

多用户 MIMO-OFDM 系统基于 QoE 效用函数的跨层资源分配

王大鸣, 陈松, 崔维嘉, 王强

(解放军信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 对多用户 MIMO-OFDM 系统下行链路的资源分配问题进行了研究。依据实时 (RT, real-time) 和非实时 (NRT, non real-time) 业务的不同特点分别设计了 QoE 效用函数, 并提出一种基于 RT & NRT QoE 效用函数的跨层资源分配算法。该算法利用所设计的效用函数计算用户分得资源所贡献的 QoE 增量, 并根据由 QoE 增量确定的用户优先级完成时频资源块的分配, 进而通过“拟注水”方式对功率分配进行优化。仿真结果表明, 该算法相比已有算法在用户平均 QoE、实时业务平均分组时延、非实时业务平均分组丢失率以及系统和吞吐量方面的性能均得到了明显改善。

关键词: 多用户; 多入多出正交频分复用; 资源分配; 跨层; 用户感受质量效用函数

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)09-0175-09

QoE utility function-based cross-layer resource allocation in multi-user MIMO-OFDM systems

WANG Da-ming, CHEN Song, CUI Wei-jia, WANG Qiang

(Information and System Engineering Institute, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Resource allocation problem was investigated for downlink multi-user MIMO-OFDM systems. A QoE (quality of experience) utility function was given according to the characteristics of real-time (RT) and non real-time (NRT) services, and then a RT & NRT QoE utility function-based cross-layer resource allocation algorithm was proposed. The algorithm firstly used the designed utility function to calculate the delta QoE, which was offered by users got resource. Secondly, it classified users according to their delta QoE and then allocated time-frequency blocks. Thirdly, it optimized the power allocation result by implementing pseudo water flooding power allocation. Simulation results show that compared with the existing algorithm, the proposed algorithm is better in the user average QoE, average packet delay to real time services, average packet lost rate to non real time services as well as sum throughput of system.

Key words: multi-user; MIMO-OFDM; resource allocation; cross-layer; QoE utility function

1 引言

随着第三代移动通信 (3G, 3rd generation) 系统的全面普及商用, 数据业务逐渐上升至主导地位, 业务种类日趋丰富, 用户对无线通信系统服务提出了新的要求和挑战。未来无线通信系统除了尽可能满足用户爆发式增长的接入速率需求外, 将越来越重视用户对于各种业务的实际感受。跨层资源分配通过综合利用物理层、媒体接入控制 (MAC,

media access control) 层以及其他系统层的信息, 依据优化准则对系统资源进行分配。它能够提高系统整体性能, 有利于保证用户对不同类型多媒体业务的使用感受, 在未来无线通信系统中受到广泛关注^[1-3]。

跨层资源分配符合无线通信网络扁平化的发展趋势, 近年来一直是热点。文献[4]提出一种跨层调度算法, 通过设置不同的门限区分对待实时和非实时业务数据分组, 首先将满足时延门限约束的 RT 业务数据分组设置最高的传输优先级, 即优先分配

收稿日期: 2013-01-31; 修回日期: 2013-05-08

基金项目: 国家高技术发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (2012AA01A502, 2012AA01A505)

Foundation Item: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(2012AA01A502, 2012AA01A505)

资源传输；然后，将剩余的 RT 业务分组（不满足时延约束）和 NRT 业务数据分组设置为次优传输等级，根据当前信道状态进行资源的优化分配；最后，将其余的数据分组设置为最低的优先级。该算法受信噪比的影响较大，无法在低信噪比的情况下使用。文献[5]针对上述问题，同时兼顾用户信道状态信息（CSI, channel state information）和业务的分组队列状态对用户优先级进行设定，有效改善了算法在低信噪比条件下的性能。文献[6]根据业务服务质量（QoS, quality of service）将用户分为高低 2 种不同的用户等级，在资源分配过程中，高优先级用户的资源需求能够率先得到满足。仿真结果表明，该分配方案能够有效地提高资源利用率和改善整体的用户满意度，但由于其未依据业务类型对高优先级用户进行进一步细分，因此性能改善程度有限。

上述算法在资源分配过程中均考虑了 QoS，从无线业务资源提供商的角度，依据不同的质量需求对业务区分处理。而无线业务的最终使用者是用户，文献[7]从改善用户对于业务的体验感受的角度出发，尝试引入用户的主观感受以及感受的积累效应来进行资源优化配置。文献[8]研究了用户感受质量(QoE, quality of experience)与 QoS 指标之间的相互联系，并基于此针对集中式网络讨论了如何利用 QoS 指标来构建 QoE 模型。文献[9]重点研究了 QoE 在不同网络环境下对于流媒体业务的应用前景。文中分别讨论了 QoE 指标中各种不同参数之间的相互关系，并针对其在混合业务下的应用给出了优化算法。

本文针对 MIMO-OFDM 系统多用户下行链路，对发送端的可用资源进行跨层联合优化。首先，建

立了基于理想 CSI 反馈的 MIMO-OFDM 系统跨层资源分配模型；其次，引入 QoE 指标，结合 RT、NRT 业务特点，设计了 RT&NRT QoE 效用函数；然后，提出了一种基于 QoE 效用函数的跨层资源分配算法，给出了算法的理论分析过程和具体实现流程；最后，通过仿真对算法的性能进行了评估。

