

双参数跨层自适应资源分配算法研究

侯 华 周武旸 朱近康

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系 合肥 230027)

摘 要: 针对多用户 OFDM 系统, 该文提出了一种适合于混合业务的双参数跨层自适应资源分配方案, 它只需调整时延补偿因子和吞吐量补偿因子两个参数, 就可将现有的调度算法灵活高效地应用于系统中。仿真结果表明, 该方案可以灵活地在系统功率效率和用户服务质量满意度之间取得折衷, 并保证不同类型业务用户间的公平性。

关键词: OFDM 系统; 双参数跨层自适应资源分配; 子载波-功率联合分配; 混合业务

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2565-05

Research on Double Parameters Cross-layer Adaptive Resource Allocation Algorithm

Hou Hua Zhou Wu-yang Zhu Jin-kang

(Dept of Electron. Eng. & Info. Sci., Univ. of Sci. & Tech. of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A double parameters cross-layer adaptive resource allocation scheme for multiuser OFDM system with heterogeneous types of traffic is proposed in this paper. By dynamically adjusting values of the two parameters: "delay compensatory factor" and "throughput compensatory factor" respectively, existing scheduling algorithms can be utilized flexibly and efficiently in the OFDM system. Simulations show that the scheme can achieve diverse levels of tradeoff between system power efficiency and traffic QoS satisfaction flexibly and fairness among different types of traffic can be guaranteed.

Key words: OFDM system; Double parameters cross-layer adaptive resource allocation; Subcarrier-power allocation; Heterogeneous types of traffic

1 引言

下一代无线通信系统必须能够满足多种业务的需求, 由于不同业务的服务质量(Quality of Service, QoS)要求不同, 因此只有将有限的频谱资源合理地分配给具有不同业务的用户, 才能获得较高的利用率, 同时保证用户的满意度、用户公平性以及系统资源利用的高效性, 实现系统性能的跨层优化^[1]。

单载波系统中的调度算法^[2-5]研究已经比较深入, 但如果将这些算法直接应用于 OFDM 系统会遇到很多问题: (1)不能体现子载波间传输能力的差异, 无法获得频率分集增益^[6, 7]; (2)无法将频率分集增益和多用户分集增益有效地结合, 降低了系统效率。此外, 这些算法不能够实现对混合业务的灵活调度, 它们没有考虑业务到达的随机特性、用户队列状态、用户在媒体接入控制(Media Access Control, MAC)子层对服务质量的要求等, 因而很难为用户提供满意的服务。

文献[6-9]的子载波、比特和功率分配部分, 分别采用了 MAX C/I 算法^[2]或正比公平(Proportional-Fair, PF)算法^[3], 但它们没有考虑 MAC 的动态特性和分组时延约束。文献[10]提出了一种用于 OFDMA 系统的调度算法, 用户的优先级因

子局限于单载波系统中的 PF 调度因子^[3], 且限制一个用户仅使用一个子载波。

本文提出了一种双参数跨层自适应资源分配方案, 它可以将已有的调度算法灵活高效地应用于具有混合业务的多用户 OFDM 系统下行链路。该方案不仅考虑了 MAC 层特性, 还考虑了物理层无线信道的时变特性和业务对误包率的要求等。通过调整“延时补偿因子 α ”和“吞吐量补偿因子 β ”, 该算法可以灵活地在系统功率效率和各用户服务质量满意度之间取得折衷, 并保证不同类型业务接收到的服务质量的公平性, 满足多用户多业务的 QoS 要求。

2 系统描述

图 1 为采用了双参数跨层自适应资源分配的多用户 OFDM 基站侧系统框图。每个用户只有一种类型的业务。系统带宽为 B , 处于激活期的用户数为 K , 子载波数为 N 。

