algorithm in Multiuser OFDM System

XUE Xiao-jie, ZHAO Lin-jing, LIU Peng

(Broadband Wireless Communications Laboratory, Information Science Institute, State Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** In the multiuser orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) system, system capacity and fairness can not be simultaneously achieved in general. A novel resource allocation algorithm, which jointly considers the system capacity and fairness, is proposed in this paper. Based on each user's real-time channel state information(CSI) and required data rate, the proposed algorithm makes full use of multiuser diversity to maximize the system capacity and guarantee the fairness by choosing suitable access time, and achieved the purpose of optimizing system in both time and frequency domains. Simulation results indicate that the proposed algorithm can effectively increase the system capacity without increasing the algorithm complexity and losing the fairness among users.

**Key words:** multiuser OFDM; system capacity; fairness; resource allocation

### 1 引言

作为下一代无线通信系统最有可能采用的核心技术之一, 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)除了可以有效的对抗多径衰落, 还具有很高频谱利用率<sup>[1-3]</sup>. OFDM 技术将频率选择性衰落信道划分成一组并行独立平坦衰落的子信道, 根据子信道的瞬时信道特性, 自适应的分配数据速率和功率, 优化系统性能.

对于单用户 OFDM 系统, 在发送端准确获知信道状态信息(Channel State Information, CSI)的前提下, 可以在总功率受限的条件下, 通过注水定理<sup>[2]</sup>进行最优的功率分配来最大化系统容量. 对于多用户 OFDM 系统, 由于多用户分集增益, 用户之间所经历的信道衰落是独立

的, 每个子载波对于不同的用户来说, 衰落也是不同的. 因此, 如何利用多用户的分集增益, 来进行多用户接入对优化系统有着重要的意义. 现有的多用户资源分配方式主要有两种: (1) 固定的资源分配算法<sup>[4]</sup>; (2) 动态资源分配算法<sup>[5-9]</sup>. 固定的资源分配算法, 例如 OFDM-TDMA 和 OFDM-FDMA, 是将固定的时隙或者子载波分配给不同的用户, 来实现多用户接入. 但是固定的资源分配方式在分配时没有考虑当前的信道状态, 因此不是最优的. 而动态资源分配方式, 根据当前的信道状态和多用户分集增益, 自适应的进行资源分配, 这样就可以充分利用无线信道的时变特性和多用户的分集特性来优化系统的性能.

多用户 OFDM 系统的动态资源分配, 主要有以下两种优化方式: margin adaptive(MA)<sup>[5,6]</sup>和 rate adaptive(RA)<sup>[7-9]</sup>.

收稿日期: 2007-06-11; 修回日期: 2007-09-18

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No. 60725105); 国家自然科学基金重大项目(No. 60496316); 国家自然科学基金(No. 60572146); 高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20050701007); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划; 教育部科学技术研究重点项目(No. 107103)

MA 是在给定用户的传输速率和传输质量要求的前提下,实现发送功率的最小化.RA 是在总功率受限和传输质量一定的条件下,实现系统容量的最大化.针对不同的服务,应采取不同的优化准则.

RA 方式下的资源分配算法主要有两种算法,即系统容量最大化的算法和保证用户公平性的算法.容量最大化可以通过多用户注水来实现,但算法复杂度太高,比较典型的算法有 JL 算法<sup>[8]</sup>;考虑用户传输速率要求即公平性的有 SGL 算法<sup>[9]</sup>.仅仅以容量最大化来优化系统,用户的公平性得不到保证,一些处于深衰落条件下的用户的服务得不到满足.如果考虑用户的公平性,势必要把一些资源分配给信道条件很差的用户,系统容量必然下降,即在容量和公平性之间有所折中.

本文提出一种综合考虑系统容量和用户公平性的资源分配算法,力图在保证公平性的前提下,实现系统容量的最大化.

### 2 系统模型

多用户 OFDM 系统框图如图 1 所示,在慢衰落的信道中,可以认为上下行链路是互易的.接收端进行信道估计,然后通过反馈信道告知发送端.发送端在获知信道状态信息后,进行子载波和功率分配,然后进行 IFFT 和并/串变换、加循环前缀最后发送无线信道传输,这些分配信息再通过专门的控制信道告知接收端,以用于正确解调.