2 系统模型

假设系统内共有 K 个均匀分布的用户，系统配置有 N 个天线，信道散射丰富。采用 OFDM 调制，除了导频和虚拟子载波外，用于数据传输的子载波共有 M 个，数据传输以帧为单位，每一帧由 S 个时隙组成。假设单位帧时间内信道增益近似不变^[10]，接收端估计的 CSI 可以通过理想反馈信道及时反馈给发送端。系统按照子载波和时隙划分为独立的时频资源块，并以此作为最小的可分配资源单位。以 (m, s) 标识时频资源块，其中， m 表示子载波号， $m \in (1, M)$ ； s 表示一帧内的时隙序号， $s \in (1, S)$ 。则一个数据帧内共有 $M \times S$ 个时频资源块可供分配。假设每个时频资源块在一个数据帧内仅由一个用户占用。本文综合考虑物理层的 CSI 和 MAC 层的用户队列状态信息进行资源分配。

MIMO-OFDM 系统下行链路资源分配模型如图 1 所示。

如图 1 所示，假设每个用户有自己的缓存单元，用于数据分组的存储，采用先进先出(FIFO, first in first out)缓存机制，依次将等待处理的业务数据报压入缓冲单元。在每一帧开始阶段，资源调度模块首先通过理想反馈信道获得各个用户反馈的下行 CSI；其次，依据不同的业务类型分发给不同的 FIFO

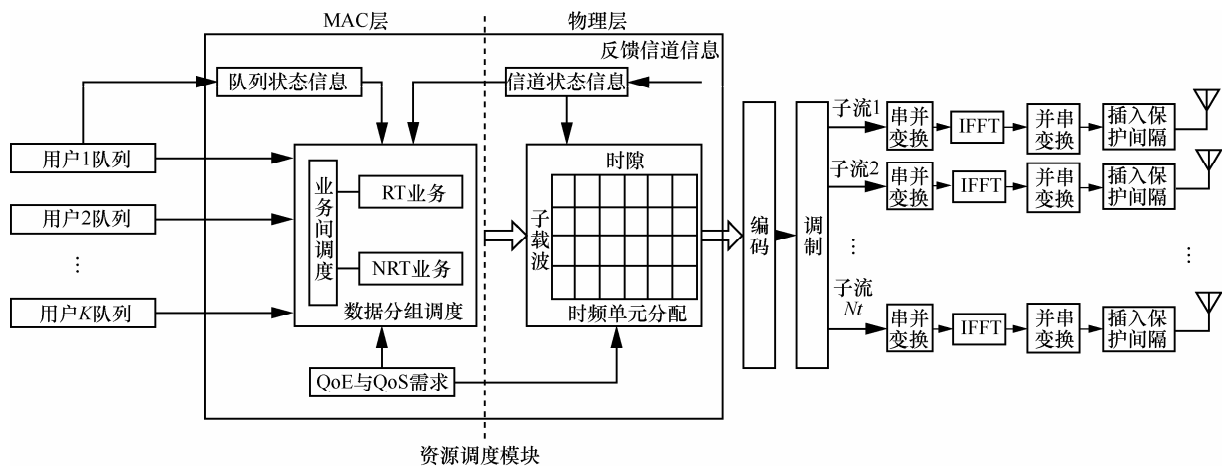


图 1 MIMO-OFDM 系统下行链路资源分配模型

缓冲单元（设置了不同的等待队列长度和队列数据分组时延门限）；然后，综合考虑队列状态信息、CSI、QoE 等多种因素，确定用户优先级；最后，在物理层先根据用户优先级分配时频资源块，再对功率进行优化分配。资源调度模块处理后的数据分组经过信道编码、速率匹配、交织、比特映射、OFDM 调制、添加导频和循环前缀等步骤后实现多子载波并行传输，并将资源分配的结果及时传输给用户，以保证用户对数据的正确接收。

3 RT&NRT QoE 效用函数

3.1 QoE 简介

文献[7]对于用户感受质量 QoE 给出如下定义：根据终端使用者的主观感受对一种应用或者业务做出的全面接收的程度。由此可知，QoE 从主观角度描述了用户对网络业务承载服务的满意程度，具体可以通过业务的可用性、可到达性以及完整性等来评价。QoE 与 QoS 同为业务质量的衡量指标，区别在于出发点不同。相比而言，QoE 除了具有与 QoS 相同的衡量参数外，由于引入了用户主观感受所带来的影响，因此能够更全面地反映服务的提供与接受情况。

3.2 RT&NRT QoE 效用函数设计

无线通信系统可分配的传输资源都是物理层资源，而 QoE 的衡量主要是从网络使用者的角度出发，直接相对应到端到端的服务层。为了有效刻画二者直接关系，本文选取效用函数作为 QoE 与系统资源之间相互联系的桥梁。利用效用函数能够根据不同需求刻画服务质量与物理层的资源分配之间的对应关系，通过平衡用户需求、剩余资源以及信道状态三者之间的关系来提高无线系统效益^[11]。