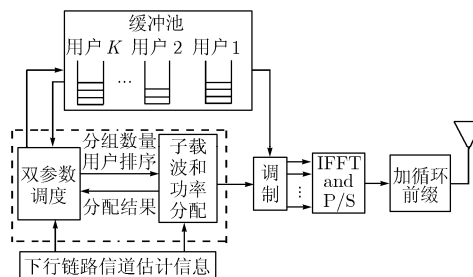


图 1 多用户 OFDM 基站侧系统框图

2007-05-08 收到, 2007-10-16 改回

国家 863 计划项目(2006AAA01Z266), 国家自然科学基金(60572066), 安徽省自然科学基金(070412044)和华为公司资助课题

假设移动台可以获得完备的下行信道状态信息,并通过无差错的反馈信道将该信息及时汇报给基站。

在物理层,时域上的一帧被分作控制部分和数据部分,分别包括 N_c 和 N_d 个 OFDM 符号。资源分配结果通过控制部分发送给移动台。移动台根据分配信息,提取信号并作相关处理。系统采用 OFDMA 多址方式。在 MAC 层,基站为每个用户分配独立的容量有限的数据队列,队列的服务次序是先到先服务。

资源分配算法包括双参数调度和自适应子载波-功率联合分配两部分。双参数调度算法根据子载波-功率联合分配算法的反馈信息更新用户队首分组时延,再根据用户队首分组时延与该用户业务可以忍受的最大分组时延之间的关系,自适应地为分组排序;子载波-功率联合分配算法根据调度算法提供的排序结果、各用户的信道状态信息和用户缓存中的分组数量,依次为分组分配子载波和相应子载波的发送功率,最后将每个用户发送的分组数量反馈给调度模块。

3 双参数跨层自适应资源分配算法

3.1 双参数调度(DPS)

对于具有时延约束的业务而言,服务质量满意度常以时延来衡量。如果可以保证用户队列中各分组的等待时延都小于其可以忍受的最大分组时延,那么用户的丢包率就可以被最小化。此外,减小平均分组等待时延,可以提高用户对系统的满意度。

为了对等待时延较长的用户进行补偿,该算法将用户分作两类,一类是紧急用户,一类是非紧急用户。由于不同类型的业务具有不同的时延要求,从公平性的角度考虑,当且仅当用户 k 的队首分组时延满足条件

$$D_k[i] \geq \lceil \alpha_k (D_k^{\max} - T_f) \rceil \quad (1)$$

时,该用户才被称作紧急用户,除紧急用户之外的其他用户被称作非紧急用户。其中 $\lfloor x \rfloor$ 表示下取整, T_f 是帧长, D_k^{\max} 是用户 k 的分组可以忍受的最大时延, α_k 是延时补偿因子, $0 \leq \alpha_k \leq 1$ 。 α_k 越小,用户 k 被称作紧急用户需要满足的时延要求越低。

对于业务类型相同的用户而言,紧急用户相对于非紧急用户已经等待了更多的时间,因此基站应先调度分组发送给紧急用户。任意一个紧急用户队列中的分组又被分作两部分:一部分是补偿分组,具有较高的优先级;另一部分是非补偿分组,具有较低的优先级。为了保证用户间的公平性,基站向紧急用户 k 发送的补偿分组的数量满足条件

$$PS_k[i] \triangleq \max \{ \lfloor \beta_k * Q_k[i], 1 \rfloor \} \quad (2)$$

其中 $Q_k[i]$ 是在第 i 帧的起始时刻用户 k 队列中剩余的分组总数; β_k 是吞吐量补偿因子, $0 \leq \beta_k \leq 1$,反映了基站对紧急用户的补偿力度。 β_k 越大,紧急用户 k 队列中补偿分组所占的比重越大。

确定分组间优先级的规则如下:

(1)补偿分组的优先级高于非补偿分组;

(2)紧急用户队列中的非补偿分组与非紧急用户队列中的分组具有相同的等级;

(3)对于等级相同的分组,高优先级用户队列中的分组的优先级高于低优先级用户队列中的分组;用户的优先级效用函数表征^[2-5];

(4)同一个用户队列中等级相同的分组的服务次序是先到先服务。

基于该规则,调度算法可以得到一个分组排序队列,该队列的标签记录了相应的用户标识符和分组标识符。

3.2 自适应子载波-功率联合分配(ASPA)

