

正交频分多址系统中一种面向多业务应用的自适应资源分配算法

朱晓荣^{*①②} 罗小琴^① 朱洪波^①

^①(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

^②(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210003)

摘要: 针对正交频分多址(OFDMA)系统下行链路多业务自适应调度的问题, 该文首先以最大化系统吞吐量为优化目标、每种业务的服务质量(QoS)保证为约束条件, 建立了一种通用的多业务自适应资源分配模型。为解决此优化问题, 提出了一种具体的自适应资源调度算法。该算法对实时业务按照“用户选择最好的信道”的原则分配尽可能少的资源以保证其 QoS, 对非实时业务把尽可能多的剩余资源按照“信道选择最好的用户”的原则进行分配, 充分利用信道资源, 提升系统容量。仿真结果表明, 该算法保证了下行 OFDMA 系统吞吐量的同时, 在实时业务的延时和丢包率等方面有一定的优越性。

关键词: 无线通信; 资源分配; 调度; 有效容量; 正交频分多址

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)06-1298-06

DOI: 10.11999/JEIT141158

Adaptive Resource Allocation Scheduling Algorithm for Multi-service Application in OFDMA System

Zhu Xiao-rong^{①②} Luo Xiao-qin^① Zhu Hong-bo^①

^①(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210003, China)

Abstract: Aimed at the problem of downlink multiservice adaptive scheduling in Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) system, a universal model for multiservice adaptive resource allocation is built, which is to maximize system throughput, under the constraints of Quality of Service (QoS) guarantees. In order to resolve this optimization problem, a multiservice adaptive resource scheduling algorithm is proposed. In this algorithm, the real-time service is allocated as little resource as possible to guarantee its QoS by “the user choosing the best channel” whereas the non-real time service is allocated the residual resource by “the channel choosing the best user” to increase the system capacity. The simulation results show that the proposed algorithm can guarantee the throughputs of the downlink OFDMA systems and meanwhile have some advantages in aspects of delay and packet dropping rate of real-time services.

Key words: Wireless communication; Resource allocation; Scheduling; Effective capacity; OFDMA

1 引言

下一代无线通信系统的目标是提供无处不在的无线通信和高质量的无线服务。随着用户对服务的多样性需求, 人们往往更关注服务质量(Quality of Service, QoS)保证, 而功率、频谱等无线资源以及自适应编码等相关技术的有效利用无疑是提升系统性能的关键。因此, 需要联合物理层和链路层等,

考虑跨层资源的利用^[1], 使用户效用最大化。

正交频分多址(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA)技术广泛应用于解决频率选择性衰落, 可提供更高、更可靠的数据传输速率, 在4G等移动通信系统中有广泛的应用前景。文献[2]针对下行链路多用户OFDMA系统, 提出一种基于效用的跨层多业务流(Utility-based Cross-layer Multiple Traffic, UCMT)调度算法, 该算法以系统效用函数为跨层最优化问题, 然后利用启发式双约束粒子群优化算法找到最佳的资源分配。文献[3]在个人用户速率约束的条件下, 基于凸优化理论提出了一种方法使多天线正交频分复用(Multiple Input

2014-09-04 收到, 2014-11-18 改回

国家自然科学基金(61372125), 国家 973 计划项目(2013CB329104)和东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2013D01)资助课题