无线通信网络中的业务质量受用户吞吐量、业务分组丢失率、数据分组时延等多种参数影响，用户对不同种类业务的关注度不同，对于相应参数的需求也有所不同。本文将 3GPP 定义的 4 种类型^[12]业务简化考虑成 2 类，即 RT 业务和 NRT 业务。下面针对 2 类业务分别设计 QoE 效用函数。

1) RT QoE 效用函数

如音频、视频流等 RT 业务，使用者十分关心业务的连贯性，对数据时效性要求较高，特别是对于数据分组的实时性和时延抖动等时间参数较为敏感，即对于系统的 MAC 层的等待队列首数据分

组的时延参数敏感。因此，在设计 RT QoE 效用函数时，考虑以用户等待队列首数据分组时延或与其相关的时延参数为自变量，以用户 QoE 为因变量。此外，效用函数所反映的关系应当符合大多数人的一般认知。

考虑到 VoIP 业务是一种典型的实时音频业务，且目前针对用户感受的研究较为全面，本文首先以 VoIP 业务为切入点设计 RT QoE 效用函数，再将该效用函数扩展至实时视频(RT-Video)业务下。

国际标准组织已给出了多种用于评价 VoIP 语音质量的模型，其中以 MOS(mean opinion score)模型^[13]和 E-model 模型^[14]为主要代表。MOS 模型是一种主观评价模型，能够最直观地体现用户感受。它将用户感受分为 4 段，各段的统计意义如表 1 所示。

表 1 MOS 数值与用户感受对应关系

MOS 区间	用户感受
[1,2)	几乎所有用户不满意
[2,3)	多数用户不满意
[3,4)	部分用户不满意
[4,5]	几乎所有用户满意

通常定义 MOS 值小于 3 时语音质量较差，而大于 4 时语音质量较好。MOS 模型虽然可以准确地给出用户的满意度，但需要大量听众进行打分实现，因此无法实时对业务质量进行评价。而 E-model 模型作为一种考虑全面并被广泛应用的客观评价模型，综合考虑了编码器性能、分组丢失、延时、噪声、回声、抖动等因素对语音质量的影响，能够体现出用户对业务质量的满意水平，但不如 MOS 值直观。文献[14]给出了语音质量 R 与 MOS 值的关系，如式(1)所示。

$$MOS = \begin{cases} 1 & , R < 0 \\ 1 + 0.035R + R(R - 60)(100 - R) \times 7 \times 10^{-6} & , 0 < R < 100 \\ 4.5 & , R > 100 \end{cases} \quad (1)$$

本文效用函数的设计主要关注 MAC 层用户等待队列首数据分组时延与用户 QoE 之间的关系。考虑到前者在实际系统中隐含于语音单项时延^[15]中，而语音单项时延 T_r 与接收端时延 T_r 存在如下关系

$$T_t = (75 + T_r) \text{ ms} \quad (2)$$

因此通过接收端时延 T_r 表征 MAC 层用户等待队列首数据分组时延。以 MOS 值表征用户 QoE。接收端时延 T_r 与语音质量 R 的对应关系如表 2 所示^[16]。

表 2 接收端时延与语音质量对应关系

T_r/ms	R
25	92
75	90
125	86
175	80
225	74
275	68

根据式(1)，将表 2 中的 R 值换算为 MOS 值。设定 VoIP 业务最大时延门限为 350 ms，对接收端时延进行归一化处理 $T_1 = T_r/350$ ，如表 3 所示。

表 3 归一化时延与业务质量对应关系

T_1	MOS
0.05	4.38
0.15	4.34
0.25	4.22
0.35	4.02
0.45	3.78
0.55	3.50

对表 3 中数据以对数函数的形式进行拟合^[17]，便得到 VoIP 业务的 QoE 效用函数如式(3)所示。

$$F_{MOS} = \begin{cases} 0.6477 \ln(-1.542T_1 + 1.554) + 4.185, & 0 < T_1 \leq 1 \\ 1, & T_1 > 1 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可以看出，当 $T_1 = 0$ 时， $F_{MOS} = 4.47$ ，符合 E-model 模型中 R 与 MOS 的对应关系；当 $T_1 = 1$ 时， $F_{MOS} = 1$ ，与一般假设吻合。

RT-Video 业务可分解为语音和图像，其中语音质量与 VoIP 无本质差别，对于图像，人眼的视觉暂留效应为 100 ms，加之人的主观影响，可认为图像的最大时延门限为 200 ms。基于上述考虑，仍以式(3)为实时视频流业务的 QoE 效用函数，其中， $T_1 = T_r/200$ 。

综上所述，设计 RT QoE 效用函数如式(3)所示，其中，在 VoIP 业务下， $T_1 = T_r/350$ ；在

RT-Video 业务下， $T_1 = T_r/200$ 。

2) NRT QoE 效用函数

NRT 业务(如 E-mail、网页浏览等)对于数据分组的实时性较不敏感，但对一段时间内的平均传输速率有一定要求，MAC 层与之相关的参数为数据分组等待队列长度与分组丢失率。基于 NRT 业务的这一特点，同时考虑到用户对业务速率的感受应与其所获速率的对数函数呈线性关系^[17]，本文首先引入文献[11]给出的基于统计得到的用户满意度函数。

$$F(r) = 0.16 + 0.8 \ln(r - 0.3) \quad (4)$$

其中， $F(r)$ 表示速率为 r 时的用户满意度， r 为用户获得速率，单位为 kbit/s。下面将在式(4)的基础上构建能够反映 MAC 层数据分组等待队列长度与用户 QoE 之间关系的效用函数。