设 $A_{i,n}^k = 1$ 表示用户 k 在第 i 帧的数据由第 n 个子载波发送,对于任意子载波 n ,当 $A_{i,n}^k = 1$ 时,有 $A_{i,n}^{k'} = 0, \forall k' \neq k, k, k' \in [1, K]$ 。设在一个 OFDM 符号时间里各子载波上的噪声功率为 σ^2 ,基站的发射功率为 S_{\max} , $h_{i,n}^k$ 是在第 i 帧对用户 k 而言的第 n 个子载波上的信道增益,子载波使用固定的 M-QAM 调制方式,每个子载波在一个 OFDM 符号时间内发送的比特数为 $b = \log_2^M$ 。对于给定的误比特率(BER)要求,在一个 OFDM 符号时间内要求达到的接收信噪比为 $f(b)$ 。可以求出在第 i 帧时间内基站的发射总功率为

$$S_i = \sum_{k=1}^K S_i^k = N_d \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{f(b)}{|h_{i,n}^k|^2} A_{i,n}^k \sigma^2 \quad (3)$$

其中 $f(b)$ 使用 $b = \log_2 \left(1 + \frac{f(b)}{\Gamma} \right)$ 计算。对于 M-QAM 调制,

Γ 可以用 $\frac{1}{3} \left[Q^{-1} \left(\frac{\text{BER}}{4} \right) \right]^2$ 近似^[11]。

从前面的分析可以知道,该算法既考虑了物理层的时变特性和约束条件,又考虑了 MAC 层用户分组到达的随机特性和队列状态,因此发送给各用户的分组数量受两方面的约束:一是各用户的信道质量和基站发射功率;另一是各用户队列中等待发送的分组数量。设分组大小固定为 L_{pkt} (比特/分组),在第 i 帧,发送给用户 k 的分组总数不超过 $R_k^{\max}[i]$,那么

$$R_k^{\max}[i] = \min \{ Q_k[i], R_k^{\text{cur-est}}[i] \} \quad (4)$$

其中 $R_k^{\text{cur-est}}[i]$ 是假设所有的物理层资源都用于承载用户 k 的数据分组,那么在一帧时间内可以发送的分组总数,即

$$R_k^{\text{cur-est}}[i] = \lfloor bNN_d/L_{\text{pkt}} \rfloor \quad (5)$$

设在激活期分组的到达速率为 λ^{pkt} (分组/帧)。那么,在一帧时间内用户 k 队列中到达的分组总数为 $A_k = \lambda_k^{\text{pkt}} \times T_f$,基站为该用户分配的队列长度为 $Q_k^{\max} = \lfloor D_k^{\max} \cdot \lambda_k^{\text{pkt}} \rfloor$,其中 $\lceil x \rceil$ 表示上取整。根据排队论的相关知识,用户队列状态可以被描述为

$$Q_k[i] = \min \{ \lfloor Q_k[i-1] + A_k - R_k^{\text{real}}[i-1] \rfloor, Q_k^{\max} \} \quad (6)$$

其中 $R_k^{\text{cur-real}}[i]$ 是在第 i 帧时间内实际发送给用户 k 的分组总数,是需要反馈给调度模块的信息。

本文所提自适应子载波、功率联合分配算法可以用下面

的公式描述:

$$S_i = \sum_{k=1}^K S_i^k = N_d \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{f(\log_2^M)}{|h_{k,n}^k|^2} A_{i,n}^k \sigma^2 \quad (7)$$

约束条件:

$$A_{i,n}^k = 1, A_{i,n}^{k'} = 0 \quad \forall k \neq k', n \in [1, N] \quad (7a)$$

$$R_k^{\max}[i] = \min\{Q_k[i], R_k^{\text{cur-est}}[i]\} \quad (7b)$$

$$PS_k[i] \triangleq \max\{\beta_k * Q_k[i], 1\} \quad (7c)$$

$$S_i \leq S_{\max} \quad (7d)$$

$$A_{i,n}^k \in \{0, 1\} \quad (7e)$$

$$R_k^{\max}[i] \in \{0, 1, \dots, \min\{Q_k[i], R_k^{\text{cur-est}}[i]\}\} \quad (7f)$$