*通信作者: 朱晓荣 xrzhu@njupt.edu.cn

Multiple Output-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, MIMO-OFDM)通信的总发送功率最小化, 此方案适用于上行链路和下行链路, 但是没有考虑不同服务的QoS要求。文献[4]针对不同业务的QoS要求采用不同的资源分配方法, 建立基于社会福利最大化的柔性业务资源分配算法。文献[5]针对正交频分多址/空分多址(OFDMA/SDMA)系统下行链路提出了一种动态优先级自适应的无线资源分配(Adaptive Radio Resource Allocation, ARRA)方案, 紧急用户给予较高的优先级, 用户的优先级可以逐帧地动态调整。然而, ARRA仅依赖违反QoS要求的剩余时间来调节优先级而没有对实时(Real-Time, RT)服务和非实时(NonReal-Time, NRT)服务给予明确区分。因此, 可能导致在高业务流下非实时业务被服务, 而实时业务没被服务的概率很高。文献[6]针对下行链路多用户MIMO-OFDM系统提出了一个基于效用吞吐量最大化和复杂度降低(Utility-based Throughput Maximization and Complexity Reduction, U_TMCR)的调度方案, 该算法虽然实现灵活, 但资源利用率不高, 实时业务QoS要求的满足在很大程度上影响了系统性能。而文献[7]研究了OFDMA系统下行链路采用自适应设置用户的优先权门限以调节系统吞吐量的提升和QoS保证要求的折中, 实现了负载均衡的资源调度, 但是在每调度帧中采用模糊推断算法为每个用户设置调度的优先权, 复杂度较高。文献[8]在比例速率约束和最小速率约束条件下, 研究了OFDMA系统下行和上行链路的和速率最大算法, 提出了一种低复杂度的用户选择子信道的基于信噪比权重的排列方案, 并结合注水算法进行功率分配。

本文针对上述问题, 以最大化系统吞吐量为优化目标、每种业务的QoS保证为约束条件, 首先形成了OFDMA系统一种通用的多业务自适应资源分配的最优化问题。为解决此优化问题, 提出了一种具体的自适应资源调度算法。由于衰落、干扰、用户位置等因素的影响, 对同一信道, 不同的用户有不同的信道增益; 而对同一用户, 不同的信道其增益也不同。本文定义“最好的信道”为某一用户从众多子信道中选择信道增益最大的那个信道, 定义“最好的用户”为某一信道从排队用户中选择信道增益最大的那个用户。该算法的核心思想是: 首先对每个用户的业务按照紧急程度值由大到小进行排序, 然后对实时业务按照“用户选择最好的信道”的原则分配尽可能少的资源以保证其QoS, 对非实时业务把尽可能多的剩余资源按照“信道选择最好的用户”的原则进行分配, 充分利用信道资源, 提升系统容量。

2 多业务自适应资源分配模型

本文主要考虑OFDMA系统下行链路, 将信道划分为 N 个子信道, 帧划分为 J 个时隙。多业务是指QoS业务和尽力而为业务(FTP业务), 其中QoS业务包括实时业务(语音业务和视频业务)和非实时业务(HTTP业务)。表1给出了4种业务的具体指标要求^[9]。来自不同用户的数据形成数据流, 不同业务的数据被存储在独立的缓冲区等待资源分配和调度。

表1 4种业务指标要求

指标要求	语音业务 (实时)	视频业务 (实时)	HTTP业务 (非实时)	FTP业务 (尽力而为)
误码率要求 BER	10^{-3}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-6}
时延界限 $D(\text{ms})$	40	10	N/A	N/A
丢包率 $\varepsilon(\%)$	1	1	N/A	N/A
传输速率 v (kbps)	N/A	N/A	100	N/A

本文提出的多业务自适应资源分配模型是设计最优的资源分配方案使得系统的吞吐量最大同时满足每个用户的QoS要求。考虑具有稳定各态历经、时变增益为 $g_{k,i}$ 的瑞利子信道, 参数 $i(i=1,2,\dots,N)$ 和 $k(k=1,2,\dots,K)$ 分别表示子信道和用户个数, N_0 是加性高斯白噪声密度。帧长用 T_f 表示, 由 J 个时隙组成, 时隙索引为 j 。 B 表示子信道的带宽, $P_{k,i}^{(j)}$ 表示一帧中的第 j 个时隙内子信道 i 上的用户 k 分配的发送功率。接收的信噪比(SNR) $\gamma_{k,i}^{(j)}$ 可表示为