在业务数相同的情况下，NRT 业务所占用的吞吐量资源远大于 RT 业务，不妨假设所有占用吞吐量的业务均为 NRT 业务，则有

$$r = l_f q_s \quad (5)$$

其中， r 为用户获得速率， l_f 为数据分组的比特数， q_s 为单位时间内传输的数据分组数量。

MAC 层数据分组等待队列长度 q_w 满足

$$q_w = Q - q_s \quad (6)$$

其中， Q 和 q_s 分别为单位时间内用户需传输的数据分组数量和已传输的数据分组数量。

将式(5)、式(6)代入式(4)中，得

$$F(q_w) = 0.16 + 0.8 \ln[(Q - q_w)l_f - 0.3] \quad (7)$$

设 $q_w \in [0, Q]$ ， $l_f = 1 \text{ kbit}$ ，则在单位时间内， $Q - q_w$ 与 r 数值相等。式(7)可写为

$$F(q_w) = 0.16 + 0.8 \ln[(Q - q_w) - 0.3] \quad (8)$$

式(8)给出了用户满意度和等待队列长度的关系。为了统一，并得到与 RT QoE 效用函数相同的值域，将 $F(q_w)$ 与 q_w 的关系映射到 [1,4.5] 区间内。具体方法为：定义 S_{NRT} 满足

$$S_{NRT} = 1 - \frac{F(0) - F(q_w)}{F(0)} \quad (9)$$

其中， $F(0)$ 为 MAC 层无等待队列时的用户满意度。则 NRT QoE 效用函数可表示为

$$F_{NRT, MOS} = 3.5S_{NRT} + 1 \quad (10)$$

4 基于 QoE 效用函数的跨层资源分配算法

4.1 算法设计思想

为了使所提算法在子载波和功率资源受限的条件下, 满足不同业务的 QoS 指标要求, 同时获得最大用户平均 QoE, 本文将所设计的 RT&NRT QoE 效用函数引入资源分配过程, 给出一种新的跨层资源分配算法。该算法首先将子载波与时隙资源共同定义为时频资源块, 并将其作为资源分配的最小分配单元; 其次, 根据 QoE 效用函数计算用户 QoE 增量, 依此确定用户优先级; 然后, 假设功率平均分配, 依据用户优先级完成时频资源块的分配; 最后, 采用“拟注水”的方式对用户进行功率优化分配, 至此, 资源分配过程结束。

4.2 算法理论分析

算法先在功率平均分配的前提下进行时频资源块分配, 此后, 功率优化分配目标为最大化系统功率的利用效率, 可表示如下。

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S a_{k,m,s} b_{k,m,s} \quad (11)$$

限制条件为

$$\sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S a_{k,m,s} b_{k,m,s} \geq b_k \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M p_{k,m} \leq P_{total} \quad (13)$$

$$a_{k,m,s} \in \{0,1\} \text{ 且 } \sum_{k=1}^K a_{k,m,s} \leq 1 \quad (14)$$

其中, k 表示用户号, $k \in [1, K]$; m 表示子载波号, $m \in [1, M]$; s 表示时隙号, $s \in [1, S]$ 。式(12)表示用户分得的资源所能承载的比特数应不小于 MAC 层所确定的用户传输数据量, 其中, $a_{k,m,s}$ 是时频资源块分配指示符, 当 $a_{k,m,s} = 1$ 时, 表示 (m, s) 所对应的资源被分配给了用户 k , 否则 $a_{k,m,s} = 0$, 式(13)是系统功率限制, 式(14)表示每个时频资源块在一次资源分配过程中的独占性。 $b_{k,m,s}$ 表示在一个 (m, s) 时频资源块中用户 k 能够传输的比特数, 如式(15)所示。

$$b_{k,m,s} = \left[\sum_{m \in M_k} \text{lb} \left(1 + \frac{\|H_{k,m}\|^2 P_{total}}{W_m N_0 \Gamma M} \right) \right] \quad (15)$$

其中, M_k 表示用户 k 分配得到的子载波集合; $\|H_{k,m}\|^2$ 表示用户 k 在第 m 个子载波上的等效信道

增益; P_{total} 为系统在 s 时隙内的总发射功率, 假设 P_{total} 平均分配到每个子载波上; W_m 为子载波 m 的带宽; N_0 表示噪声功率谱密度; Γ 与系统的编码方式以及目标误比特率相关, 数值反映系统真实传输速率和理想信道容量之间的差值。若系统采用 MQAM 调制, 则有 $\Gamma = -\ln(SBER)/1.6$ 。假设在一个时隙内, 同一子载波的增益不变, 则 $b_{k,m,s}$ 对于所有 s 相同。

