

家庭基站中多业务融合的资源调度算法研究

Research on Resource Scheduling Algorithm for Multi-service Fusion in Femtocell

凌启东¹, 阳媛², 王博³(1. 徐州工业职业技术学院, 江苏 徐州 221440; 2. 东南大学, 江苏 南京 211189; 3. 中国移动通信集团江苏有限公司, 江苏 徐州 221600)

Ling Qidong¹, Yang Yuan², Wang Bo³(1. Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221440, China; 2. Southeast University, Nanjing 221008, China; 3. China Mobile Group Jiangsu Limited Company, Xuzhou 221600, China)

摘要:

为了提升家庭基站的无线资源利用效率,适应多业务融合通信的发展需求,设计了一种多业务融合接入的家庭基站系统。分析了家庭基站环境中业务的特点,提出了一种多业务的自适应动态调度算法,根据不同分集内业务的QoS特点,设计了独立的资源分配策略,为用户提供差异化的服务,同时在系统负荷状态改变时,自适应调整业务优先级计算公式。仿真结果显示,算法在轻载时获得了更好的吞吐量,在过载时大大降低了丢包率,保障了业务的公平性。

关键词:

家庭基站; 服务质量; 资源调度; 5G

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2019.09.013

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1007-3043(2019)09-0061-06

Abstract:

To improve the utilization efficiency of the wireless resource of Femtocell, and adapt to the development requirement of multi-service fusion communication, a Femtocell system is designed, which is based on multi-service integrated access. The characteristics of business in Femtocell environment are analyzed, and an adaptive dynamic scheduling algorithm based on multi-service is proposed. According to the QoS characteristics of the service in different sets, the independent resource allocation strategies are designed, which can provide different services for users. At the same time, when the state of system load changes, the calculation formula of services priority is adaptively adjusted. The simulation results show that the algorithm achieves better throughput in light load, greatly reduces the loss rate and ensures the fairness of the business when overload occurs.

Keywords:

Femtocell; QoS; Resource scheduling; 5G

引用格式: 凌启东, 阳媛, 王博. 家庭基站中多业务融合的资源调度算法研究[J]. 邮电设计技术, 2019(9): 61-66.

0 引言

随着物联网技术的发展和通信数据的爆发式增长,4G的时频效率将难以满足未来通信容量的需求,如何提高时频资源调度算法的利用效率将是未来5G需要解决的首要问题^[1]。据统计,80%以上的通信业

务数据发生在室内环境,室内通信已成为通信网络中最重要的接入环节^[2]。在室内环境中,多个运营商的Wi-Fi信号、室分信号、室外宏站信号共存,信号间干扰严重,频谱资源浪费较大,增加了室内无线通信网络的复杂性,急需设计一种全新架构的家庭基站系统,融合多制式信号的接入,优化无线资源的分配,满足多用户多业务数据高速增长下的QoS需求,提高用户体验。无线通信MAC层经典的调度算法有轮循(RR)调度算法、比例公平(PF)调度算法和最大载干比(Max C/I)调度算法,这些算法实现简单,但没有考虑到时延等QoS特点,已经不适合当前通信业务的多

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(61601123);江苏省双创博士项目(1122000131);徐州市科技发展基金项目(KC17132)