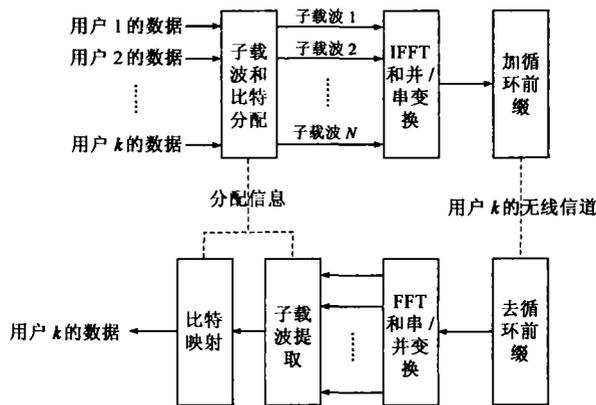


图 1 多用户 OFDM 系统框图

假设系统有  $K$  个用户,共享  $N$  个子载波,受限的总功率为  $P_{total}$ ,优化目标就是在总功率的限制条件下,进行子载波和功率分配,实现系统容量的最大化.因此我们可以给出优化的目标函数如下:

$$\max_{\rho_{k,n}, p_{k,n}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{\rho_{k,n}}{N} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{k,n} |h_{k,n}|^2}{N_0 B/N} \right) \quad (1)$$

$$\text{约束条件: } \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n} \leq P_{total} \quad (2)$$

$$p_{k,n} \geq 0, \forall k \in K, n \in N \quad (3)$$

$$\rho_{k,n} = \{0, 1\}, \forall k \in K, n \in N \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K \rho_{k,n} = 1, \forall n \in N \quad (5)$$

如果考虑到用户的传输速率要求则需要再加入下面的约束条件:

$$R_1: R_2: \dots: R_K = \gamma_1: \gamma_2: \dots: \gamma_K \quad (6)$$

其中,  $K$  表示总用户数,  $N$  表示一个符号可用的子载波数,  $N_0$  是加性高斯白噪声的功率谱密度,  $B$  和  $P_{total}$  分别是系统可用带宽和受限总功率.  $p_{k,n}$  表示用户  $k$  在子载波  $n$  上加载的功率;  $h_{k,n}$  表示用户  $k$  在子载波  $n$  上的信道增益;  $\rho_{k,n}$  的值为 0 或 1, 表示用户  $k$  是否占用子载波  $n$ ; 第四个约束条件限制了一个子载波只能为一个用户所用. 用户  $k$  的速率  $R_K$  表述如下:

$$R_K = \sum_{n=1}^N \frac{\rho_{k,n}}{N} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{k,n} |h_{k,n}|^2}{N_0 B/N} \right) \quad (7)$$

$\{\gamma_i\}_{i=1}^K$  表示用户的传输速率要求之比, 用于保证用户的公平性.

该优化问题是一个混合的二元整数规划问题, 非线性的约束条件也增加了求解的难度. 如果要通过子载波和功率的联合分配来达到最优解, 在基站端就需要很大的计算量, 不能满足实时性的要求. 因此针对这种优化模型, 往往用次优的方法来逼近最优解.

### 3 综合考虑容量和公平性的资源分配算法

#### 3.1 容量最大化的算法——JL 算法

文献[8]提出的算法——JL 算法, 仅以容量最大化为出发点进行多用户接入, 没有考虑到用户的传输速率要求, 即没有考虑约束条件(6). 文献[8]给出了一个定理: 多用户 OFDM 系统下行链路容量最大化的子载波分配策略为: 将子载波分配给对于这个子载波来说信道增益最大的用户使用. 并且仿真结果显示了运用此种子载波分配方案加上注水功率分配或者等功率分配都能达到接近信道容量的系统通过量. 然而, 此种算法对于信道条件很差的用户来说, 他们的服务就完全得不到满足.

#### 3.2 公平性算法——SGL 算法

文献[9]提出的算法——SGL 算法给出了在高信噪比的情况下考虑用户公平性的次优分配方法, 此算法第一步进行子载波的分配: 假设每个子载波上都分配了相同的功率, 根据用户的传输速率即约束条件(6)进行子载波分配; 子载波分配结束后, 进行第二步功率分配. 在进行功率分配时 SGL 算法也考虑了用户的公平性条件, 实现了考虑公平性的最优功率分配.