$$\gamma_{k,i}^{(j)} = g_{k,i}^2 P_{k,i}^{(j)} / (N_0 B) \quad (1)$$

其均值为 $\bar{\gamma}_{k,i}^{(j)} = E[g_{k,i}^2] P_{k,i}^{(j)} / (N_0 B)$, 其中 $i=1,2,\dots,N$, $k=1,2,\dots,K$, $E(\cdot)$ 是数学期望运算。SNR的概率密度函数可表示为

$$p(\gamma_{k,i}) = \frac{\gamma_{k,i}}{\bar{\gamma}_{k,i}} \exp\left[-\frac{\gamma_{k,i}}{\bar{\gamma}_{k,i}}\right], \quad \gamma_{k,i} \geq 0, \quad i=1,2,\dots,N, k=1,2,\dots,K \quad (2)$$

对于 $P_{k,i}^{(j)}$, $1 \leq j \leq M$, 是由用户 k 的最小SNR要求决定的, 能够通过误码率(BER)的QoS要求 BER_k^* 和用户 k 的调制方式获得。如果用户 k 采用 M -QAM调制方式表示为 $X_{k,i}^{(j)}$, 则需要的最小SNR为 γ_k^* , 由文献[10]可以得到

$$\gamma_k^* \approx \frac{(X_{k,i}^{(j)} - 1) \log_2(5\text{BER}_k^*)}{-1.5} \quad (3)$$

注意到式(3)代表了所需要的SNR的近似值, 而分

配的功率 $P_{k,i}^{(j)}$ 应使得式(1)中的 SNR 满足式(3)中的最小 SNR 要求, 因此令式(1)中的 $\gamma_{k,i}^{(j)}$ 和式(3)中的 γ_k^* 相等, 可以得

$$P_{k,i}^{(j)} = \frac{(X_{k,i}^{(j)} - 1) \log_2(5\text{BER}_k^*) N_0 B}{-1.5 g_{k,i}^2} \quad (4)$$

本文定义用户 k 的吞吐量为该帧中为用户 k 分配传输的比特数, 用 R_k 表示, 即

$$R_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \log_2[X_{k,i}^{(j)}] \quad (5)$$

从式(4)中可以看出, $P_{k,i}^{(j)}$ 是 $X_{k,i}^{(j)}$ 和 BER_k^* 的函数, 因此 $P_{k,i}^{(j)}$ 可以表示为 $P_{k,i}^{(j)}(X_{k,i}^{(j)}, \text{BER}_k^*)$ 。从式(5)可以看出用户 k 的吞吐量 R_k 是 $X_{k,i}^{(j)}$ 的函数。因此, OFDMA 系统中的资源分配模型可以表述如式(6)所示的最优化问题^[5]:

$$\max \sum_{k=1}^K R_k = \max_{X_{k,i}^{(j)}} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \log_2[X_{k,i}^{(j)}] \quad (6)$$

条件约束:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J P_{k,i}^{(j)}(X_{k,i}^{(j)}, \text{BER}_k^*) \leq P_{\max} \quad (7)$$

$$R_k(X_{k,i}^{(j)}) \geq \bar{R}_k, \quad \forall k \quad (8)$$

其中 P_{\max} 是每帧分配的最大总功率, \bar{R}_k 表示当前帧需要传输的比特数否则用户的 QoS 要求不能满足, QoS 要求对实时业务来说即需要满足最大的包时延容忍度, 而对非实时业务来说, 需要满足最小的传输速率要求。因此, \bar{R}_k 在每调度帧开始进行设置, 其值与用户的 QoS 要求和排队状态有关。式(7)是基站的功率约束条件, 式(8)是 QoS 要求满足条件。

由以上的最优化问题可以看出, 本文提出的资源分配模型就是设法找到最佳的分配方案 $\{X_{k,i}^{(j)}, i=1,2,\dots,N, k=1,2,\dots,K, j=1,2,\dots,J\}$, 使得在式(7)和式(8)两个约束条件下, 使式(6)中的系统吞吐量达到最大。该优化问题是典型的非确定性多项式困难问题(NP-Hard), 其最优化解很难得到, 因此, 本文在第 3 节中提出了一种启发式调度算法来求解此问题。