收稿日期: 2019-06-07

QoS需求。为此,文献[3-8]研究了基于QoS参数的资源分配算法,在一定程度上提高了业务的服务质量。文献[3]针对LTE系统提出了一种基于QoS的资源机会调度算法,在一定程度上保证了不同用户业务的公平性,但是仅考量了业务数据速率指标,不能满足不同种类业务的QoS要求^[3]。文献[4]提出了一种基于RB的metric值的调度算法,优先将信道质量好的RB分配给优先级高的业务,可以保证系统的吞吐量,但是易造成优先级低的用户丢包率恶化。文献[5]研究了一种基于QoS的多业务资源调度算法,根据业务的实时性采用不同的调度策略,但是没有考虑到业务块的特点,易造成资源的浪费。文献[6]研究了业务的QCI的差异性,提出了QMDS算法,动态调整业务优先级,但是没有考虑到无线资源的有限性,资源调度算法固定不变,很难在负荷动态变化较大的开放性环境中满足多用户、多业务的需求,在过载时业务的QoS没有保证。文献[7]针对5G的小数据提出了一种云化资源共享的模式,提升了时频资源利用效率,但是没有考虑到大数据业务的QoS需求。文献[8]针对家庭基站的公平性提出了一种半合作博弈的资源分配方案,但是不能满足多业务的QoS需求。

针对室内通信网络特点,设计了一种全新架构的家庭基站系统,融合了室内无线网络,满足多运营商、多业务共存的需求。在此基础上提出了一种基于QoS的自适应多业务融合分集调度算法(AD-MF——Adaptive Diversity Scheduling Algorithm for Multi-service Fusion),根据未来5G环境下家庭网络中业务QoS特点对业务进行了分类,采用不同的资源调度策略为用户提供各种差异化服务。当资源负荷状态变化时,自适应调整资源的分配策略,平衡了数据吞吐率与业务QoS之间的矛盾,适应了日益增长的接入终端的业务多样化和QoS差异化的趋势,具有较强的理论意义和实用价值。

1 家庭基站系统

目前室内无线接入网主要有传统的宽带Wi-Fi网络、宏站移动网络和室分移动网络,主要的用户有传统的电信终端、移动终端和各种物联网终端,随着服务质量要求的提高及物联网技术的高速发展,家用无线接入用户的种类和数量增长迅速,相应的业务也呈爆发式增长,高清视频、实时游戏、数字电话、物联网M2M(Machine-to-Machine)等业务日趋普及,而现有

家庭无线网络重叠干扰严重、频带占用混乱、带宽瓶颈、可扩展性差等缺点,无法满足多用户、多业务高QoS的需求,室内无线网络已成为运营商和网络设备制造商关注的重点。为此,提出了一种基于多业务融合的综合接入家庭基站系统,如图1所示,融合多制式网络,实现了室内多用户的接入,系统主要包括多业务综合接入设备和多业务融合中心设备。多业务综合接入设备布置在室内,实现移动手机用户、传统电信用户、物联网终端用户的无线接入,通过资源调度算法为无线接入用户统一调配时频资源,达到无线资源利用的最大化,在MAC层通过2级标签T1、T2区分运营商和用户类型,保障业务的QoS需求。多业务融合中心设备负责汇聚小区的综合接入设备的数据,剥离相关的数据标签,根据标签T1分配不同的传输资源及传输优先级,根据标签T2转发到对应的运营商城域网中,实现接入网和具体城域网的无缝连接。多业务融合家庭基站系统深度融合了无线接入方式,支持多样化的应用场景,提高了频谱利用率,大大降低了网络建设的复杂度,向下兼容了业务实体,向上兼容了网络运营商,使得下一代无线接入网络能更好地满足业务多样性的需求。