约束条件式(7a)保证每个子载波承载一个用户的数据, 式(7b)说明系统的传输能力既受物理层信道状态的约束又受 MAC 层用户队列状态的约束, 式(7c)说明了基站需要向紧急用户提供的补偿力度, 式(7d)是最大发射功率约束, 式(7e)和式(7f)表明 $A_{i,n}^k$ 和 $R_k^{\max}[i]$ 取非负整数。

在进行自适应子载波一功率分配之前, 基站需要根据用户反馈的信道状态信息, 将用户的子载波增益递减排列, 得到各用户的子载波增益递减序列。以用户 k 为例, 其子载波增益递减序列 $\{|h_{k,n}^k|^2\}_{n=1}^N$, 满足 $\forall n < m, n, m \in [1, N]$, 存在 $|h_{k,n}^k|^2 \geq |h_{k,m}^k|^2$ 。

自适应子载波、功率联合分配算法的步骤如下:

第 1 步 根据调度算法提供的分组排序队列, 选择第 1 个未分配到子载波的分组所归属的用户 k ;

第 2 步 按照 $\{|h_{k,n}^k|^2\}_{n=1}^N$, 依次为该分组分配处于空闲状态的增益最高的子载波, 直到该分组可以被发送出去, 或系统没有空闲子载波, 或者不满足基站发射总功率的约束;

第 3 步 判断系统是否还有空闲子载波, 如果没有, 分配完毕; 否则, 判断是否满足基站发射总功率的约束, 如果不满足, 分配完毕, 如果满足, 转第 4 步;

第 4 步 判断是否所有分组都可以被发送出去, 如果是, 分配完毕; 否则, 返回第 1 步;

4 效用函数的选取

4.1 已有的效用函数

MAX C/I 算法^[2]的目标是最大化系统吞吐量, 代价是破坏了用户间数据速率的公平性; PF 算法的目标是在系统吞吐量和用户数据速率之间取得折衷; 它们都只适用于非实时业务。指数(EXPOnential, EXP)算法^[4]适用于实时业务, 它是对 PF 算法因子进行了指数加权后得到的一种新的算法, 计算复杂度比较高且不适用于非实时业务。

4.2 选取的效用函数

由式(1)可知, 调整 α_k 可以控制对延时用户提供补偿的实时性; 由式(2)可知, 调整 β_k 可以控制对紧急用户提供补偿的力度。因此, 为用户选取效用函数时, 没有必要考虑其分组是否会因延时过大而被丢弃。这样, 以最大化系统吞吐量为目标时, 选择 MAX C/I 算法的效用函数较合适; 以最

大化系统吞吐量和用户数据速率公平性为目标时, 选择 PF 算法的效用函数较合适。

4.3 参数的选取

时延补偿因子反映了基站对延时用户提供补偿的实时性。 α_k 越小, 对延时用户的补偿越及时, 越不利于利用时域上的多用户分集增益。吐量补偿因子反映了频域上基站对紧急用户的提供补偿的力度。 β_k 越大, 对紧急用户的补偿力度越大, 越有利于利用频域上的多用户分集增益。

当系统中各种类型的业务的时延补偿因子和吞吐量补偿因子被设置成相等的数值时, 该算法可以保证不同类型业务用户之间接收到的服务质量的公平性(从该业务已经接收到的服务质量与其可以忍受的最差服务质量的比值的角度考虑)。通过将这两个参数设置成不同的数值, 可以在用户等待时延、丢包率、用户数据速率和系统功率效率之间得到不同的折衷, 从而满足不同的系统设计目标。

下面是该资源分配算法的一些特例:

$\alpha_k = 0, \forall k$: 所有的用户都是紧急用户, 没有为延时较长的用户提供较高的优先级;

$\alpha_k = 1, \forall k$: DPS 只将这样的用户称作紧急用户, 即如果用户的队首分组以及和该分组同时到达的所有分组在当前帧没有被发送出去, 它们就会被丢弃; 该情况被称作最急迫情况;

$\beta_k = 0, \forall k$: 为紧急用户提供最少补偿, 补偿力度与每个紧急用户的队列状态无关;

