

一种适用于多用户 OFDM 系统下行链路的跨层设计调度算法

马月槐^{①②} 张冬梅^① 蔡跃明^① 徐友云^①

^①(解放军理工大学通信工程学院无线通信系 南京 210007)

^②(总参通信训练基地卫星教研室 宣化 075100)

摘要: 该文提出了一种适用于多用户正交频分复用(OFDM)系统下行链路的调度算法, 基于跨层结构设计, 并分别考虑了媒体接入控制(MAC)层的用户服务质量(QoS)要求、用户公平性、数据包队列状态信息以及物理层的信道状态信息(CSI)和功率约束等。多用户 OFDM 系统可以通过该调度算法充分利用 MAC 层和物理层的不同参数特性, 在保证用户 QoS 的同时最大化频谱的利用效率。仿真结果表明, 在小区内各个移动用户具有不同的接收 SNR 的情况下, 该算法具有服务质量随信噪比波动平缓、丢包率低、实现复杂度低等特点。

关键词: 多用户 OFDM 系统; 队列状态信息; 跨层调度算法; QoS

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)02-0421-05

A Cross-Layer Scheduling Algorithm for Downlink of Multi-user OFDM System

Ma Yue-huai^{①②} Zhang Dong-mei^① Cai Yue-ming^① Xu You-yun^①

^①(Department of Radio Communication, ICE, PLAUST, Nanjing 210007, China)

^②(Satellite Staff Room, Communication Training Base of General Staff Headquarters, Xuanhua 075100, China)

Abstract: A cross-layer scheduling algorithm for downlink of multi-user OFDM system is proposed, the algorithm considers user's QoS requirement, fairness, packet queue state information of MAC layer and channel state information, power constraint of physical layer. Multi-user OFDM system can make efficient use of different parameter characters of the both layers through the proposed algorithm, to achieve the goal of guarantee user's QoS and maximize wireless resource utility efficiency. Simulation results show that when mobile users have different receive SNR, the proposed algorithm has steady QoS, low drop rate and low complexity.

Key words: Multi-user OFDM system; Queue state information; Cross-layer scheduling algorithm; QoS

1 引言

在后三代(B3G)无线通信系统中, 普遍认为 OFDM 技术在对抗多径信道引起的频率选择性衰落上有良好的性能^[1], 最近, 无线资源管理技术在多用户 OFDM 系统中的应用引起了广泛的兴趣, 成为研究的一个热点^[2-4], 文献[2]研究了多用户 OFDM 环境下的自适应子载波、比特和功率分配以达到最小化发送功率的目的, 但是文中基于拉格朗日(Lagrange)的最优化分配算法由于其复杂性, 很难应用在实际系统中。随后相继出现了许多更加有效的资源分配算法^[3,4], 使系统性能在与文献[2]相差不大的情况下分配的复杂性和执行时间大大降低。然而, 随着无线数据包类型的接入服务(Wireless Packet Access Services, WPAS)的出现, 新的问题开始凸现, 原因在于现有的绝大部分资源分配和管理策略主要是从物理层角度出发进行研究的, 这些算法没有考虑用户队列的等待数据量、数据包到达随机性、数据包传输时延、不同业务类型等一些上层因素, 因此不能直接应用在基于包

传输的无线系统中^[5]。而应用于多用户 OFDM 系统中的基于跨层设计的调度算法目前还不多见, 文献[6]提出了一种联合物理层和 MAC 层的调度算法, 但是此算法只有当小区内所有移动用户均具有相同且较高的接收信噪比(receive SNR)时, 在丢包率和时延等方面相对于仅在单层考虑的调度算法才有较好的性能表现。而实际系统中, 由于用户的移动性, 无线信道的不稳定性以及其他用户的干扰等一些不可避免的因素存在, 使得各个用户的接收信噪比往往是随时间动态变化的, 这就要求系统能够克服信噪比的变化提供给用户相对稳定的、可以接受的 QoS, 而文献[6]中算法对高接收信噪比的依赖导致其实用性不强。

在文献[6]的基础上, 本文提出一种适用于多用户 OFDM 系统下行链路的调度算法, 基于跨层结构设计, 算法分别考虑了 MAC 层的用户 QoS 要求、用户公平性、数据包队列状态信息以及物理层的信道状态信息和功率约束。调度过程首先在 MAC 层根据各个用户队列中的包数量和队首数据包等待时延来动态调整各用户分组业务的优先级, 然后在物理层采用自适应分配策略对无线资源进行合理的利用, 以提高频谱效率, 调度算法和资源分配算法通过跨层设计紧密联系。