在已知信道状况的情况下, 最优功率分配方法为注水方法。一般而言, 当用户的基本通信需求已得到满足时, 再分配给用户额外的资源对于用户满意度的提升作用不大。在本文算法的时频资源块分配过程中, 优先级高的用户得到了较好的时频资源块。若进一步采用注水方法分配功率, 则这些用户的需求将先得到满足, 即满足式(12)。此时令其不再参与功率分配, 则既不会对其自身的满意度产生大的影响, 又能够将更多的功率分配给优先级低的用户, 有利于提高系统整体的用户 QoE, 符合算法设计目标。基于上述分析, 对用户采用“拟注水”方式分配功率。“拟注水”与一般注水思想的区别仅在于: 每个用户获得功率满足式(12), 达到其通信需求后, 就不再参与功率分配。

基于上述分析, 采用“拟注水”方式优化功率分配。“拟注水”与一般注水的区别仅在于: 每个用户获得功率满足式(12), 即达到其通信需求后, 就不再参与后续功率分配。式(12)的作用在于作为判断用户得到功率后是否满足通信需求的依据, 不影响具体功率计算的结果, 因此, 在具体功率计算过程中可以忽略。则在一个时隙内, 功率分配问题可描述为

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M a_{k,m} b_{k,m} \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M p_{k,m} \leq P_{total} \quad (17)$$

$$a_{k,m} \in \{0,1\} \text{ 且 } \sum_{k=1}^K a_{k,m} \leq 1 \quad (18)$$

上述表示形式类似于注水算法, 采用拉格朗日法可得

$$a_{k,m} \frac{\partial \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \text{lb} \left(1 + \frac{p_{k,m} \|H_{k,m}\|^2}{W_m \sigma^2 \Gamma} \right)}{\partial p} = \lambda \quad (19)$$

计算得

$$p_{k,m} = \left[\frac{a_{k,m} \ln 2}{\lambda} - \frac{W_m \sigma^2 \Gamma}{\|H_{k,m}\|^2} \right]^+ \quad (20)$$

其中, $p_{k,m}$ 表示用户 k 在本时隙子载波 m 上的功率; $[x]^+$ 表示 $\max(0, x)$; λ 是拉格朗日因子; $a_{k,m}$ 指示用户 k 在本时隙内对子载波 m 的分配结果。 $a_{k,m} = 0$ 表示在本时隙内子载波 m 没有分配给用户 k , 此时对应地有 $p_{k,m} = 0$ 。

4.3 算法流程

假设系统中同时共有 K 个用户数需要传输业务数据, 且每个用户同时只使用一个业务 (当存在用户多个业务时可以等价于多个用户处理), 其中有 K_{VoIP} 人次使用 VoIP 业务, K_{Video} 人次使用 RT Video 业务, K_{NRT} 人次使用 NRT 业务。系统子载波总数为 M , 每 12 个子载波与一个时隙构成一个时频资源块。

算法主要流程可描述如下。

step1 采用平均分配的方式将系统功率分配到各个数据子载波上。

step2 将用户当前的队列头时延与等待队列长度分别代入式(3)和式(9)的 QoE 效用函数中, 获得当前用户 k 的 QoE 值 $S_{QoE_ini,k}$ 。

step3 针对每个用户计算发送一个数据分组后的队列头时延与等待队列长度, 并分别代入式(3)和式(9)的 QoE 效用函数中, 获得用户 k 发送当前数据分组后得到的 QoE 值 $S_{QoE_sendone,k}$ 。

step4 比较所有用户发送一个数据分组前后所获得的 QoE 增量 $S_{QoE_add,k} = S_{QoE_sendone,k} - S_{QoE_ini,k}$, 选出其中增量最大的用户 k_{max} 优先分配资源。

step5 按照优先分配同一子载波组在一帧内的时频资源块的原则, 分配时频资源块直到所分配的资源达到用户 k_{max} 要求, 其中, k_{max} 对应当前时隙中选择传输吞吐量最大的时频资源块。

step6 为用户 k_{max} 更新队列状态信息。

step7 针对所有用户判断等待队列是否为空, 是则转下一步; 否则转 step2。

step8 将时频资源块的分配结果代入式(18)和式(20), 判断 $\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M p_{k,m}$ 是否小于等于 P_{total} , 是则在每个时隙上, 依据式(20)对用户采用“拟注水”方

式进行功率优化分配; 否则转 step11。

step9 判断 $\sum_{m=1}^M a_{k,m} b_{k,m}$ 是否大于等于 b_k , 是则将用户 k 归入已获得所需资源的用户集合 K_{full} , 并令其不再参与后续功率分配, 继续执行 step10; 否则转 step8。

step10 判断 K_{full} 是否等于 K , 是则执行 step11; 否则转 step8。

step11 $p_{k,m}$ 作为本时隙内用户 k 在子载波 m 上的功率, 资源分配完成。

5 仿真结果

为了验证所提算法性能, 本文通过仿真对比了其于文献[5]提出的跨层资源分配算法性能。具体的仿真条件参照 LTE 相关的物理层标准: 一个数据帧长度为 10 ms, 且每个数据帧长度包含 10 个时隙子帧 (一个时隙子帧为 1 ms), 每个时隙子帧内包含 7 个 OFDM 符号, 总共有 $M = 480$ 个数据子载波, 子载波间隔为 $\Delta f = 15$ kHz。一个时频资源块由 12 个子载波与 1 个时隙构成。仿真中所提及的信噪比均为系统平均信噪比, 其定义为发送端所有子载波信号功率与噪声功率比的算术平均。