3 面向多业务应用的资源调度算法

以最大化系统的吞吐量为优化目标, 并保证每种业务的 QoS, 为了减少复杂度, 本文提出了一种面向多业务应用的资源调度 (Aimed at the multiservice Application Resource Scheduling, A_ARS) 算法来解决式(6)~式(8)中的最优化问题。该算法的核心思想是: (1)每调度帧中按照“用户选择最好的信道”的原则分配尽可能少的资源以保证时延敏感业务的 QoS; (2)把尽可能多的剩余资源按照

“信道选择最好的用户”的原则分配给时延非敏感业务, 实现信道增益, 提升系统容量。本文提出的 A_ARS 算法包括如下两个步骤。

3.1 基于有效容量的时隙分配

假设用户的业务可以分为 3 类: RT 业务, NRT 业务和尽力而为(Best Effort, BE)业务。与 NRT 和 BE 业务相比, RT 业务具有更高的优先级。RT 业务如语音和视频, NRT 业务如超文本传输协议 HTTP, BE 业务如 FTP(File Transfer Protocol)。

为了满足 RT 业务的 QoS 要求, 本文定义用户 k 的紧急程度值 ζ_k 为^[11]

$$\zeta_k = c_k \cdot e^{-10^3 \cdot w_k} \quad (9)$$

其中, w_k 表示在当前帧的用户 k 的队头数据包在违反 QoS 要求前的剩余时间, c_k 表示用户的优先级系数。由于 NRT 业务或 BE 业务不考虑延时要求, 因此采用传统的先输入先输出规则。

本文采用基于有效容量^[11]的方法推导出每帧中满足实时业务统计性 QoS 保证的最小时隙数, 即保证用户 k 的 QoS 分配信道 i 的最小时隙数 $\{J_{k,i}\}$ 可以通过求解如式(10)所示的最优化问题得到^[11]:

$$\left. \begin{aligned} J_{k,i} &= \min_{1 \leq j \leq J} \{j\} \\ \text{s.t. } \exp(-\theta_{k,i}^{(j)} \lambda_{k,i}^{(j)} D_{\max}^k) &\leq \varepsilon^k \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 $\theta_{k,i}^{(j)}$ 为 QoS 指标, $\lambda_{k,i}^{(j)}$ 为有效带宽^[11]和有效容量在均衡点的速率, D_{\max}^k 为用户 k 的最大时延, ε^k 为用户 k 的最大丢包率容忍界限。

3.2 多业务资源调度算法

每帧的多业务调度算法如下: 首先, 所有的 RT 业务按照式(9)得到的紧急程度值有序地进行排队, 对每个用户按照紧急程度值由大到小进行排序, 索引号为 $k(1,2,\dots,K)$, k 值越小表示优先级越高。按照优先级为对每个排队的用户 k 从所有信道中选择“最好的信道”, 即最大信道增益的信道 i^* 。然后给用户 k 分配信道 i^* 上的 w_{k,i^*} 时隙满足 QoS 要求。在每调度帧中多个用户可以共享信道 i^* , 只要 $\sum_{k=1}^K w_{k,i^*} \leq J$ 。信道 i^* 中每个帧中的剩余时隙, 即 $J - \sum_{k=1}^K w_{k,i^*}$ 将被分配给所有 NRT 或 BE 用户中具有最高信道增益的用户。因此, 本文提出的多业务自适应资源分配的问题就变成如何找到每帧的时隙数量的集合 $\{w_{k,i}\}$ 满足 QoS 约束下最小化 RT 业务的信道占用量的问题, 即

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N w_{k,i} \quad (11)$$

$$\text{s.t. } w_{k,i} \geq J_{k,i}, \quad \forall k, i \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K w_{k,i} \leq J, \quad \forall i \quad (13)$$