利用这一算法, 在高信噪比的条件下, 用户的公平性得到了很好的保证, 但系统容量会明显降低, 原因是该算法考虑了用户的传输速率要求, 对于信道条件很差的用户也分配了相应的资源来保证公平性.

为此,本文对此算法进行改进,在时域上考虑了用户的接入时刻,保证了在若干个符号内用户的传输速率要求得到满足,而且系统容量有明显的提升.

### 3.3 改进算法

如果某些用户在某个 OFDM 符号期间内的信道状况特别差,按照 SGL 算法,要保证这些用户的公平性,就必须在本符号内给这些用户分配相应的资源来保证其传输速率要求,这些用户的接入势必会导致系统容量的降低.即使对于像话音业务这种实时性要求比较高的服务来说,如果在一定的 OFDM 符号周期内给用户分配相应的资源,用户语音服务就不受影响.所以没有必要以牺牲系统容量为代价,来换取多用户在一个 OFDM 符号内的绝对公平,只要在用户的 QoS 要求所能承受的一定的 OFDM 符号期间内保证用户的公平性,他们的服务就都能得到满足.

本文提出一种改进算法,在保证公平性的基础上,以提高系统容量为出发点,对其进行时频二维优化.针对不同的业务需求,可以确定保证公平性所需的符号数,在规定的符号数内,对于不同的 OFDM 符号,我们可以根据多用户在对应符号期间的信道状态和用户服务需求的满足情况,来选择合适的用户接入并按照一定的原则给其分配资源.

**定义** 并行高斯信道的几何信道噪声比  $CNR_{geo}$ ,这个指标可以描述整个信道的特征.

$$CNR_{geo} = \left( \prod_i CNR_i \right)^{1/N} \quad (8)$$

其中  $CNR_i$  表示每个子载波上的信道增益与噪声功率之比,即信道噪声比.

本算法利用几何信道噪声比来衡量用户的信道状况,把它作为判断用户是否接入的条件,接入门限根据用户的传输速率满足的情况和几何信噪比自适应的确定.具体方法如下:假设要在  $P$  个符号周期内保证用户的公平性, $P$  个符号期间平均一个 OFDM 符号所能承载的容量用  $C$  表示,每接入一个符号, $C$  更新一次,直到第  $P$  个符号接入后  $C$  达到精确值.根据容量  $C$  和用户的传输速率要求,可以计算出每个用户在这  $P$  个符号内所能加载的容量,即  $c(k) = P \times C \times (\gamma_k / \sum_{i=1}^K \gamma_i)$ .按下面的方法确定门限  $th$  的值:对于第一个 OFDM 符号,令  $th = E[CNR_{geo}(k)]$ , $E$  表示取均值;对于剩余的每个符号,用户  $k$  在当前的 OFDM 符号的传输容量用  $r(k)$  表示,该用户距离目标容量  $c(k)$  的差额为  $g(k) = c(k) - r(k)$ ,假设在本符号内接入得用户集合为  $\Psi$  接入的用户数为  $\varphi$ ;  $th$  选取的原则是要保证在当前符号中接入的所有用户距离目标容量的差额之和与  $C$  的差最小,即

$$\min \left| \sum_{\varphi} g(i) - C \right|.$$

确定了  $th$  之后,如果用户的几何信噪比大于接入门限,同时其传输容量不超过所能承载的容量,即  $CNR_{geo}(k) > th$

与  $r(k) < c(k)$  同时满足时,则用户接入本 OFDM 符号.对于这些接入的用户,利用 SGL 算法进行子载波和功率分配,并使得各用户的传输速率要求满足  $r_1:r_2:\dots:r_{\varphi} = g(1):g(2):\dots:g(\varphi)$ .根据分配结果动态更新  $C, c(k), r(k)$  以及  $g(k)$ .

如果某些用户在这  $P$  个符号内信道条件都很差而没有机会接入,为了保证公平性,必须选择合适的 OFDM 符号时刻,让这些用户接入.假设未曾接入的用户用集合  $\Phi$  表示,剩余的符号数用  $l = P - t$  表示, $t$  表示当前的符号索引.当这些用户距离目标容量的差额之和满足  $\sum_{\Phi} c(i) \geq l \times C$  时,将这些没有接入过的用户接入当前剩余的符号,并且按照其原有的速率要求进行子载波和功率分配.