2006-09-26 收到, 2007-04-11 改回

国家自然科学基金(62672079)和江苏自然科学基金(BK2006701)资助课题

仿真结果表明:本文所提算法和文献[6]所提算法相比,在包传输时延、丢包率等性能指标上随接收信噪比变化比较平缓,且在可接受的范围内,而实现复杂度却大大降低。

文章后续部分安排如下:第2节描述了多用户OFDM系统的模型,第3节给出了系统在MAC层和物理层的业务调度与资源分配策略,第4节进行了数据的仿真与比较,最后第5节是结束语。

2 系统模型

考虑支持 K 个用户和 L 个子载波的 OFDM 系统下行链路,在单小区内,所有用户均匀分布,原则上,如果能够独立地分配每个子载波,将可以达到用户间最理想的资源调度,但在实际系统中,子载波的数目往往比较多,如果独立控制所有的子载波并使资源分配过程在每一个子载波上进行,造成的高复杂度运算和大量信令开销使得调度和分配过程难以在实际中实施。为了减少控制信息量,简化资源分配过程,本文把相邻若干子载波分为一簇形成一个子信道,按簇进行反馈和调度,假设 L 个子载波相等地划分成 N 个子信道^[7],每个子信道小于无线系统的相关带宽,使得由子载波组成的子信道几乎为平衰落信道,在每个子信道上可以采用自适应调制与编码(AMC)技术以有效利用频谱。系统时间以帧为单位进行划分,同时每一帧又可细分为 S 个时隙,假设每个子信道在每一帧内信道增益保持不变,在每一帧的开始,基站根据用户反馈信息来估计下行链路中每个子信道的 CSI。根据系统的二维可分配资源(子信道、时隙)把下行共享信道划分成多个时频单元作为资源分配的最小单位,即在频率上占用一个子信道,在时间上占用一个时隙,不同的时频单元可以通过 (n,s) 来标识,其中 $n(1 \leq n \leq N)$, $s(1 \leq s \leq S)$ 分别代表子信道序号和帧内时隙序号,这样一帧内总共有 $N \times S$ 个时频单元,且每个时频单元在此帧内最多只能被一个用户占用。

帧内用户在 MAC 层的 QoS 通常通过数据吞吐量、数据包丢失/错误率、时延性能等来衡量,在 IEEE802.16 标准中,业务分为 4 类:主动授权业务、实时查询业务、非实时查询业务、尽力而为业务,分组调度的优先级依次由高到低,其

中前两种业务需要保证速率和时延,而后两种业务只需保证一定的速率。在本文的模型中,把用户的数据业务类型综合考虑成两类:实时(Real-Time, RT)业务和非实时(Non Real-Time, NRT)业务,RT 业务一般包括音频、视频流等,需要保持一个最低限度的数据传输速率并需保证大部分的包传输时延在要求的阈值以内。NRT 业务,包括网页浏览,文件传送,邮件发送等,对时延的敏感性相对较弱,所以在调度时可以更具灵活性,但不论 RT 业务还是 NRT 业务都有一个可以忍受的最低限度的数据包丢失/错误率,调度算法在保证 RT 业务 QoS 的同时要尽量提高 NRT 业务的数据流量、降低时延和丢包率。

多用户 OFDM 系统中数据包的调度和系统资源的分配在基站处实施,基站(发射端)的结构如图 1 所示,在基站的 MAC 层,每个用户分到一个独立的缓存,用户到达的数据包依次在缓存排列,并按照先进先出的原则等待发送。在每一帧的开始,调度器综合考虑队列中等待数据量和数据包传输时延等因素,根据某种调度规则确定要发送的数据包的优先级,在物理层基站通过用户反馈的信息估计此帧内下行共享信道的 CSI,并根据 MAC 层调度的结果来为每个用户分配时频单元,然后数据包在物理层进行编码、调制、IFFT、并串变换等步骤后在不同的子载波上进行传输。时频单元分配结果的相关信息通过独立的控制信道从基站发送到用户端,以使用户能够根据从子载波中提取相应数据的数据信息。注意到实际真正分配的过程都是在物理层发生的,MAC 层所需的信道状态信息与 QoS 仅仅是确定数据包发送的优先级。

