

DAS:GSPN 成员载波动态自适应调度策略

贾玉栋¹ 陈 昕¹ 向旭东²

(北京信息科技大学计算机学院 北京 100101)¹ (北京科技大学计算机与通信工程学院 北京 100083)²

摘 要 随着移动业务需求的多样化,有限的无线频谱资源已无法满足用户对高质量、高效率和高带宽的数据业务的需求。在现有的低频载波环境下,引入高频载波可以有效扩大系统容量。在同一小区部署多个成员载波的过程中,成员载波调度策略是其中的关键问题之一,直接影响 LTE 用户的服务质量(Quality of Service, QoS)和无线资源的利用率。针对蜂窝网络中成员载波的调度策略问题,采用广义随机 Petri 网(Generalized Stochastic Petri Nets, GSPN)方法建立了多成员载波系统模型,同时在分析用户业务类型和成员载波特性的基础上,提出了一种动态自适应调度策略(Dynamic Adaptive Scheduling, DAS)。通过 TimeNets 仿真工具,对系统中成员载波选择、用户排队机制和资源块(Resource Block, RB)分配等要素构建仿真环境。仿真实验结果表明:一方面,动态自适应调度策略(Dynamic Adaptive Scheduling, DAS)的掉线率低于基于服务类型的调度策略(Based-Service Scheduling, BSS)和最短队列优先调度策略(Shortest Queue priority Scheduling, SQP);另一方面,在相同的到达率的前提下,在到达率较低时,其吞吐量逼近于基于服务类型的调度策略 BSS;在到达率较高时,逼近于最短队列优先调度策略 SQP。

关键词 成员载波, LTE, 广义随机 Petri, 掉线率, 吞吐量

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.021

DAS: Generalized Stochastic Petri Nets Approach to Component Carrier Dynamic Adaptive Scheduling

JIA Yu-dong¹ CHEN Xin¹ XIANG Xu-dong²

(School of Computer, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China)¹

(School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)²

Abstract As users' demand for mobile services shows diversity trend, the demand of limited wireless spectrum resource has been unable to meet the demand of high-quality, high-efficiency and high-bandwidth data services. By introducing the high frequency carrier in the low frequency carrier environment, it will improve the system capacity. However, with multiple component carriers deploying in a cellular, how to design an effective scheduling strategy becomes one of the key issues in improving the quality of service requirements and making radio resource more efficient for LTE users. In light of the component carriers scheduling problem, we built the multiple component carriers systems by Generalized stochastic Petri nets. Meanwhile, based on the analysis of the types of users' services and characteristics of component carriers, a dynamic adaptive scheduling(DAS) strategy was proposed. Through the use of TimeNets simulation tool, an emulation environment which includes component carrier selection, LTE users queue mechanism and resource block allocation was set up. The simulation result shows that compared with the based-service scheduling(BSS) strategy and the shortest queue priority scheduling(SQP) strategy, the drop probability of DAS strategy is lower. Besides, in terms of throughput, DAS strategy is close to BSS strategy when arrival rate is low and close to SQP strategy when arrival rate is high.

Keywords Component carrier, LTE, GSPN, Drop probability, Throughput

1 引言

随着移动通信技术和终端软硬件的发展,智能终端呈现出种类多、性能更佳和移动性更方便的特点。据统计,在 2015 年,移动终端产生的数据流量每月达到了 4.4EB,并且在 2014 年末,移动终端设备的数量已经超过人类数量^[1]。随着移动业务从单一的语音通信发展到了多媒体领域,如图像、

音乐和视频等业务的多样化对有限的无线频谱资源形成严峻的挑战,频谱资源的短缺反过来制约着多业务的发展。因此,如何在有限的频谱资源下降低无线设备接入无线网络的失败概率,增大系统的吞吐量,提高无线资源利用率成为下一代无线通信技术的关键^[2]。

成员载波(Component Carrier, CC)属于无线资源的一种分配单位,其在宏蜂窝网络存在多种分布场景^[3],通常情况下

到稿日期:2015-09-02 返修日期:2016-01-01 本文受国家自然科学基金(61370065, 6150200),国家科技支撑计划(2015BAK12B03-03)资助。

贾玉栋(1989—),男,硕士生,主要研究方向为无线网络与性能评价, E-mail: jydcie@126.com; 陈 昕(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为计算机网络与性能评价、网络安全、航电网络; 向旭东(1986—),男,博士生,主要研究方向为性能评价、最优控制。

同一小区的频谱分布在不同的频带中,并且频带之间具有较大的频谱间隔。当所有载波的发射功率相同时,分布在高频带的成员载波提供的覆盖范围小于低频带的成员载波提供的覆盖范围。图1所示为一个常见的载波分布的应用场景,假设在系统中只有两个成员载波:F1为低频载波、F2为高频载波。由于不同频带载波的无线传输性质不同,高频载波的频率高,波长短,覆盖范围小,其携带载频点多,信息传输速率较高;而低频载波波长长,覆盖范围广。因此在无线网络中,用F1作覆盖及移动终端的低速率语音传输,用F2作高速率数据业务的传输,并且F1的覆盖范围大于F2的覆盖范围。