算法流程如下:

(1) 初始化参数:  $\forall k, r(k) = 0, c(k) = 0, C = \infty, th = E[CNR_{geo}(k)], \Phi = \{1, 2, \dots, K\}, l = P$ ;

(2) While  $\sum_{\Phi} c(k) < l \times C$  (条件 1)

if  $CNR_{geo}(k) > th \ \& \ r(k) < c(k)$  (条件 2)

**Step1** 将用户  $k$  接入,计算出接入用户的传输速率要求之比  $r_1:r_2:\dots:r_{\varphi} = g(1):g(2):\dots:g(\varphi)$ ,并按照 SGL 算法进行资源分配.

**Step2** 更新  $r(k), C, c(k), th, \Phi, l$ .

(3) While  $\sum_{\Phi} c(k) \geq l \times C$

**Step1** 将  $\Phi$  接入当前以及剩余的符号,按接入用户传输速率要求之比,按 SGL 算法进行资源分配.

**Step2** 更新  $r(k), C, c(k), l$ .

(4) 当  $l = 0$  算法结束

流程图如图 2 所示:

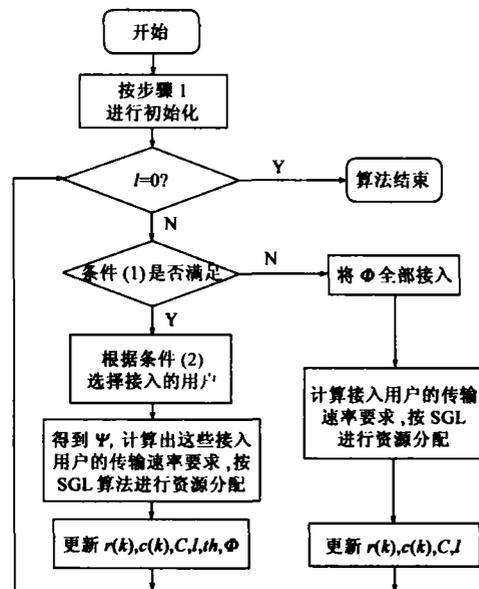


图 2 算法流程图

## 4 仿真与分析

### 4.1 仿真场景

仿真中的信道模型,采用六径瑞利衰落信道,每一

径用 Clarke 模型建模<sup>[10]</sup>,功率时延谱是  $e^{-2l}$  的指数衰减,  $l$  表示第  $l$  径.总的可用带宽为  $B = 1\text{MHz}$ ,分为  $N = 64$  个子载波.总的发射功率为  $P_{\text{total}} = 1\text{W}$ ,AWGN 的功率谱密度为  $-80\text{dB} \cdot \text{W}/\text{Hz}$ ,此时系统的平均信噪比为  $20\text{dB}$ .仿真中假设用户的传输速率要求相同,即  $R_1:R_2:\dots:R_K = 1:1:\dots:1$ .选择  $P = 30$ .

#### 4.2 性能与分析

图 3 给出了在系统平均信噪比为  $20\text{dB}$  时,  $1 \times 10^4$  个信道样本的系统容量的均值随用户数的变化曲线.从图中可以看出,改进的算法比 SGL 算法系统容量有了显著的提升;由于多用户的分集增益, JL 算法和改进算法的系统容量都会随用户数的增加而提升,而 SGL 算法由于每个 OFDM 符号都要保证用户的公平性,却没有从时域上去优化系统,所以系统容量随着用户数的增加反而降低.图 4 显示的是在用户数为 8 的时候三种算法的系统容量随平均信噪比变化曲线.