$\beta_k = 1, \forall k$: 为紧急用户提供最多补偿, 补偿力度是紧急用户队列中等待发送的分组总数;

$\alpha_k = 0, \beta_k = 1, \forall k$: 只考虑用户间的优先级而忽略同一个用户队列中分组间优先级, 是一种单载波系统的调度算法在多载波系统中最直接的应用;

$\alpha_k = 1, \beta_k = 0, \forall k$: 该算法为处于最急迫情况的用户提供最少的补偿, 一方面可以优先发送多个用户的队首分组, 另一方面增加了与队首分组同时到达的分组被丢弃的概率。

5 仿真结果和数值分析

在仿真中, 本文考虑一个带宽为 2MHz, 数据子载波数目为 64 的 OFDM 传输系统。其中, 最大多径时延为 10 μ s, 采用 QPSK 调制。信道采用 COST207 六径模型, 六径在 0~10 μ s 内等间隔分布。各径的功率谱密度满足通常的 Jake 模型。仿真中 $N_d = 32$, $L_{\text{pkt}} = 1280$ 。固定系统中的语音用户数和数据用户数分别为 5 个和 3 个。如文献[3], PF 算法滑动窗口长度为 1000 帧。

业务源模型采用 ON-OFF 两状态 Markov 过程。激活期和静默期相互独立且服从指数分布^[12]。从静默期到激活期的转移概率为 $\gamma = 1 - \exp(-T_f/t_1)$, 从静默期到静默期的转移概率为 $u = 1 - \exp(-T_f/t_2)$, 其中 t_1 和 t_2 分别为激活期和静默期的均值。当业务处于激活状态时, 数据以固定的速率达到。业务模型参数如表 1 所示。

表1 业务模型参数

系统参数	数值	系统参数	数值
语音平均突发长度	1.0s	语音平均静默长度	1.35s
语音允许的最大丢包率	0.001	语音允许的最大误包率	0.001
语音允许的最大延时	50ms	语音业务平均速率	64kbps
流媒体平均突发长度	5.0s	流媒体平均静默长度	4.05s
流媒体允许的最大丢包率	0.0001	流媒体允许的最大误包率	0.0001
流媒体允许的最大延时	600ms	流媒体业务平均速率	640kbps
数据平均突发长度	10.0s	数据平均静默长度	8.0s
数据允许的最大丢包率	0.0001	数据允许的最大误包率	0.0001
数据允许的最大延时	2s	数据业务平均速率	1.28Mbps

固定流媒体用户数为 2，比较他们的平均分组时延。从图 2 中可以看出，固定 $\alpha_k = \alpha_k$ ，当 $\beta_k = 0$ 时时延最大， $\beta_k = 0.5$ 时次之， $\beta_k = 1$ 时最小；固定 $\beta_k = \beta_k$ ，在 $\beta_k = 0$ 的情况下，当 $\alpha_k = 0$ 时时延最大， $\alpha_k = 0.5$ 时次之， $\alpha_k = 1$ 时最小；而在 $\beta_k = 0.5$ 或 1 的情况下，时延由大到小的情况依次是： $\alpha_k = 1$ ， $\alpha_k = 0.5$ 和 $\alpha_k = 0$ 。这样， $\alpha_k = 0, \beta_k = 1$ 和 $\alpha_k = 0, \beta_k = 0$ 分别是时延最小和最大的两种情况。当 $\alpha_k = 0$ 时，只要用户队列中的队首分组时延非零，该用户就可能成为紧急用户，基站也就可能优先调度这些用户的分组，从而使得平均分组时延最小；而在另外两类情况下，只有当用户队首分组时延超过了一定的门限时，调度算法才可能会优先调度该用户的分组。当 $\beta_k = 0$ 时，只有紧急用户的队首分组才是补偿分组，无法充分利用频域上的多用户分集增益，又由于频域资源的有限性和最大发射功率的约束，使得时域上的多用户分集增益的利用也不充分，因此在一帧时间内发送的分组数量最少，平均分组时延最大。当 $\beta_k = 1$ 时，在各用户的时延补偿因子相等的情况下，在时域上和频域上的多用户分集增益的利用都比较充分。