3 跨层调度算法描述

3.1 MAC 层数据包调度

本文所提的跨层调度算法包括在 MAC 层的数据包调度策略和在物理层的动态自适应无线资源分配算法,算法最终优化的目标是:(1)保证用户的 QoS 要求,包括数据传输速率和传输时延;(2)保证用户业务之间的比例公平;(3)最大化频谱利用率。

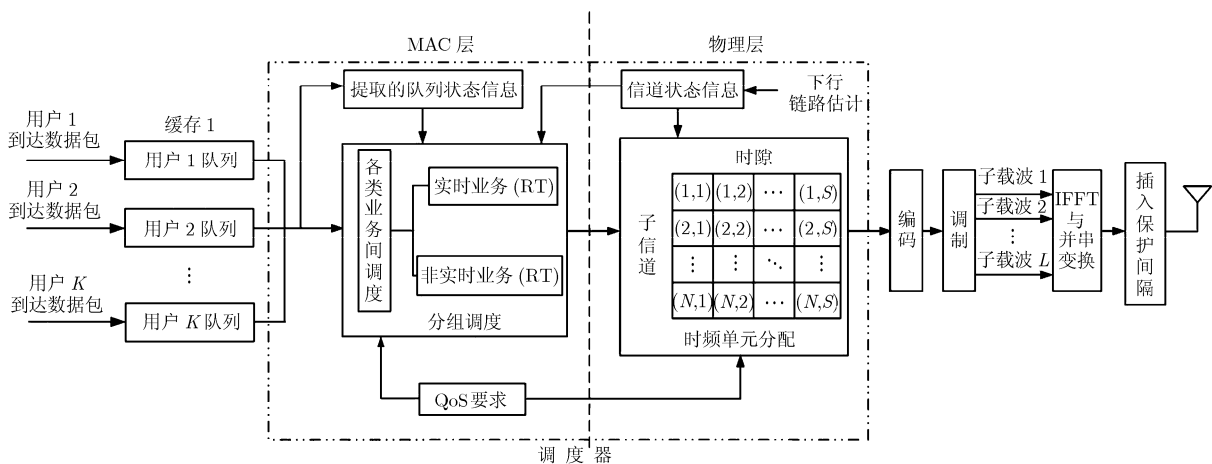


图1 基站(发射端)结构图

对于数据包的调度,已经有算法能同时支持 RT 业务和 NRT 业务的调度^[8,9],但很多都不适用于多用户 OFDM 系统。尽管 NRT 业务对时延的敏感性相对较弱,但是诸如网页浏览、邮件发送等一些 NRT 业务服务如果时延过长也将使用户无法忍受,在文献[6]中为了在保证 RT 业务 QoS 的同时尽量改善 NRT 业务的质量,在调度的初始把两种业务均定义为低优先级,把 RT 业务数据包等待时间接近其时延阈值时的状态定义为紧急状态(emergency condition),只有当 RT 数据包处于紧急状态时调度器才将其变为高优先级进行优先调度,而非紧急的 RT 数据包和 NRT 数据包则一直处于低优先级状态公平的调度。调度的过程分 3 个步骤:第 1 步调度处于紧急状态的 RT 数据包,调度器把等待时延最接近阈值的 RT 数据包定义为最高优先级;第 2 步调度非紧急的 RT 数据包和 NRT 数据包,认为两种业务此时具有平等的地位而把高优先级分给对应信道质量较好的业务分组;第 3 步中,如果时频单元还有剩余的话,则把剩余的时频单元按比例分给前两步分配后仍需要额外资源的用户。用户在每一步中分得的时频单元数量之和以及每个时频单元上承载的比特数决定了用户的传输速率,具体调度过程可以详见文献[6]。

在上述调度过程的第 2 步中,RT 业务和 NRT 业务仅仅根据对应信道质量的好坏来决定调度的优先级,这有可能导致信道质量较差的用户长时间得不到服务,为了克服这一缺点,本文在采用上述调度流程的基础上对第 2 步做出改进,综合考虑信道质量和用户队列中的待发数据包数,信道质量可以等效为对应的信噪比 $\gamma_k(t)$, $U_k(t)$ 定义为用户 k 队列中待发数据量,则用户的服务优先级 $I_k(t)$ 可以表示为