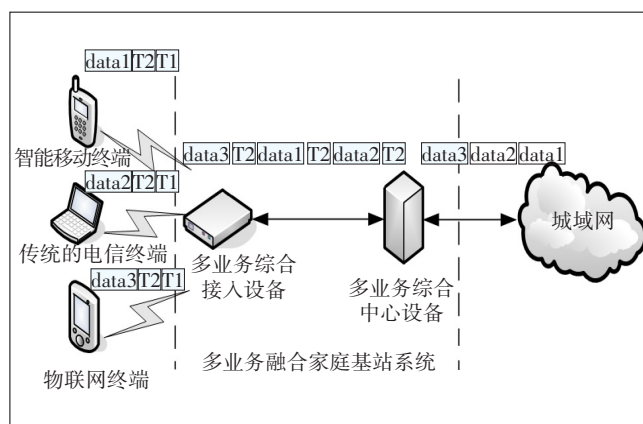


图1 多业务融合家庭基站系统结构

2 多业务融合的资源调度算法

2.1 家庭基站多业务模型

开放的家庭基站网络中包含了传统的电信业务和移动业务,同时接入了日益增长的物联网业务,业务呈现类型多样化、个性化、宽带化等特点^[9],业务相应的时延、丢包率、吞吐率等QoS要求也相差较大,基于基本的业务类型^[10],结合基站家庭系统的新特点,将用户业务分为4类(见表1):固实时业务、流媒体业

表1 业务特点及类型

业务类型	QoS特点	典型业务
固实时业务	时延敏感、允许一定的丢包率	VoLTE、VoIP电话、会话多媒体
流媒体业务	时延敏感度较高、吞吐量较大	流媒体视频、IPTV
软实时业务	时延敏感度较高、丢包率低	物联网M2M业务、短信业务
后台业务	丢包率低、吞吐量较大、时延不敏感	下载、E-mail、上网业务

务、软实时业务、后台业务。固实时业务主要是速率恒定的实时通信业务,例如VoLTE、IP电话等,该类业务需要足够稳定的保证带宽,对丢包和时延的变化很敏感,双向数据流传输。流媒体业务主要是具有突发性和相关性的大数据块业务,例如点播业务、IPTV等,该类业务需要较大的保证带宽,可以允许一定的时延抖动和丢包率,单向数据流传输。软实时业务主要是物联网类控制业务,例如开关控制业务、报警业务等,该类业务需要带宽较少,实时交互性较高,用户体验要求高,需要一定的时延要求。后台业务是实时性要求不高的数据业务,例如FTP下载、Internet数据业务等,该类业务对时延、抖动及丢包相对不敏感,有一定的容忍度,交互性不高。接入系统需要根据业务的QoS特点设计资源调度算法,充分利用系统资源,在满足系统中业务的服务质量要求的基础上,提升系统的吞吐量。

根据业务的不同类型和特点,将业务分为2个集合:固实时业务集和非实时业务集,其中非实时业务集包括流媒体业务、软实时任务和后台业务。

定义数据业务集:

$$S = (T_{i_1}, T_{i_2}, \dots, T_{i_N}; T_{s_{11}}, T_{s_{12}}, \dots, T_{s_{kj}}) \quad (1)$$

式中:

$T_{i_j} (0 \leq i \leq N, 0 \leq j \leq J)$ ——固实时业务

$T_{s_j} (0 \leq i \leq K, 0 \leq j \leq J)$ ——非实时业务

对于每个数据业务 T , 属性参数用四元组表示为:

$$T = \langle CQI, A, r, D \rangle \quad (2)$$

式中:

CQI——业务的信道质量信息,用户周期性上报下行信道质量信息^[11]

A——业务的到达时间,对于非实时任务是不可预测的

r——该用户业务预估的传输速率

D——业务的绝对截止期,即数据业务在这个时间点应该被分配资源完成传输,否则数据就无效

2.2 多业务分集调度算法

针对传统调度算法在开放家庭环境下存在的不足,根据家庭基站环境中业务的特点,提出了AD-MF动态调度算法。AD-MF算法的总体思路是基于不同分集内业务的特点,设计了不同的优先级计算公式和资源分配策略,为用户提供差异化的QoS服务。在负荷发生变化时,动态调整业务分集优先级和具体业务的队列优先级,在轻载时提升系统的整体吞吐量,在过载时满足重要业务的QoS要求,同时尽力保证公平性。