$\{J_{k,i}\}$ 可以由式(10)得到,式(12)表示 QoS 约束,式(13)表示分配的时隙数不能超过一帧中的总的时隙数。 $NJ - \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N w_{k,i}$ 表示剩余信道资源,可以被 NRT 或 BE 业务使用。很明显 $\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N w_{k,i}$ 越小, NRT 或 BE 业务可使用的空闲信道资源越多,因此,最小化 $\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N w_{k,i}$ 也即最大化 NRT 或 BE 业务的可用容量,按照“信道选择最好的用户”的原则从所有的 NRT 或 BE 用户中选择具有最高信道增益的用户。然后,基站的最大发送功率减去 RT 用户分配的总功率所得的剩余功率将被平均分配给 NRT 或 BE 用户。

可以看出,式(11)的最小化问题是一个线性规划问题,可以利用单纯形法(simplex)容易地求出解。一旦确定了分配模式 $\{w_{k,i}\}$,根据文献[11]中的表2,自适应传输模式和相应的传输功率也可确定。

4 性能评估

本文通过仿真实验来评估本文所提出的 A_ARS 算法的性能。在仿真中,根据 IEEE 802.16B 标准^[12],下行链路多用户 OFDMA 系统中的参数如表2所示。路径损耗模型建模为 $128.1 + 37.6 \log_2(R)$ dB,其中 R 为用户到基站的距离(km)。假定阴影衰落的平均值为 0,标准差为 8 dB。本文假设有 4 种业务类型:语音,视频,HTTP 和 FTP。

本文所提出的 A_ARS 算法将和文献[5]中的 ARRA 方案和文献[6]中的 U_TMCR 方案进行比较。在本仿真中,用户数从 80 变化到 480,假定每个用户只有一种业务,每种业务类型用户的数量相等。该系统的业务强度定义为用户总的平均数据速

率与最大系统传输速率的比^[7,8]。语音、视频、HTTP 和 FTP 到达用户的平均数据速率分别设置为 4.8 kbps, 64.0 kbps, 14.5 kbps 和 88.9 kbps,并且随着用户数量从 80 变化到 480,业务负载则从 0.15 变化到 0.90。

图1显示了系统吞吐量随业务密度的变化。可以看出, A_ARS 方案所获得的吞吐量最大,在业务密度为 0.75 时, A_ARS 的系统吞吐量比 ARRA 和 U_TMCR 方案分别提高 8.02% 和 2.34%。这是因为 A_ARS 方案在实现 RT 业务 QoS 要求(基于优先级的资源分配算法)和提高 NRT/BE 业务的系统吞吐量(基于信道状态的算法)之间取得了平衡。ARRA 方案的吞吐量随着业务强度的增加,其增长速度逐渐降低。这是因为在高优先级用户和高信干比用户中, ARRA 方案将为高优先级用户分配更多的资源。U_TMCR 方案通过最大化总的效用值来调度用户,但是 U_TMCR 方案为了使 RT 用户保持完美的丢包率,将比 A_ARS 方案占用更多的资源,从而也导致了吞吐量增长速度下降。当业务密度较高时, A_ARS 方案为满足 QoS 要求,将给实时业务分配更多的资源,只有很少的资源可以分配给非实时用户,因此导致非实时业务吞吐量下降,所以图1中会出现业务密度为 0.75 的拐点。此拐点表明,业务强度超过 0.75 时,必须将更多的资源分配给优先级高的实时用户,以保持其 QoS 要求。