假设使用 VoIP 业务的用户人数占总业务使用人数的 1/4, 使用 RT Video 业务的用户人数占总业务使用人数的 1/4, 其余用户使用 NRT 业务。其中 RT 业务数据为采集自 Polycom 公司远程视频会议系统的 VoIP 与 RT Video 业务数据^[18], 如表 4 所示。

表 4 Video 与 VoIP 业务参数

类型	数据分组大小/kB	平均到达数/(个·s ⁻¹)	业务速率/(kB·s ⁻¹)
VoIP	0.512	20	10
Video	1	20	20

假设每个 NRT 业务数据分组大小均为 1 kB, 业务速率为 500 kB/s, 数据分组平均到达数为每秒 500 个。设定 VoIP 业务的最大时延门限为 350 ms, RT Video 业务的最大时延门限为 200 ms。假设 NRT 业务的最大数据分组队列长度为 500 个数据分组。各数据分组的到达时间间隔服从泊松分布, 期望为各业务本身每秒数据分组到达的平均时间间隔。

图 2 和图 3 给出了不同信噪比下 VoIP 业务与 RT Video 业务用户平均 QoE 随用户数变化的曲线。

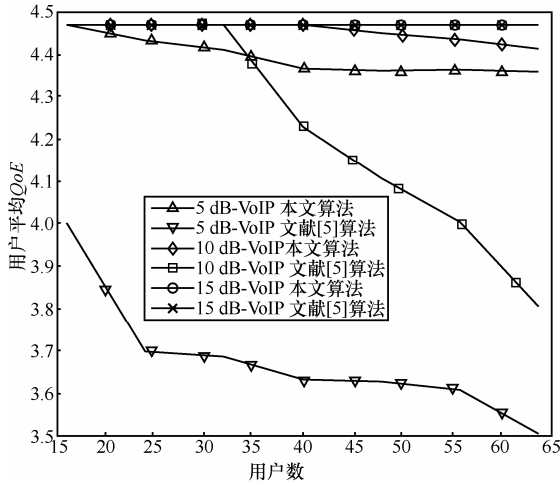


图2 VoIP业务下用户 QoE 比较

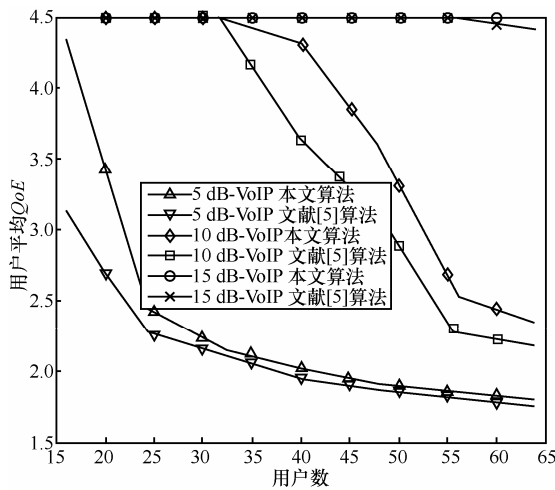


图3 RT Video业务下用户 QoE 比较

从图2和图3可以看出，在RT业务条件下，本文算法所能获得的用户平均 QoE 优于文献[5]算法，且信噪比越低，用户数越多，这种优势越明显。此外，本文算法在较低信噪比(5 dB)下，仍能将用户平均 QoE 维持在大于4.3分的水平，对列表1可以看出，此时绝大多数用户感到满意。相比之下，文献[5]算法无法很好地满足用户需求。

图4给出了不同信噪比下 NRT 业务用户平均 QoE 随用户数变化的曲线。

由图4可以看出，在 NRT 业务条件下，当平均信噪比低于 10 dB 时，2 种算法的用户平均 QoE 均随用户数的增加而急剧降低。这是因为在相同数据量的情况下，RT 业务的 QoE 增量大于 NRT 业务，因此当系统资源不足，无法同时满足用户不同业务的速率需求时，本文算法优先保证 RT 业务的数据发送，以此获得较高的用户平均 QoE。文献[5]算法的保证目标为 QoS 参数，未直接考虑用户感受，因