具体地,在系统轻载时,多业务资源调度算法主要包括:

a) 不同分集的业务采用不同的资源分配策略。每个集合内的业务数据分组按照各自的优先级公式计算进行独立排队,固实时任务队列优先进行调度,保证实时任务的服务质量,当固实时业务调度完成后,再进行非实时业务的调度。固实时业务按照固定速率进行数据传输,因此在调度时采用半静态调度(SPS)策略,减少控制信息的资源消耗,增加了系统容量;非实时任务基于每个调度周期采用动态的资源调度策略,根据优先级顺序重新分配资源。

b) 基于分集内业务的特点设计独立的优先级计算公式。固实时业务对时延和抖动有严格的要求,因此在优先级的设计中主要考虑时间因素,另外在信号质量较差的情况下,可能会提升数据的误码率,优先级的设计倾向于信道质量较差和重传的数据,保证环境较差地点数据的可靠传输。 t 时刻固实时业务的优先级计算公式如式(3)所示。

$$P_{Lij} = \begin{cases} cq_i \times f_{ij}(t) \times \alpha_{nij} & i \in \text{FRT} \\ cq_i \times g_{ij}(t) \times f_{ij}(t) \times \alpha_{nij} & i \in \text{NRT} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$f_{ij}(t)$ ——用户 i 业务 j 的时间函数

α_{nij} ——自动重传系数

$g_{ij}(t)$ ——用户速率函数

cq_i ——用来表征用户下行信道质量指示因子,由于在室内环境中墙的阻隔对信号有很大的影响,为了保证信道质量差的业务的服务质量,调度器优先调度CQI值低的用户业务分组,用CQI值归一化的数值来计算 cq_i ,如公式(4)所示

$$cq_i = \begin{cases} \frac{CQI_{\max} - CQI_i}{CQI_{\max} - CQI_{\min}} & CQI_{\max} \neq CQI_{\min} \\ 1 & CQI_{\max} = CQI_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

业务都有时间生命, 需要保证在截止期之前传输。\$f(t)\$ 是用户业务的时间函数, 表征业务数据的紧迫性, 具体计算公式如式(5)所示, 业务分组数据排队等候的时间越长, 数据分组距离截止期越近, 时间越紧迫, 对应的优先级权值 \$f(t)\$ 越高, 越容易被调度。当业务分组超过等待截止时间, 即 \$D_{ij} - \Delta D_{ij} \le 0\$ 时, 丢弃该用户业务分组, 避免资源的浪费。

$$f_{ij}(t) = \frac{D_{ij} - \Delta D_{ij}}{D_{ij} - \Delta D_{ij}} \quad (5)$$

式中:

\$D_{ij}\$——业务绝对截止期

\$\Delta D_{ij}\$——\$t\$时刻业务已等待时间

信息在无线信道的传输过程中, 由于干扰等因素, 会造成部分分组数据的丢失或者非恢复性破坏, 为了保持信息的完整性, 这部分分组数据将执行重传机制, 此时这类分组数据的时间尤其重要, 因此在优先级中设计了自动重传系数 \$\alpha_n\$ 来提升该类分组数据的优先级, \$\alpha_n\$ 的计算公式如式(6)所示, 其中 \$N\$ 为预设的重传次数门限, 随着自动重传次数 \$n\$ 的增加, \$\alpha_n\$ 逐渐增加, 大大地提高了业务数据包优先级, 当自动重传次数 \$n\$ 大于预设值 \$N\$ 时, 自动丢弃该数据包。

$$\alpha_{nij} = 1 + \frac{n_{ij}}{N} \quad (6)$$

非固实时业务优先级的计算公式如式(3)所示, 相对于固实时业务优先级, 增加了 \$g(t)\$ 参数。\$g(t)\$ 主要用于调节系统的吞吐量与公平性的关系, 在系统轻载环境下, \$g(t)\$ 函数表达式如式(7)所示, 其中, \$r_i\$ 表示该用户业务预估的 \$t\$ 时刻的传输速率, \$R_{(t-1)}\$ 表示该用户前一个调度周期内的速率, 当该用户第 1 次接入时, \$R_{(t-1)}\$ 的计算是前一个调度周期所有用户业务的平均速率, 当用户申请速率高于上一个调度周期的速率时, 提高了该业务的优先级, 旨在提升整个系统吞吐量。