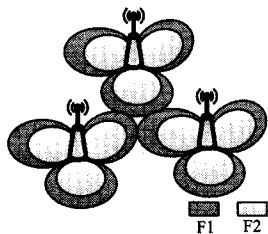


图1 宏蜂窝网络成员载波分布

载波调度策略是宏蜂窝基站根据一定的准则来决定用户以何种方式接入无线载波。一个合理的无线载波调度策略需要实时满足不同用户的业务需求,且动态地调整无线网络的负载,以最大化系统容量和满足用户的QoS需求。

目前,关于成员载波调度策略的研究多是基于LTE-A用户对载波进行聚合研究^[4,5],对LTE用户成员载波的调度策略的研究较少。当LTE用户在多成员载波情景下,Fu W H^[6]提出为每个成员载波设置一个权值,权值由载波的覆盖范围和用户类别决定,调度器采用比例公平算法根据权值大小分配成员载波,从而提高LTE用户和小区边缘用户的吞吐量。文献[7]针对LTE上行链路S-CDMA的资源分配问题,提出了基于缓冲区的分配策略,以提高系统上行链路的吞吐量。但其仅涉及到了MAC层物理资源块RB分配。文献[8]针对多载波的系统资源分配,提出了轮询调度策略。Tina H等人^[9]指出当LTE用户随机选择成员载波时,由于成员载波的信号稳定存在差异性,LTE用户优先选择信号强度好的成员载波,因此造成信号强度弱的成员载波资源的浪费,采用比例公平调度策略可以保证成员载波之间的负载均衡和无线资源的充分利用。上述的轮询调度策略不考虑成员载波之间的当前服务用户数目和服务速率,不适应于多成员载波间性能不一的情况,而且当到达速率比较大时,轮询调度策略会导致成员载波之间的负载不均衡。而有的研究者仅考虑了成员载波间性能的差异性,没有考虑用户业务类型的差异性,而不同的成员载波适合传输不同的业务类型数据。

本文围绕LTE用户在多成员载波环境下的资源分配问题,结合不同成员载波的信道特性,综合考虑了LTE用户的业务类型和多种调度策略的优缺点,运用排队论和随机Petri网对成员载波的选择和无线物理资源RB的分配进行了建模、求解与分析,在满足QoS的前提下降低了用户的掉线率,并保证了系统的吞吐量。

2 成员载波排队系统模型

基本的无线资源管理RRM模块如图2所示。RRM由两个模块构成,分别为接入控制模块(Admission Control,

AC)和RB资源调度模块(Resource Scheduling, RS)^[10]。首先,由宏蜂窝基站执行接入控制模块,根据无线资源控制信号(Radio Resource Control, RRC)为LTE用户终端分配相应的成员载波。其次,在每个传输时间间隔内,基站的RB资源调度模块RS根据用户当前的排队状态和RB的信道情况对资源和用户进行调度,以决定为不同用户分配不同数目的RB资源^[11]。在宏蜂窝系统中,每个用户可以分得0个、1个或者若干个RB,但是每个RB只能分配给一个用户,并且规定每个LTE用户只能使用一个成员载波,一个成员载波可服务多个LTE用户。

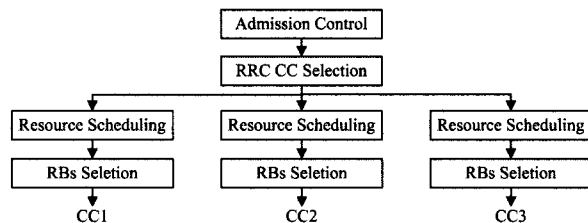


图2 无线资源管理RRM模块

为了更直观清晰地描述LTE用户的到达过程和基站对无线资源的分配流程,对图2所描述的资源分配进行进一步抽象,进而得到一个M/M/N队列^[12],如图3所示。

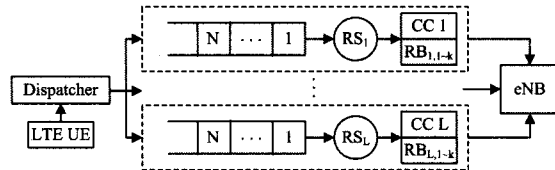


图3 成员载波排队系统

其中,LTE UE表示LTE用户的到达,且其到达时间间隔服从泊松(Poisson)分布;调度器Dispatcher根据用户业务类型和成员载波的信道特性,采用不同的调度策略为LTE用户分配特定的成员载波;每个成员载波均有一个RB资源调度器(Resource Scheduling, RS)和一个排队队列,队列的容量为N;CC_i表示第i个成员载波;RB_{i,1-k}代表第i个成员载波所包含的RB的数目K;调度策略的实施由宏蜂窝基站执行。