固定流媒体用户数为 2，比较他们的丢包率。如图 3 所示，固定 $\alpha_k = \alpha_k$ ，当 $\beta_k = 0$ 时丢包率最大， $\beta_k = 0.5$ 时次之， $\beta_k = 1$ 时最小；固定 $\beta_k = \beta_k$ ，在 $\beta_k = 0$ 的情况下，当 $\alpha_k = 0$ 时丢包率最大， $\alpha_k = 0.5$ 时次之， $\alpha_k = 1$ 时最小；而在 $\beta_k = 0.5$ 或 1 的情况下， $\alpha_k = 1$ 时丢包率最大， $\alpha_k = 0$ 时次之， $\alpha_k = 0.5$ 时最小。根据 Little 定理，在 $\alpha_k = \alpha_k$ 的情况下， β_k 越小，各用户需要优先发送的分组数量就越少，越无法充分利用频域上的多用户分集增益，在一帧时间内发送的分组数量就越少，丢包率也越高。在 $\beta_k = \beta_k$ 的情况下， α_k 越小，紧急用户的数量就越多，补偿分组所归属的用户也就越多； $\beta_k = 0$ 时，时域上和频域上的多用户分集增益的利用率随着 α_k 的增加而增大，丢包率也随之减小；当 $\beta_k = 0.5$ 或 1 时，补偿分组在用户缓存中所占的比重较大或很大，ASPA 算法会为较少的用户分配较多的资源，使得其余用户的分组

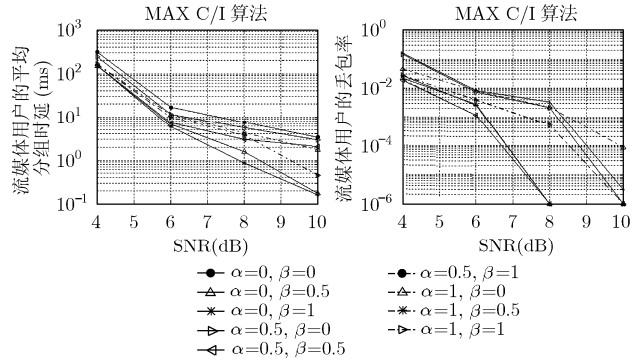


图2 流媒体用户的平均分组时延 图3 流媒体用户的丢包率

会因等待延时过大而被丢弃。 $\beta_k = 0$ 和 $\beta_k = 0.5$ 或 1 两类情况在时延补偿因子不同的情况下得到的不同性能，反映出时延补偿因子和吞吐量补偿因子对系统性能的相互作用，符合系统的时频二维资源特性。

图 4 给出了流媒体用户数为 2 时，在不同信噪的比情况下，分别采用 MAX C/I 算法和 PF 算法的效用函数时得到的语音用户的平均分组时延。可以看出，在接收信噪比相同的情况下，对于各种延补偿因子和吞吐量补偿因子的组合，使用 MAX C/I 算法得到时延总小于使用 PF 算法得到的时延。可见，与使用 PF 算法相比，使用 MAX C/I 算法既简单又可以得到较好的性能。

改变流媒体用户数量，观察数据用户的归一化数据速率。归一化数据速率定义为，用户数量相等时，在各种时延补偿因子和吞吐量补偿因子的组合情况下得到的用户数据速率与 $\alpha_k = 0, \beta_k = 0$ 时得到的数据速率的比值。从图 5 可以看出，在 $\alpha_k = \alpha_k$ 的情况下，当 $\beta_k = 0$ 时数据速率最低， $\beta_k = 0.5$ 时次之， $\beta_k = 1$ 时最高。因为，在时延补偿因子相等的情况下，吞吐量补偿因子越大，多用户分集增益越高，系统功率效率也越高。此外，随着流媒体用户数量的增加，数据用户的最高和最低归一化数据速率间的差值也逐渐增加。因为，一方面多用户分集增益随着用户数量的增加而增加；另一方面该文所提出的方法可以灵活充分地利用多用户分集，且在不同情况下对多用户分集增益的利用率也不同。