$$g_{ij}(t) = \frac{r_{ij}}{R_{i(t-1)}} \quad (7)$$

理论研究表明, 负荷对系统资源的调度性能将产生很大的影响^[12]。算法在每个调度周期进行负荷跟踪, 在系统负荷轻载时, 基本都能满足业务的截止期, 算法设计的重点是提高系统的吞吐量; 当过载发生时, 系统不可能保证所有的业务都能够满足截止期, 如果优先级的计算仍然倾向于速率高的业务, 容易造成低速率业务时延增大、分组丢失甚至服务中断, 导致系统性能恶化, 此时算法设计的重点是保证重要业

务的 QoS 要求, 同时提高公平性, 避免业务的饿死, 保持系统稳定, 提升用户体验。当系统资源过载时, 优先级计算如式(8)所示, 其简化了优先级的计算, 同时系统的负荷满足式(9), 确保了系统的稳定性。对于固实时业务, 为了资源利用最优化, 减少因信道质量差而导致的误码和重传占用过多的资源, 精简了自动重传系数 \$\alpha_n\$, 对于重传数据业务不进行优先调度, 无线信道资源的分配偏向于信道质量好的用户和等待时间长的业务, 分别通过 \$cq\$ 和 \$f(t)\$ 来实现。对于非固实时业务, 调度的策略将偏向公平性, 尽力满足大部分业务, 无线信道资源的分配偏向于信道质量好的用户和速率小的用户, \$cq'\$ 的计算公式如式(10)所示, 与信道质量成正比关系。\$g'(t)\$ 函数表达式如式(11)所示, 其中, \$R_{i(t-1)}\$ 表示用户 \$i\$ 在上个调度周期的速率, \$\bar{R}_{i(t-1)}\$ 表示上个调度周期所有用户的平均速率, \$\bar{r}_i\$ 表示用户 \$i\$ 在上个调度周期的平均速率, 速率权值偏向申请资源少的业务和上个调度周期速率低的业务。

$$P_{nij} = \begin{cases} cq_i \times f_{ij}(t) & i \in \text{FRT} \\ cq'_i \times g'_{ij}(t) & i \in \text{NRT} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{Load}_{\text{thresh}} \leq \left(\sum_{i=1, i \in \text{FRT}}^N \sum_{j=1}^J R_{ij} + \sum_{i=1, i \in \text{NRT}}^K \sum_{j=1}^J R_{ij} \right) / B \leq \text{Load}_{\text{upper}} \quad (9)$$

$$cq'_i = \begin{cases} \frac{\text{CQI}_i - \text{CQI}_{\min}}{\text{CQI}_{\max} - \text{CQI}_{\min}} & \text{CQI}_{\max} \neq \text{CQI}_{\min} \\ 1 & \text{CQI}_{\max} = \text{CQI}_{\min} \end{cases} \quad (10)$$

$$g'_{ij}(t) = \frac{\bar{r}_i \bar{R}_{i(t-1)}}{r_i R_{i(t-1)}} \quad (11)$$

AD-MF 算法考虑了不同分集内业务的 QoS 差异, 在同一分集内部通过具体的 QoS 参数权值系数灵活调整优先级, 同时区分了重载和轻载时的优先级调度策略, 保证了业务 QoS 要求和系统吞吐量的最大化。算法控制流程如图 2 所示, 采用两级队列调度机制, 如果是 SPS 业务, 直接分配与上个 SPS 周期相同位置的时频资源, 如果是新业务, 根据 CQI、截止期、速率、重传次数计算业务优先级, 按照排队顺序分配时频资源。非实时业务根据负荷情况选择不同的优先级公式计算优先级, 按照优先级的高低分配资源, 直到资源不满足负荷条件就结束分配。