此获得的用户平均 QoE 较低。

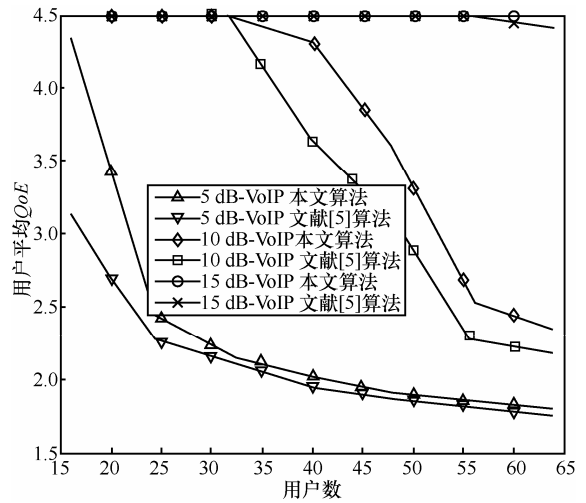


图4 NRT业务用户 QoE 比较

图5和图6分别给出了2类RT业务在不同信噪比下数据分组平均时延随用户数变化的关系曲线。

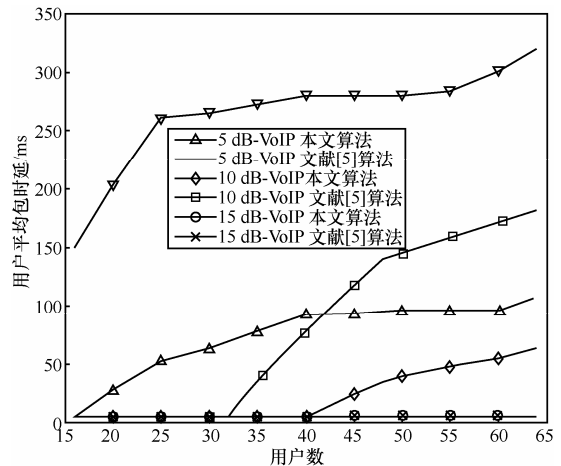


图5 VoIP数据平均分组时延比较

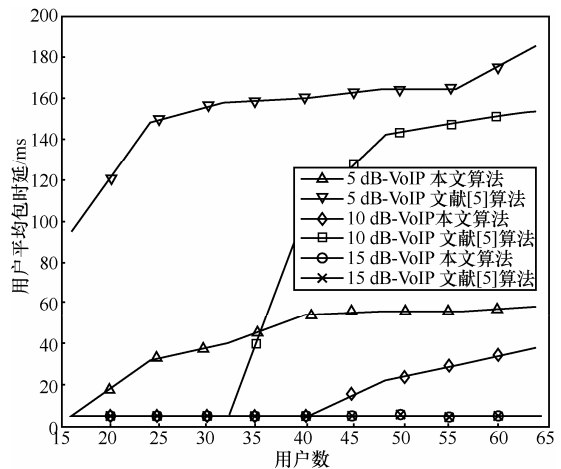


图6 RT Video数据平均分组时延比较

从图 5 和图 6 可以看出, 2 种算法均都能够有效保证平均分组时延不超出最大等待时延门限。在相同信噪比条件下, 本文算法的平均分组时延约比文献[5]算法降低一倍。这是因为根据 QoE 效用函数的定义, 本文算法中 RT 业务数据分组容易获得更高优先级, 因此平均分组时延较短。而在文献[5]中, RT 业务在非紧急状态下的优先级与 NRT 业务相同, 因此在资源不足的情况下, RT 业务得不到有效保障。

图 7 给出了在不同信噪比下 NRT 业务的平均分组丢失率与用户数之间的变化关系。

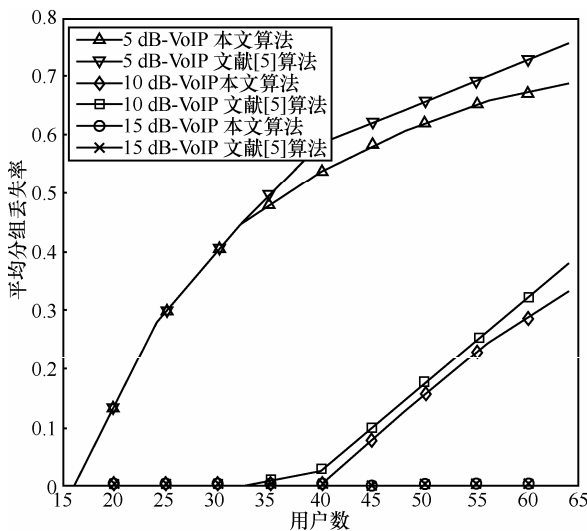


图 7 NRT 业务平均分组丢失率比较

从图 7 可以看出, 在用户数较少的情况下, 2 种算法的平均分组丢失率基本重合, 但随着用户数逐渐增加, 本文算法的平均分组丢失率渐低于文献[5]算法, 且优势越来越明显。这是因为相比于文献[5]算法, 本文算法更能有效避免用户多或信噪比低等情况下资源不能充分使用的问题。

图 8 给出了在不同信噪比下 2 种算法的系统吞吐量随用户数变化的关系曲线。

从图 8 可以看出, 当用户数较少时, 本文算法与文献[5]算法的系统吞吐量曲线基本重合; 当用户数大于 32 时, 前者的系统和容量略优于后者。这是因为当用户数较大时, 文献[5]算法因其资源分配准则的不足, 未能充分利用所有资源。而本文算法由于采用“拟注水”方法进行了功率优化分配, 因此能够获得更好的性能。