$$I_k(t) = \alpha \gamma_k(t) U_k(t) \quad (1)$$

式(1)中 $\alpha > 0$ 为常数,用两者的乘积作为确定优先级的依据,这样与仅考虑信道质量相比大大提高了用户之间的公平性。

3.2 物理层自适应分配策略

MAC 层调度的结果为数据包发送的优先级和分配给每个用户的传输速率,真正的资源分配是在多用户 OFDM 系统的物理层,可以根据每个用户的信道状况来动态地分配子信道和时隙。我们的目标是在满足每个用户 QoS 的同时使频谱效率最大化,则资源的自适应分配可以用数学方法表示如下:

$$\max \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K x_{k,n,s} b_{k,n} \quad (2)$$

$$\text{条件: } \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K x_{k,n,s} b_{k,n} \geq r_k, \quad \forall k \quad (3)$$

$$x_{k,n,s} \in \{0,1\} \text{ 且 } \sum_{k=1}^K x_{k,n,s} \leq 1, \quad \forall n, s \quad (4)$$

其中 $k(1 \leq k \leq K)$, $n(1 \leq n \leq N)$, $s(1 \leq s \leq S)$ 分别代表用户序号索引、子信道序号索引和 OFDM 符号索引, $x_{k,n,s}$ 为时频单元分配指示变量,当 $x_{k,n,s} = 1$ 时,表示第 n 个子信

道的第 s 个时隙分给了用户 k ,相反当 $x_{k,n,s} = 0$ 时表示未分给用户 k 。定义 r_k 为用户 k 的要求速率, $b_{k,n}$ 为在第 n 个信道上每个 OFDM 符号的传送比特数,可以通过式(5)计算:

$$b_{k,n} = \left\lfloor \log_2 \left(1 + \frac{|h_{k,n}|^2 P_{\text{total}}}{N_0 \Gamma N \cdot M} \right) \right\rfloor M \quad (5)$$

其中 M 定义为每个子信道(每一簇)包含的子载波数目, $h_{k,n}$ 代表第 n 个子信道上用户 k 的信道增益。 N_0 是单边功率谱密度, P_{total} 为总的发送功率,在这里假设 P_{total} 在所有子信道上平均分配,当系统采用 MQAM 调制时, $\Gamma = -\ln(5 \cdot \text{BER})/1.5$ 。

显然,根据信道增益计算出 $b_{k,n}$ 的值以后,式(2)–式(4)变成了只含变量 $x_{k,n,s}$ 的线性优化问题,可以采用 Hungary 算法求解,但是在求解过程中需要考虑的限制条件仍然导致其复杂度高达 $O(n^4)$ 。为此我们可以用次优的动态分配算法在系统性能下降不大的情况下使分配的时间减少到可接受的范围内。

文献[6]中提出的物理层分配算法包括两部分:首先第 1 步是预分配,把子信道分给具有对应信道状况较好的用户而不考虑用户的业务类型和优先级;第 2 步是再分配,即把部分时频单元在用户间调整以最大限度地满足各个用户的 QoS。上述算法在第 1 步预分配时仅考虑了信道状态信息而没有考虑用户的队列状态信息,这在实际应用中是很难成立的,例如当一个用户的信道质量较好时,按照上述算法此用户将被分到很多的子信道或时频单元,但是该用户缓存中的数据队列可能是空的或者只有很少的数据包等待发送;相反有些信道质量较差的用户分到的资源可能远远小于在 MAC 层中决定的速率传输要求。尽管在第 2 步的再分配中会在用户之间以 QoS 为依据进行时频单元的调整,但是预分配时 CSI 和队列状态信息的分离会导致再分配时大规模的时频单元分配交换,这就明显增加了算法的执行时间和复杂度。

为了避免时频单元的再分配并且保证每个用户及其业务公平享用带宽资源,本文提出了一种根据 MAC 层调度决定的用户数据包优先级来直接分配时频单元的算法,算法分为两步:

步骤 1 首先保证处于紧急状态的数据包有足够的无线资源来发送,在所有有紧急数据包待发送的用户中,按照 MAC 层调度器决定的优先级来给用户分配时频单元,分配依照时频单元分给对应信道质量最好的用户的原则,但是每次最多分配 S 个时频单元给一个用户,如果所分的时频单元还没有达到 QoS 要求,待所有紧急用户第 1 次分完之后再继续按照优先级由高到低的顺序进行分配,仍然遵循每次分配每个用户最多分得 S 个时频单元的原则,如此循环直到用户分得的时频单元总数达到发送紧急数据包的要求。