3 仿真与分析

3.1 测试条件

为了评估 AD-MF 调度算法的性能, 基于 Visual

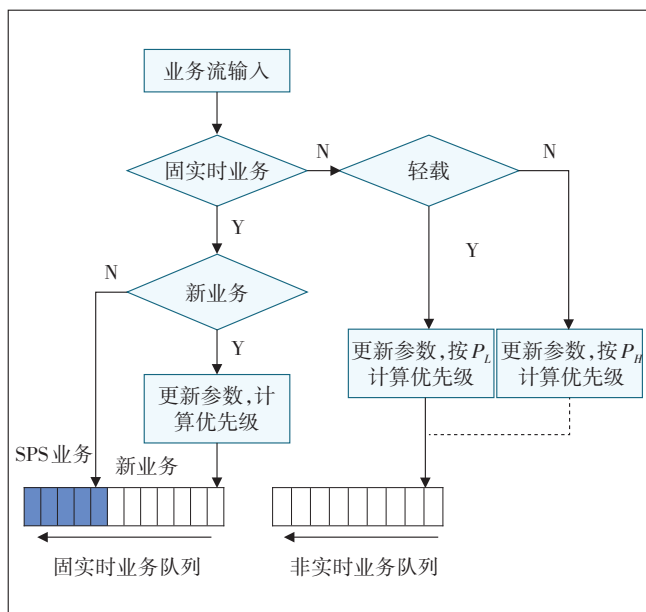


图2 多业务分集调度算法流程

Studio 2013 和 IT++ 4.3.1 搭建系统级仿真平台, 模拟 5G 的家庭基站环境, 采用华为提出的 5G 空口技术: 滤波正交频分复用(F-OFDM)和稀疏码多址接入(SCMA)技术实现时频资源的配置与复用^[13-14], 检测算法选用 MPA^[15], 通过星座操作设计了多维码本, 为多元化的业务需求提供灵活的支撑, 其他仿真参数如表 2 所示。

表2 仿真参数

参数	典型值
工作频率/MHz	3 345
带宽/MHz	10
子带带宽/kHz	720
保护间隔/kHz	$N \times 15 (N=1, 2, 3, 4)$
Femtocell 发射功率/dBm	21
UE 发射功率/dBm	23
小区半径/m	10
路径损耗模型	$PL(d) = 20 \lg f + 30 \lg d + 20n - 28$ f 单位: MHz, d 单位: m, n : 隔墙数量
SPS 周期/ms	20

3.2 仿真结果分析

以 RR 算法、QMDS 算法为比较基线^[6], 选取系统吞吐量、公平性指数、丢包率作为评价指标, 验证 AD-MF 算法的性能。针对家庭多业务场景, 设置单用户多业务任务, 用户位置随机分布, 选择 4 种典型业务: VoLTE 业务、IPTV 业务、物联网控制业务、FTP 下载业务, 对应的速率分别为 34、242、47、512 kbit/s, 时延截

止期分别为 100、300、150、500 ms, 重传次数门限 N 为 5, 每个用户在线 5 个业务, 比例为 1:1:2:1, 用户数目为 5~65, 实验时以 5 个用户为单位递增, 按照现网 KPI 指标, 系统过载门限范围为 $[0.85, 0.95]$ 。

图 3 为 3 种算法的吞吐量随着用户数增加的对比结果, 在负荷较轻时, 3 种算法的吞吐量随着用户数的增加而增加, 由于在轻载时 AD-MF 算法倾向于调用网络状态好和速率高的业务, 性能较 QMDS 算法略好。在过载时, AD-MF 算法性能明显优于其他 2 种算法, AD-MF 算法在过载时调度的策略将偏向公平性, 且根据负荷门限设置了排队业务的数量, 避免了过多业务排队导致的资源分配死锁, 吞吐量基本保持稳定。