3 成员载波GSPN模型

3.1 Petri网类型

3.1.1 Petri网

PN是一个图形和数学的仿真工具,便于描述复杂系统中的进程或者部件的顺序、并发、冲突以及同步等关系。PN的图形特性可通过可视化工具来对系统的流程图或者方框图建模,而其系统的状态方程、代数方程可通过其数学特性抽象建模^[13]。一个Petri网模型是一个特殊的有向图,其组件由库所、变迁、输入输出函数组成,在图中分别以圆、长方形或线段及有向弧表示。库所代表系统所处的状态,变迁代表系统某个事件的发生或者系统状态的改变,一个变迁关联着多个输入输出库所,每个Petri网有一个初始标识(initial marking),记为 M_0 。初始状态是一个向量,其描述了被模拟系统的初始状态下各个库所中所包含托肯的数目。

3.1.2 广义随机Petri网

广义随机Petri网是随机Petri网的一个扩展和延伸,它定义为一个六元组: $GSPN=(P, T; F, W, M_0, \lambda)$ 。其中, $P=$

$\{p_1, \dots, p_n\}$ 为库所的集合; $T = \{t_1, \dots, t_m\}$ 为变迁的集合, 包括时间变迁和瞬时变迁, 每个时间变迁都服从一个指数分布。 $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 为连接变迁与库所的弧的集合; $W: F \rightarrow N^+$ 为弧权函数; M_0 为初始标识; $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ 为变迁平均实施速率的集合。由于瞬时变迁的优先级高于时间变迁, 因此在分析相同问题时, GSPN 模型的状态空间数目较随机 Petri 网 SPN 模型的状态空间数目大大减少, 有效缓解了“状态空间爆炸问题”。

3.2 成员载波的服务模型

3.2.1 双业务的 RB 资源调度 GSPN 模型

在 2/3G 时代, 用户业务对带宽要求比较低, 较少数目的子载波即可满足用户的需求, 所以将子载波作为无线资源的分配单位, 即可增强多用户分级和频率选择性分级。但是随着多业务的发展, 业务对传输速率要求不断提高, 势必需要基站提供更高的带宽。这直接导致子载波数目的成倍增长, 在短时间内对多个子载波进行调度并且为每个子载波分配功率, 造成了系统设计和计算的复杂度和难度。因此需要以 RB 为单位进行资源分配来降低复杂度, 这是合理的^[14]。

本文涉及两种业务, 分别是语音业务和视频业务。语音业务对 QoS 比较敏感, 且其所需的带宽较小, 而视频业务相对语音业务所需带宽较大。为了满足不同服务对速率和带宽容量的要求, 本文假设为每个语音业务分配 1 个 RB, 为每个视频业务分配 3 个 RB。其 RB 资源调度 GSPN 模型如图 4 所示。

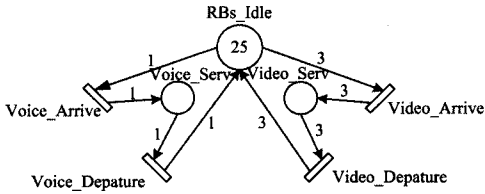


图 4 RB 资源调度模型

表 1 给出了图 4 模型中各库所与变迁的意义, 其中按照 3GPP 规范规定, 每个成员载波包含 25 个 RB。

表 1 图 4 中库所及变迁的含义

库所/变迁	含义
RBs_Idle	可用的 RB 的个数
Voice_Arrive	语音业务的到达
Voice_Depature	语音业务的离开
Voice_Serv	语音业务的服务
Video_Arrive	视频业务的到达
Video_Depature	视频业务的离开
Video_Serv	视频业务的服务

根据广义随机 Petri 网定义, 双业务的 RB 资源调度模型可形式化表达为一个六元组: $GSPN = (P, T; F, W, M_0, \lambda)$ 。其中,

$$P = \{RBs_Idle, Voice_Serv, Video_Serv\}$$

$$T = \{Voice_Arrive, Voice_Depature, Video_Arrive, Video_Depature\}$$

$$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$$

$$W = \{1, 1, 1, 1, 3, 3, 3, 3\}$$

$$M_0 = \{25, 0, 0\}$$

3.2.2 成员载波排队系统 GSPN 模型

将每个成员载波抽象为一个服务集群, 成员载波所含的

RBs 可以抽象为服务集群中的多个服务器, 并为成员载波设置一个队列。同一时刻, 每台服务器只能为一种业务提供服务。除此之外, 不同的服务类型需要不同数目的 RB 为其服务。为了简化图的表达, 弧上的权值未标示出, 其 GSPN 模型如图 5 所示。