步骤 2 如果第 1 步分配完毕后仍有剩余的时频单元,则按照 MAC 层调度算法第 2 步中决定的用户优先级进行时

频单元的分配。分配的方法同步骤 1，直到分得的时频单元数达到 QoS 要求或者没有更多的时频单元可以分配。

4 仿真结果与比较

考虑单小区内载波传输带宽为 5MHz 的多用户 OFDM 系统，总的子信道数目为 $N=64$ ，每个子信道由 10 个子载波合并组成，每一帧包含时隙数目为 $S=10$ ，帧长为 1ms，目标误比特率设为 10^{-6} 。本文使用 COST207 中的城区模型^[10]作为无线信道模型进行仿真，时延扩展 $\gamma = 2.5\mu s$ 。在仿真中我们认为一半的用户承载 RT 业务而另一半用户承载 NRT 业务，每种业务的平均速率是 400kbps，RT 业务与 NRT 业务的数据包大小分别为 200byte 和 1600byte。数据包以固定的时间为间隔到达基站发射端，通过比较本文所提算法与文献[6]所提算法在各种信噪比范围内分组业务的传输时延、丢包率以及系统吞吐量等性能指标来综合评估两种算法的优劣。

图 2 给出了两种算法在调度 RT 业务数据包时的丢包率，从图中可以看出，尽管文献[6]所提算法在高信噪比(15dB, 10dB)时能够达到几乎理想的零丢包率，但是当信噪比较低(5dB)且用户数大于 36 时，系统的丢包率急剧上升，当用户数超过 42 时丢包率已大于 0.2，这对用户来说是无法忍受的。在实际中会产生当用户位置或传播环境的改变等因素造成用户的接收信噪比降低时，其服务质量产生剧烈变化，这种不同信噪比下产生的丢包率的巨大差异是实际系统中是应该绝对避免的。而本文所提算法不论在任何信噪比范围内，RT 业务的丢包率都在 0.2 以下，当用户数小于 36 时仍能达到较理想的丢包率，而当用户数大于 36 时系统丢包率随用户数的增加而缓慢变化。

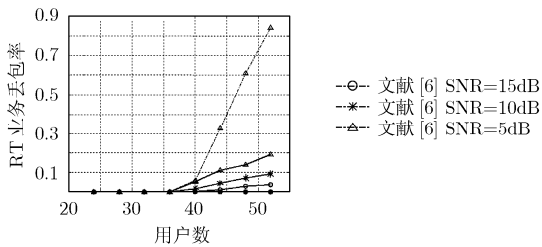


图 2 随用户数变化时 RT 业务丢包率比较曲线

图 3 比较了两种算法调度 RT 业务分组的平均时延，从图中可以看出，虽然在 15dB 的高信噪比时，文献[6]的分配算法能够达到较低的时延，但是当系统所承载的用户数大于 36 时，RT 业务分组的平均时延急剧增加，而本文所提算法在 3 种信噪比下时延性能比较接近，不会产生因为信噪比的改变而导致时延的巨大变化。图 4 比较了两种算法在调度 NRT 业务分组时的平均时延，与图 3 相比，除 NRT 分组的整体是时延大于 RT 分组外，曲线的变化趋势和基本相同，本文算法的时延在大范围的信噪比内都比较接近，而文献[6]所提算法的时延差异仍然很大，从而可能造成服务质量的剧

烈变化。

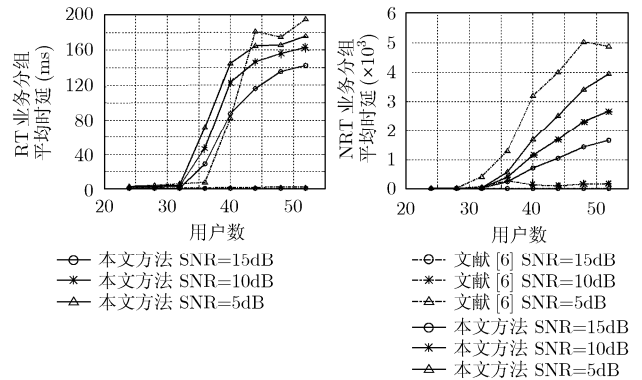


图 3 随用户数变化时 RT 业务平均时延比较曲线

图 4 随用户数变化时 NRT 业务平均时延比较曲线

图 5 对两种算法在不同业务上的所获得的系统吞吐量进行了比较，可以看出，随着用户数的增加，两种算法下的 RT 业务分组均成近似线性增加的趋势，而对于 NRT 业务当用户数超过 32 时成近似平稳的变化趋势，但不论是何种业务分组，两种算法所获得的吞吐量相差不大，特别是系统中的用户数较少时，两种算法所获得的吞吐量几乎一致。所以不论是在各种具体业务分组还是在系统总量上，本文中所提的算法和文献[6]相比可以达到同样的频谱利用率。