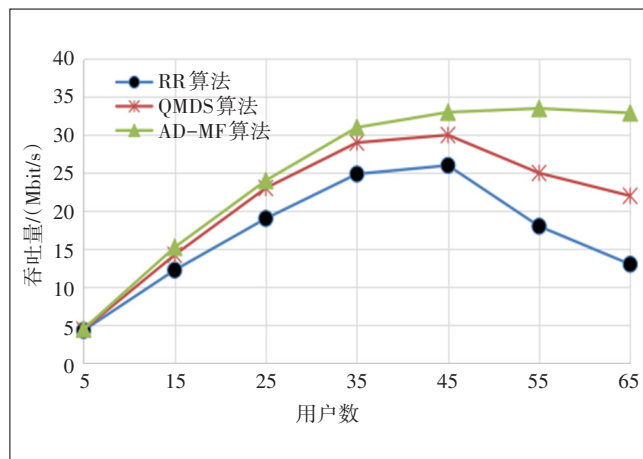


图3 系统吞吐量

算法的公平性仿真结果如图 4 所示, 在系统负荷较轻时, 3 种算法的公平性指数相差不大, 3 种算法在设计时都考虑到了业务的公平性, 随着负荷的增加, 3 种算法的公平性指数呈下降的趋势, 其中 RR 算法的

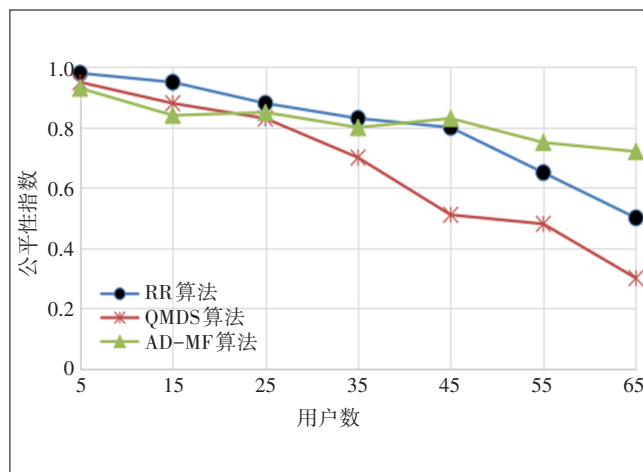


图4 用户公平性

公平性较好。当系统过载时,RR算法和QMDS算法性能下降较快,而由于AD-MF算法在过载时优化了优先级设置,偏重于每个用户的小速率业务,因此用户公平性性能最好。

图5给出了3种算法的系统丢包率统计结果,在用户数不大于25时,此时负荷小于65%,3种算法的性能很好,丢包率都小于5%,随着用户数的增加,算法的丢包率增加明显,其中RR算法丢包率最高,QMDS算法和AD-MF算法在设计时基于业务的QoS特性进行调度,在负荷较轻时性能相对较好,但当系统过载后,QMDS算法性能恶化,丢包率大幅提升,MF-AD算法由于设置了过载负荷门限,系统能保持稳定运行,丢包率保持了一定的稳定性。