图2显示了 FTP 业务的吞吐量随业务强度的关系。从图中可以看出在业务负载小于 0.6 时, A_ARS 方案对 FTP 吞吐量方面的性能优于其他两种方案,但当业务强度超过 0.6 时, A_ARS 方案的 FTP 吞吐量将降低。这是因为 A_ARS 方案使用基于有效容量的时隙分配可以最小化分配给高优先级用户的资源量,从而分配更多的资源给 FTP 用户。相比之下,其他方案将通过牺牲 FTP 用户的吞吐量以便分配更多的资源给语音和视频用户,从而保持 QoS 要求。但在高业务负载时,必须将更多的资源分配给紧急实时用户,以保持其 QoS 要求。因此,只有很少的资源可以分配给 FTP 用户。同时也可以看出 U_TMCR 方案在业务密度为 0.6 之前一直增长,然后开始下降。这是因为当业务密度较高时, U_TMCR 方案为满足 QoS 要求,将给 RT 业务分配更多的资源。但是, A_ARS 方案的吞吐量下降率要低于 U_TMCR 方案,这是因为 A_ARS 方案仅分配最小的资源以保住 RT 服务的 QoS 要求,从而把更多的可利用资源分配给 FTP 用户。因此,可以从图中看到,当业务强度为 0.75 时, A_ARS 和 U_TMCR 两种方案的吞吐量曲线有一个交点。

表2 OFDMA 系统仿真参数

小区半径	1.6 km
帧周期	5 ms
系统带宽	5 MHz
子信道数	8
子载波频宽	10.9375 kHz
下行链路每帧时隙数	24
基站最大功率	43 dBm
基站发射天线数	2
白噪声功率	-174 dBm/Hz
多普勒频偏	5~30 Hz

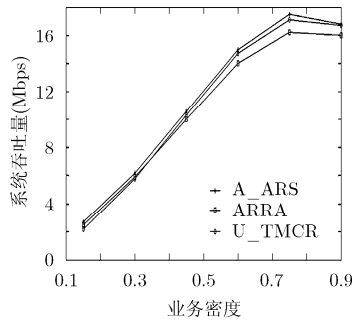


图 1 系统吞吐量随业务密度的变化关系

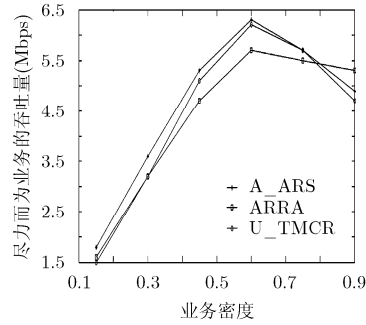


图 2 FTP 用户的平均传输速率与业务强度的关系

图 3(a)和图 3(b)分别表示语音和视频的丢包率, 丢包率要求 ϵ (1%)如图中虚线所示。从图中可以看出, A_ARS 算法的语音和视频数据包的丢包率在业务密度小于 0.45 之前几乎为 0, 而其他两个方案在业务密度约为 0.3 时就开始增加了。也可以看出 A_ARS 方案的语音和视频丢包率在业务密度接近 1.0 之前都低于 1%违反概率要求的丢包率。但是, U_TMCR(ARRA)方案的语音丢包率在业务密度为 0.9(0.8)之前都低于违反概率要求的丢包率。而对于视频而言, ARRA 方案在业务密度为 0.8 时丢包率就违反要求, U_TMCR 方案在接近 1.0 时才违反 1%的概率要求。这是因为 A_ARS 方案根据 RT 业务的紧急程度值来分配资源决定服务的顺序。而 ARRA 方案的丢包率随着业务密度的增加而增加, 这是因为 ARRA 方案仅根据违反 QoS 之前的剩余时间来调节用户的优先级, 因此, 实时用户的优先级可能低于非实时用户的, 究其原因是 NRT 业务通常比 RT 业务的数据包大。

图 4(a)及图 4(b)分别显示了语音和视频用户的平均数据包延迟, 图中用虚线标出了最大数据包延迟 D_{max} , 对于所有的算法, 平均数据包延迟都低于延迟要求。同时也可以看出, 在大多数情况下, A_ARS 算法的时延也低于其他两种算法。这是因为 A_ARS 算法能够实现最大的系统吞吐量, 并且赋予 RT 用户的优先级高于其他用户的优先级。但是, 当用户数量很大时, 如业务密度为 0.9, A_ARS