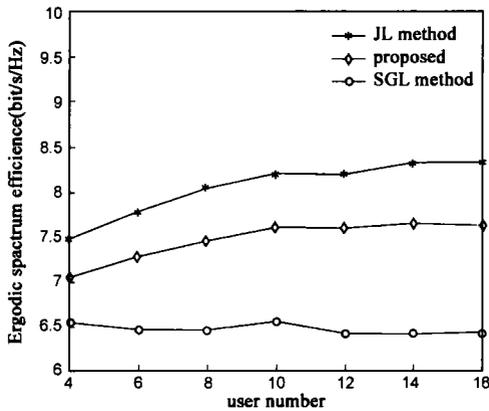


图 3 系统容量随用户数的变化曲线

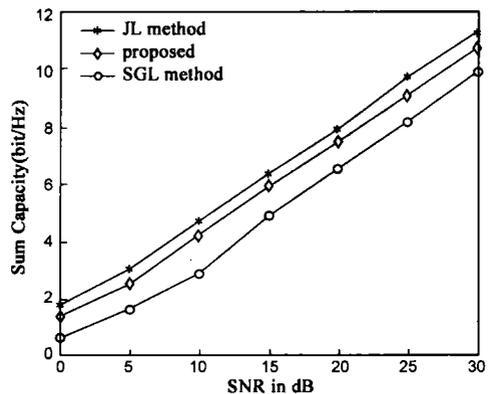


图 4 系统容量随平均信噪比变化曲线

图 5 给出了在系统用户数为 8 时,不同的平均信噪比情况下,各个用户的公平性以及容量的比较.图 5 (a) ~ 5 (c) 中系统的平均信噪比分别为  $0\text{dB}$ 、 $10\text{dB}$ 、 $20\text{dB}$ .从图 5 可以看出 JL 算法只从系统容量的角度出发进行资源分配,没有考虑用户的传输速率要求,所以用户的公平性得不到保证.从图 5 (a) 可以看出,在平均信噪比很低的情况下 SGL 算法的公平性没有得到很好

的保证,而改进算法公平性却有较好的保证,每个用户的容量都非常接近;并且在低信噪比的条件下,改进算法的系统容量比 SGL 算法有了显著的提升.图 5 (b) ~ 5 (c) 可以看出,在高信噪比情况下,改进的算法与 SGL 算法都获得了很好的公平性,同时改进的算法比 SGL 算法具有更高的系统容量.所以,无论是在低信噪比和高信噪比的条件下,改进的算法系统容量和公平性都能很好的满足.

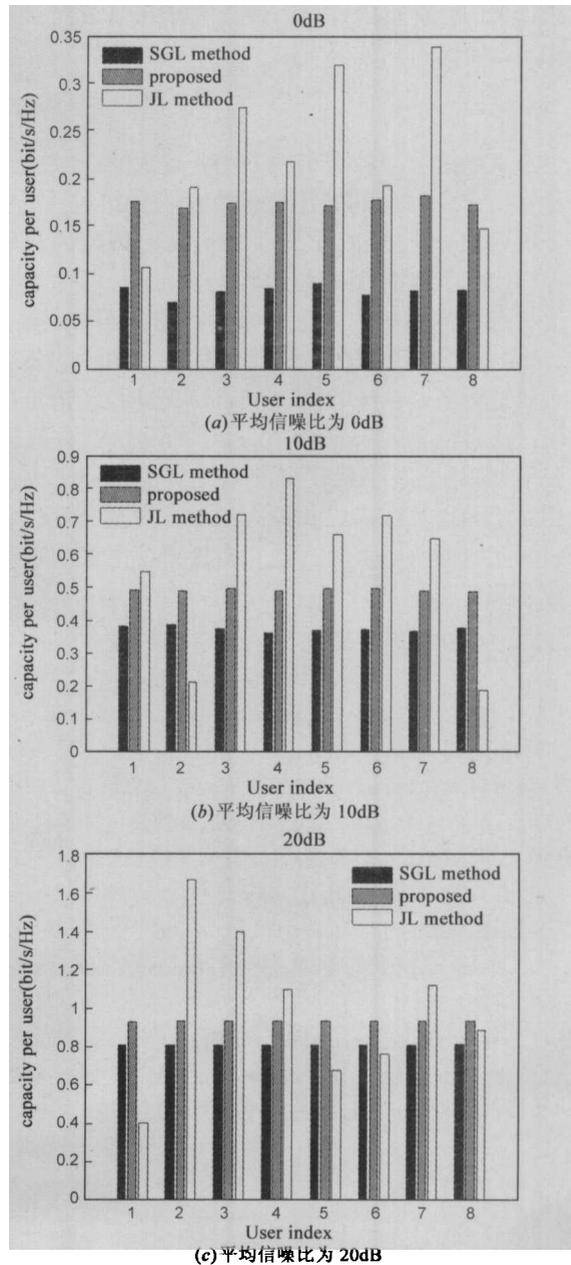


图 5 不同平均信噪比下用户公平性及容量的比较

#### 4.3 算法复杂度分析

对于一个用户数为  $K$ ,子载波数为  $N$  的多用户 OFDM 系统,SGL 算法的复杂度主要有两部分组成:第一步是子载波的指配,复杂度为  $o(KN)$ ;第二步是功率