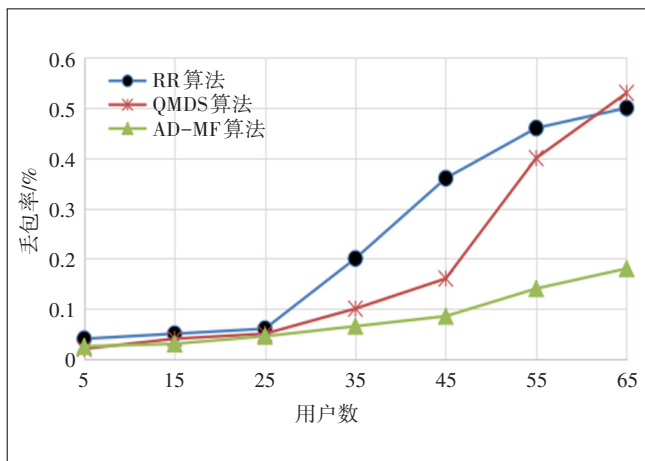


图5 系统丢包率

4 结论

家庭基站是未来5G网络的一个重要组成部分,其系统结构和资源调度算法都是需要解决的关键技术。针对5G家庭网络的应用环境,设计了一种基于多业务综合接入的家庭基站系统结构,可以满足多业务、多运营商的融合通信。根据家庭环境下业务的特点,提出了一种基于业务分集的资源调度策略,为用户提供差异化的服务。基于5G的空口技术对该算法进行了仿真分析,实验结果表明该算法具有良好的性能,在过载情况下仍然能保持较高的稳定性,对5G网络中的资源分配算法的研究有着重要的意义。

参考文献:

[1] TAO Y, LIU L, LIU S, et al. A survey: several technologies of non-orthogonal transmission for 5G [J]. China Communications, 2015, 12

(10):1-15.

[2] 龚胜利,金勇. Femtocell网络中基于联合传输的分簇与功率分配算法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(10):1-2.

[3] MAIA A M, VIEIRA D, CASTRO M F D, et al. A fair QoS-aware dynamic LTE scheduler for machine-to-machine communication [J]. Computer Communications, 2016, 89-90(C):75-86.

[4] 李园园,金杰,苏寒松,等. LTE系统下行基于调度度量值的资源分配方案[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(12):4100-4104.

[5] 朱晓荣,罗小琴,朱洪波. 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[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6):1298-1303.

[6] 肖清华. 基于QCI的LTE多业务动态调度算法[J]. 邮电设计技术, 2017(7):32-35.

[7] WANG Y P E, LIN X, ADHIKARY A, et al. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(3):117-123.

[8] 金勇,龚胜利. 密集家庭基站网络中基于分簇的资源分配方案[J]. 计算机应用, 2018, 38(1):217-221.

[9] 范文倩. CoMP下行链路资源分配算法的研究[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2016.

[10] ZORIC S, KOS M, BAJRIC H. Fairness of scheduling algorithms for real-time UMTS traffic in case of IP link congestion [C]//3rd international Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. 2011:5-7.

[11] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification: 3GPP TS 36.321[S/OL]. [2019-04-28]. [ftp://ftp.3gpp.org/](http://ftp.3gpp.org/).

[12] 朱勇,李伟,罗军舟. 一种面向多用户的负载感知动态服务选择模型[J]. 软件学报, 2014, 25(6):1196-1211.

[13] WEKKEM P, BAZZI J, KUSUME K, et al. On Regular Resource Grid for Filtered OFDM [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(12):1-5.

[14] Huawei 5G: New Air Interface and Radio Access Virtualization [EB/OL]. [2019-04-28]. http://www.huawei.com/minisite/5g/img/New_Air_Interface_andRadio_Access_Virtualization_en.pdf.

[15] DU Y, DONG B, CHEN Z, et al. A fast convergence multiuser detection scheme for uplink SCMA systems [J]. IEEE Wireless communications Letters, 2016, 5(41):388-391.

[16] 吴雄,葛文萍,张雪婉,等. SCMA系统中改进的MAX-Log MPA多用户检测算法[J]. 电子技术应用, 2018, 44(5):117-120+129.

[17] 唐梦雪. SCMA系统低复杂度多用户检测算法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.

作者简介:

凌启东,毕业于中国矿业大学,讲师,硕士,主要研究方向为无线宽带通信、信息处理;阳媛,毕业于德国柏林自由大学,讲师,博士,主要研究方向为无线自组网络技术、无线宽带通信;王博,毕业于中国矿业大学,工程师,硕士,主要研究方向为无线网络规划与优化、通信与信息系统。