综上所述, 本文算法在用户平均 QoE、RT 业务平均分组时延、NRT 业务平均分组丢失率以及

系统和吞吐量方面的性能均优于文献[5]所提算法, 且在用户数较多、低信噪比较低的情况下优势更为明显。

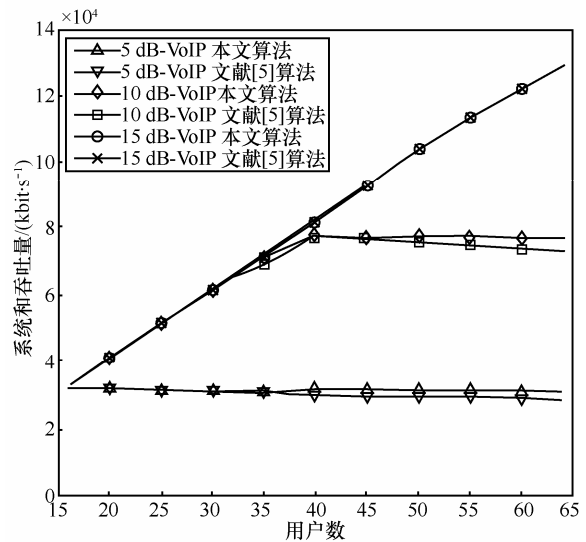


图 8 系统和吞吐量随用户数的变化

6 结束语

本文针对多用户 MIMO-OFDM 下行链路所提的基于 QoE 效用函数的跨出资源分配算法, 通过引入 RT&NRT QoE 效用函数将用户的业务感受与系统 MAC 层信息相结合, 能够在满足业务 QoS 指标要求的同时, 有效提高用户对业务的使用感受。由于对数运算的引入, 算法的计算复杂度偏高, 这使得其实用价值受到一定限制。因此, 进一步降低所提算法的计算复杂度, 使其更契合实际系统的应用需求, 将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] HE L J, LIU G Z. Optimal cross layer design for video transmission over OFDMA system[A]. IEEE ICC 2012[C]. Ottawa, Canada, 2012. 1154-1159.
- [2] MARYAM B, HAMDI N, HEDIA K, et al. The impact of cross-layer resource management MAC-PHY in wireless OFDMA networks[A]. IEEE MELECON 2012 [C]. Yasmine Hammamet, 2012. 732-735.
- [3] 仲崇显, 李春国, 杨绿溪. 多业务 MIMO-OFDMA/SDMA 系统跨层调度与动态资源分配[J]. 通信学报, 2010,31(9): 15-23.
- [4] ZHONG C X, LI C G, YANG L X. Cross-layer scheduling and dynamic resource allocation for MIMO-OFDMA/SDMA systems with multi-service[J]. Journal on Communications, 2010, 31(9):15-23.
- [5] JEONG S S, JEONG D G, JEONG W S. Cross-layer design of packet scheduling and resource allocation in OFDMA wireless multimedia networks[A]. IEEE VTC2006-Spring[C]. Melbourne, Vic, 2006. 309-313.
- [5] 马月槐, 张冬梅, 蔡跃明等. 一种适用于多用户 OFDM 系统下行链

- 路的跨层设计调度算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2):421-425.
- MA Y H, ZHANG D M, CAI Y M, *et al.* A cross-layer scheduling algorithm for downlink for multi-user OFDM system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(2):421-425.
- [6] BASHAR M S A, DING Z, LI Y. QoS aware resource allocation for heterogeneous multiuser OFDM wireless networks[A]. IEEE SPAWC 2008[C]. Recife, 2008.535-539.
- [7] ITU-T Recommendation G1080. Quality of Experience Requirements of IPTV Services[S]. 2008.
- [8] KIM H J, LEE D H, LEE J M. The QoE evaluation method through the QoS-QoE correlation model[A]. In 4th ICNCAIM[C]. Gyeongju, 2008.719-725.
- [9] PIAMRAT K, VIHO C, KSENTINI A, *et al.* Quality of experience measurements for video streaming over wireless networks[A]. 6th ICITNG[C]. Las Vegas, NV, 2009.1184-1189.
- [10] CHUNG S T, GOLDSMITH A. Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view[J]. IEEE Transactions on Communication, 2001, 49(9): 1561-1571.
- [11] GONG G C, LI Y. Utility-based joint physical-MAC layer optimization in OFDM[A]. IEEE GLOBECOM'02[C]. 2002.674-676.
- [12] 3GPP TS 23.107. Quality of Service(QoS) Concept and Architecture(Release 5)[S]. 2003.
- [13] ITU-T Recommendation P.800.1. Mean Opinion Score(MOS) Terminology[S]. 2006.
- [14] ITU-T Recommendation G.107. The E-model, A Computational Model for Use in Transmission Planning[S]. 2005.
- [15] ITU-T Recommendation G.108.2. Planning Examples Regarding Delay in Packet-Based Networks[S]. 2004.
- [16] ITU-T Recommendation G.108. Application of the E-model: A Planning Guide[S]. 1999.
- [17] EKMAN G. Weber's law and related functions[J]. Journal of Psychology, 1959, 47(1):343-351.
- [18] 刘涛, 邱玲. MAC 层实时业务满意度评价模型及基于满意度的包调度与资源分配方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1908-1913.
- LIU T, QIU L. MAC layer real-time traffic satisfaction evaluation model and a satisfaction based packet scheduling and resource allocation algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(8):1908-1913.

作者简介:



王大鸣(1971-), 男, 辽宁大连人, 博士, 解放军信息工程大学教授, 主要研究方向为无线与移动通信技术。

陈松(1986-), 男, 福建永安人, 解放军信息工程大学博士生, 主要研究方向为移动通信。

崔维嘉(1976-), 男, 辽宁丹东人, 博士, 解放军信息工程大学讲师, 主要研究方向为无线与移动通信技术。

王强(1982-), 男, 山东平度人, 硕士, 解放军信息工程大学助理工程师, 主要研究方向为移动通信。