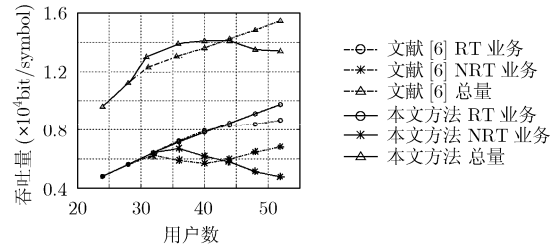


图 5 随用户数变化时系统吞吐量比较曲线

图 6 比较了两种算法在进行各自子信道分配时所耗时间，注意这里的时间仅仅代表了计算机在进行子信道分配仿真时，操作流程运算所耗时间，而不是实际系统中调度器进行调度和分配的时间，但是从这里我们仍可以比较出两种算法的运算负担及复杂度，可以看出，本文所提算法在计算复杂度上优于文献[6]所提算法。

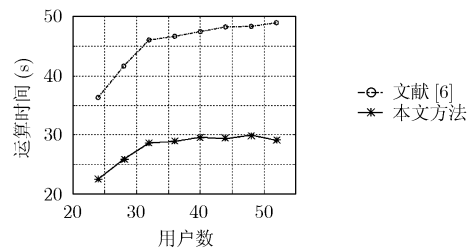


图 6 随用户数变化时运算时间比较曲线

5 结束语

本文研究了多用户 OFDM 系统中基于跨层设计的调度算法,算法分别在 MAC 层进行数据包优先级的调度和在物理层采用自适应分配策略对无线资源进行充分的利用。仿真结果表明,与文献[6]相比在系统吞吐量相差不大的情况下,本文所提算法能够在各种信噪比范围内获得更稳定的服务质量,且算法复杂度较低。如何结合多天线的多用户 MIMO-OFDM 系统中形成三维的可分配资源单元(天线、子信道、时隙),以进一步增加传输速率,是下一步有待研究的问题。

参考文献

- [1] Berezdivin R, and Breinig R, *et al.* Next-generation wireless communications concepts and technologies. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(3): 108-116.
- [2] Wong C, Cheng R, and Letaief K, *et al.* Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. *IEEE Selected Areas in Communications*, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [3] Zhang Y J and Letaief K. Multiuser subcarrier and bit allocation along with adaptive cell selection for ofdm transmission. *IEEE International Conference on Communications*, New York, USA, Apr. 2002, Vol.2: 861-865.
- [4] Kivanc D, Li G, and Liu H. Computationally efficient bandwidth allocation and power control for ofdma. *IEEE Trans. on Communications*, 2005, 53(1): 107-116.
- [5] Zhang Y J and Letaief K. Adaptive resource allocation and scheduling for multiuser packet-based OFDM networks. in *Proc. IEEE ICC*, Paris, France, Jun. 2004: 2949-2953.
- [6] Jeong S S, Jeong D G, and Jeon W S. Cross-layer design of packet scheduling and resource allocation in OFDMA wireless multimedia networks. *IEEE Vehicular Technology Conference 2006-Spring*, Melbourne, Australia, 2006, Vol.1: 309-313.
- [7] Novak R and Krzymie'n W A. SS-OFDM-F/TA system packet size and structure for high mobility cellular environments. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Jeju, Korea, Apr. 2003: 1438-1444.
- [8] Ajib W, Haccoun D, and Frigon J F. An efficient QoS-based scheduling algorithm for MIMO wireless systems. *VTC-2005-Fall*. 2005 IEEE 62nd, Dallas, USA, Sept. 2005, Vol.3: 1579-1583.
- [9] Kountouris M, and Pandharipande A, *et al.* QoS-based user scheduling for multiuser MIMO systems. *VTC 2005-Spring*. 2005 IEEE 61st, May 2005, Vol.1: 211-215.
- [10] 杨大成. 移动传播环境. 北京机械工业出版社, 2003. 8.

马月槐: 男, 1981年生, 硕士生, 研究方向为移动通信系统及无线资源管理技术.

张冬梅: 女, 1972年生, 讲师, 研究方向为移动通信、无线资源管理技术.

蔡跃明: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信中的信号处理、无线资源管理技术等.

徐友云: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为下一代移动通信关键技术、无线网络等.