分配,复杂度为  $o(K)$ .改进算法在每个 OFDM 符号中由于控制了几何信噪比小的用户接入,每个符号内实际接入的用户数是不大于系统用户数的,即  $\varphi \leq K$ ,实际上,每个符号接入的用户数往往只有系统用户数的一半,所以改进算法在此部分的复杂度  $o(\varphi N)$ 要小于 SGL 算法.而优化策略所引入的计算量,主要集中在接入门限的获得上,由上文所述的门限计算方法可以看出,计算接入门限所引入的开销要远小于增加用户数对 SGL 算法带来的计算负担.因此,改进算法在复杂度上并没有比 SGL 算法有所提高.

## 5 结论

本文提出了一种多用户 OFDM 系统综合考虑系统容量和用户公平性的资源分配算法,该算法充分利用了多用户的分集增益,定义了并行高斯信道的几何信道噪声比作为衡量用户信道状态的指标,根据其实时信道状态和传输速率要求,合理的选择用户的接入时刻,从时频二维空间优化系统,既保证了用户的公平性又有效地提高了系统容量.仿真结果表明,无论是在低信噪比还是高信噪比条件下,提出的算法都具有较好的公平性,并且能达到较高的系统容量.另外,改进算法相对于 SGL 算法来说并没有增加计算复杂度.因而,是一种实时的兼顾系统容量和多用户公平性的自适应资源分配算法.

## 参考文献:

- [1] J G Proakis. Digital Communications [M]. 4rd edition, New York: McGraw Hill, 2001.
- [2] R van Nee, R Prasad. OFDM for Wireless Multimedia Communications [M]. London: Artech House, 2000.
- [3] 尹长川, 罗涛, 乐光新. 多载波宽带无线通信技术 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
- [4] E Lawrey. Multiuser OFDM [A]. in Proc. Int. Symp. Signal Processing and Its Applications [C]. Brisbane, Australia, 1999, 761 - 764.
- [5] C Y Wong, R S Cheng, K B Letaief, R D Murch. . Multicarrier OFDM with adaptive subcarrier bit and power allocation [J]. J. Select. Areas Commun. IEEE, 1999, 17(10): 1747 - 1758.
- [6] I Kim, I-S Park, Y H Lee. Use of linear programming for dynamic subcarrier and bit allocation in multiuser OFDM [A]. Trans. Veh. Technol. [C]. IEEE, Piscataway, NJ, USA. 2006. vol. 55, no. 4, 1195 - 1207.
- [7] G Munz, S Pfletschinger, J Speidel. An efficient waterfilling algorithm for multiple access OFDM [A]. GLOBECOM' 02 [C]. IEEE, Piscataway, NJ, USA. 2002. vol. 1, 681 - 685.
- [8] J Jang, K B Lee. Transmit power adaptation for multiuser OFDM system [J]. J. Select. Areas Commun. IEEE, 2003, 21 (2): 171 - 178.
- [9] Z Shen, J G Anfrews, B L Evans. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM system with proportional rate constraints [J]. Trans. Wireless Commun. IEEE, 2005, 4(6): 2726 - 2737.
- [10] T S Rappaport. Wireless Communications; Principles and Practice [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice - Hall, 2002.

## 作者简介:



薛晓洁 女, 1982 年 11 月生于安徽涡阳. 2005 年毕业于安徽大学电子系, 获学士学位. 现为西安电子科技大学在读硕士生. 主要研究方向为认知无线电, 无线通信系统资源分配与优化. E-mail: xjxue@pcn.xidian.edu.cn



赵林靖 女, 1976 年生于陕西咸阳. 西安电子科技大学讲师, 博士生, 2003 年获工学硕士学位. 主要研究方向为软件无线电、认知无线电、OFDM、宽带移动通信. E-mail: ljzhao@mail.xidian.edu.cn



刘鹏 男, 1982 年 12 月生于湖北武汉. 2005 年毕业于西安电子科技大学通信工程学院, 获学士学位. 现为加拿大皇后大学电子与计算机工程学院在读硕士生. 主要研究方向为 MIMO, Cooperative diversity networks 和 Cross-layer optimization.