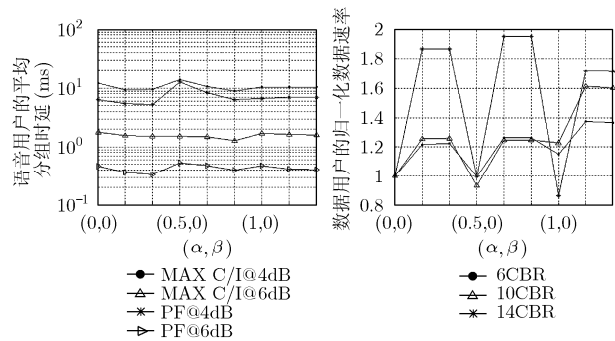


图4 语音用户的平均分组时延

图5 数据用户的归一化数据率(MAX C/I 算法)

6 结束语

本文提出的双参数跨层自适应资源分配方案, 适用于基于分组传输的多用户混合业务 OFDM 系统下行链路。通过调整时延补偿因子和吞吐量补偿因子, 可以达到不同的优化目标, 或多目标间的折衷。此外, 该方案可以使得为单载波单一类型业务设计的调度算法, 同时适用于只具有实时业务、只具有非实时业务或具有混合业务的多载波系统。仿真结果表明, 对于实时业务, 当时延补偿因子和吞吐量补偿因子的数值都比较小时, 可以得到较小的平均分组延时。对于非实时业务或时延要求不很严格的业务, 较大的吞吐量补偿因子可以保证较低的丢包率和较高的数据速率。

参 考 文 献

- [1] Liu Qingwen, Zhou Shengli, and Giannakis G B. Cross-layer modeling of adaptive wireless links for QoS support in heterogeneous wired-wireless networks, *ACM/Kluwer Journal on Wireless Networks*, 2006, 12: 427-437.
- [2] Kaya O and Ulukus S. Ergodic sum capacity maximization for CDMA: Optimum resource allocation. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2005, 51(5): 1831-1836.
- [3] Kushner H J and Whiting P A. Convergence of proportional-fair sharing algorithms under general conditions. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2004, 3(4): 1250-1259.
- [4] Shin O and Lee K B. Packet scheduling over a shared wireless link for heterogeneous classes of traffic. In *Proc. of IEEE International Conference, France*, 2004, 1: 58-62.
- [5] Liu X, Chong E K P, and Shroff N B. Opportunistic transmission scheduling with resource-sharing constraints in wireless networks. *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, 2001, 19(10): 2053-2064.
- [6] Wong C Y, Cheng R S, and Lataief K B, *et al.* Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. *IEEE Journal. on Selected Areas. Communication*, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [7] Rhee W and Cioffi J M. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation. *Proc. VTC 2000Spring, Tokyo, May 2000*: 1085-1089.
- [8] Seo H and Lee B G. Proportional-fair power allocation with CDF-based scheduling for fair and efficient multiuser OFDM systems. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2006, 5(5): 978-983.
- [9] Sue C, Park S, and Cho Y. Efficient algorithm for proportional fairness scheduling in multicast OFDM systems. *VTC 2005-Spring, Stockholm, May 30-June 1, 2005*: 1880-1884.
- [10] Ryu S, Ryu B, and Seo H, *et al.* Urgency and efficiency based wireless downlink packet scheduling algorithm in OFDMA system. *VTC 2005-Spring, Stockholm, May 30-June 1, 2005*: 1456-1462.
- [11] Love D J and Heath Jr R W. OFDM power loading using limited feedback. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2005, 54(5): 1773-1780.
- [12] Swiderski J. Approximate performance analysis of heavily loaded slotted downlink channel in a wireless CDMA system supporting integrated voice/data services. *IEEE Trans. on Wireless. Commun.*, 2005, 4(2): 484-494.

侯 华: 女, 1980 年生, 博士生, 研究方向为移动通信、无线资源管理。

周武旸: 男, 1972 年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为移动通信、个人通信、通信中的信号处理。

朱近康: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信与无线通信、扩频通信、通信中的信号处理。