方案将推迟传输视频数据包而更多的资源为语音数据包传输。因此, A_ARS 方案视频业务的延迟大于 U_TMCR 方案的延时。从图中也可以看出, 当业务密度超过 0.6 时, U_TMCR 方案的语音和视频数据包延时低于 ARRA 方案的延时。这是因为 U_TMCR 方案中紧急的 RT 用户有较高的被服务概率, 但是 ARRA 方案中 RT 用户的紧急数据包的优先级可能小于 NRT 数据包的优先级。因此, 通过图 3 和图 4 可以看出, 在业务强度小于 0.9 时, A_ARS 算法对于 RT 业务在丢包率和延时方面优于其他两个方案。

最后, 对 A_ARS, U_TMCR 和 ARRA 3 种方案的计算复杂度进行比较。图 5 表示 3 个调度方案的计算时间, 图中虚线表示帧周期(5 ms)。可以看出 3 个方案的计算时间都小于帧周期, 其中, A_ARS 方案的计算时间递增, 而 U_TMCR 和 ARRA 方案的计算时间在业务密度为 0.45 之前递增, 然后开始下降。当业务密度小于 0.65 时, A_ARS 方案的计算时间小于 U_TMCR 和 ARRA 方案的计算时间。这是因为随着业务密度的增加, A_ARS 方案搜索更多的可能组合, 因此需要更多的计算时间。然而, 当业务密度较低时, U_TMCR 方案中的 CSA 和 ARRA 中的通用函数的优点不明显, 需要更多的迭代次数来分配一帧的 L 个符号。当业务密度较高时, 这两种算法能够连续地分配 OFDMA 符号, 因此计算时间降低。

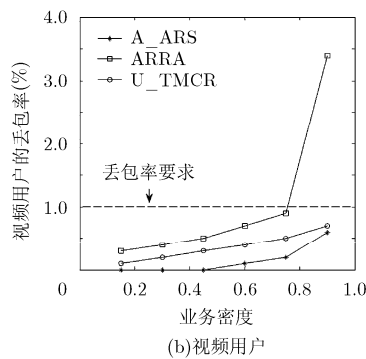
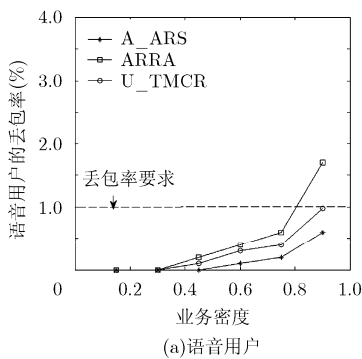


图 3 语音用户和视频用户的丢包率与业务强度的关系

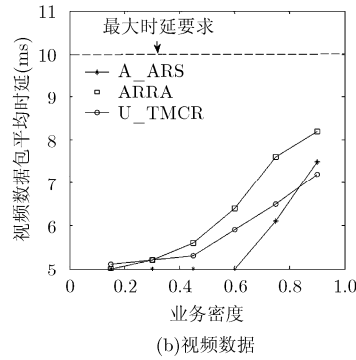
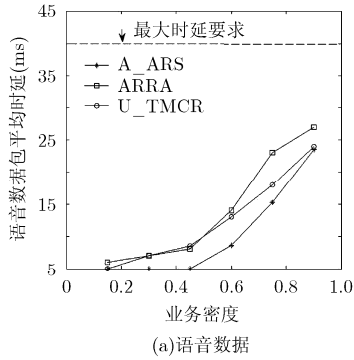


图 4 语音数据包和视频数据包平均时延

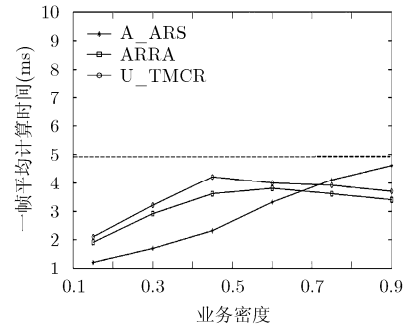


图 5 平均计算时间与业务强度的关系

5 结束语

本文针对 OFDMA 系统下行链路提出了一种多业务自适应资源调度算法，该算法包括两个阶段。第 1 阶段中，基于有效容量推导出最小的时隙数保证实时业务的 QoS，在第 2 阶段通过多用户分集和频率分集来设计一个简单而有效的调度算法，在保证实时业务 QoS 的前提下最大化系统的吞吐量。

仿真结果表明，本文所提算法与 ARRA 和 U_TMCR 算法相比，在 QoS 要求保证下，业务密度为 0.75 时，系统的吞吐量分别提高了 8.02% 和 2.34%。本文所提算法的整体满意度要高于 ARRA 和 U_TMCR 算法，这是因为本文所提算法仅分配最少的资源以保证 RT 业务的 QoS，并因此可以为 NRT/FTP 业务分配更多的可利用资源。此外，在业务强度小于 0.65 时，本文所提算法的计算时间也低于 U_TMCR 和 ARRA。

参考文献

- [1] Hatoum A, Langar R, Aitsaadi N, et al. Cluster-based resource management in OFDMA femtocell networks with QoS guarantees[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(5): 2378-2391.
- [2] Winston W L Ho and Liang Ying-chang. Optimal resource allocation for multiuser MIMO-OFDM systems with user rate constraints[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(3): 1190-1203.
- [3] Ma Wen-ming, Zhang Hai-jun, Wen Xiang-ming, et al. Utility-based cross-layer multiple traffic scheduling for MU-OFDMA[J]. *Advances in Information Sciences and Service Sciences (AISS)*, 2011, 3(8): 122-131.
- [4] 严伟, 朱晓荣, 陈守宁, 等. 基于社会福利最大化的柔性业务资源分配研究[J]. *通信学报*, 2013, 34(6): 165-173.
Yan Wei, Zhu Xiao-rong, Chen Shou-ning, et al. Flexible business resource allocation based on the social welfare maximization[J]. *Journal of Communications*, 2013, 34(6): 165-173.
- [5] Tsai C F, Chang C J, Ren F C, et al. Adaptive radio resource allocation for downlink OFDMA/SDMA systems with multimedia traffic[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(5): 1734-1743.
- [6] Yen C M, Chang C J, and Wang L C. A Utility-based TMCR scheduling scheme for downlink multiuser MIMO-OFDMA systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(8): 4105-4114.
- [7] Chung Yao-hsing and Chang Chung-ju. A balanced resource scheduling scheme with adaptive priority thresholds for OFDMA downlink systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(3): 1276-1286.
- [8] Chung Wen-ching, Chang Chung-ju, and Wang Li-chun. An intelligent priority resource allocation scheme for LTE-A downlink systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2012, 1(3): 241-244.
- [9] Marco M and Perez-Neira A I. Efficient margin adaptive scheduling for MIMO-OFDMA systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(1): 278-287.
- [10] WiMAX forum. Wimax system evaluation methodology V.1.0[S]. 2007.
- [11] 严伟, 朱晓荣, 邵世祥. 下行多业务 OFDMA 系统中基于有效容量的资源分配算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(9): 2236-2240.
Yan Wei, Zhu Xiao-rong, and Shao Shi-xiang. In the downlink OFDMA system more business resource allocation algorithm based on the effective capacity study[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(9): 2236-2240.
- [12] IEEE Standard Std. 802.16-2004. Local and metropolitan area networks-part 16: air interface for fixed broadband wireless access systems[S]. 2004.

朱晓荣：女，1977 年生，博士，副教授，研究方向为泛在无线网络、异构网络、无线传感器网络。

罗小琴：女，1989 年生，硕士生，研究方向为移动互联网。

朱洪波：男，1956 年生，博士，教授，研究方向为移动通信和宽带无线技术。