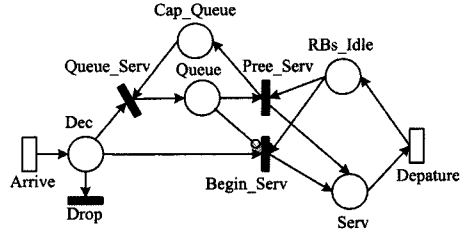


图 5 成员载波排队模型

表 2 列出了图 5 所示模型中各库所与变迁的意义。

表 2 图 5 中库所及变迁的含义

库所/变迁	含义
Arrive	时间变迁, 服务的到达, 到达过程服从泊松分布
Departure	时间变迁, 服务的离开, 平均服务时间服从指数分布
Drop	瞬时变迁, 服务失败
Queue_Serv	瞬时变迁, 排队等候服务
Pre_Serv	瞬时变迁, 抢占 Begin_Serv 服务
Begin_Serv	瞬时变迁, 准备接受服务
Dec	服务处于判断状态
Queue	服务处于排队状态
Cap_Queue	排队队列容量
RBs_Idle	处于空闲状态的 RB 的数目
Serv	正在服务的 RB 的数目

基于排队的成员载波服务模型, 在无空闲 RB 资源时用户需进行排队等候服务。为了合理有效地利用无线资源 RB, 由 4 个瞬时变迁来判断服务如何获得 RB 资源, 它们的优先级从高到底依次为: Pre_Serv, Begin_Serv, Queue_Serv 和 Drop。

用户到达后先进入库所 Dec, 根据队列容量 Cap_Queue 和 RB 资源数目判断下一步动作。若库所 RBs_Idle 有闲置 RB 资源, 则触发变迁 Begin_Serv, 开始为用户服务; 若 RBs_Idle 等于 0, 即没有空闲的 RB 资源时, 用户进入队列 Queue 进行排队等候; 若此时有空闲的 RB 资源从库所 Serv 释放到 RBs_Idle, 则触发变迁 Pre_Serv; 若 Cap_Queue 为空, 则表示队列容量变为 0, 即队列已满, 此时新到的用户既无法获得 RB 资源又无法进入队列进行排队等候, 接入失败而丢弃。库所 Queue 和变迁 Begin_Serv 之间的抑制弧表示当队列中有用户排队时, 优先服务于排队用户。

图 5 的排队模型流程具体如下。

Step1 当用户到达时, 首先判断用户是否需要排队:

if $M(RBs_Idle) > 0$ AND $M(Queue) = 0$ Then

触发变迁 Begin_Serv, 用户不需要排队, 进入 step2;

else if $M(Cap_Queue) \neq 0$ Then

触发变迁 Queue_Serv, 用户进入队列排队, 进入 step2;

else 触发变迁 Drop, 用户接入失败。

Step2 用户的 RB 资源分配

根据用户的业务类型, 为用户分配适当数目的 RB。

3.3 双业务双成员载波系统 GSPN 模型

在双业务 RB 资源调度模型和成员载波排队模型的基础上,构建本文的整个系统 GSPN 模型。图 6 展示了一个双业务双成员载波系统模型,根据调度策略,设置 GSPN 模型中瞬时变迁的使能函数、弧权函数、时间变迁的平均延时等参数,便可对宏蜂窝系统进行模拟、分析及性能评价。

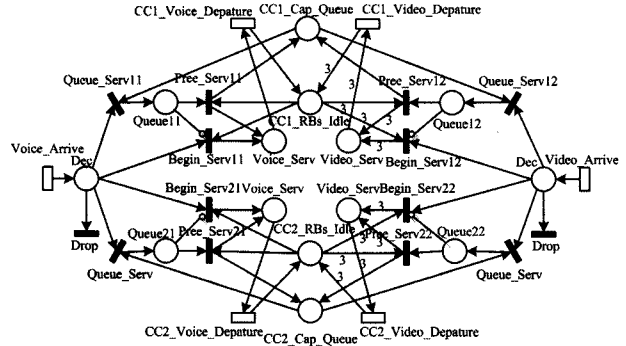


图 6 双业务双成员载波系统模型

3.4 载波调度策略

调度策略的优劣往往影响整个系统的性能和资源的利用率。本文考虑了视频业务和语音业务两种业务类型的用户接入无线网络,首先介绍两种调度策略:基于服务类型的载波调度和最短队列优先调度,然后结合两种调度策略的优缺点提出了动态自适应调度策略。

3.4.1 基于服务类型的调度策略

宏蜂窝基站根据业务类型来为用户选择成员载波和分配 RB,为语音业务分配低频成员载波,为视频业务分配高频载波。若低频载波无空闲的 RB 资源,而高频成员载波有空闲的 RB 资源,语音业务可以接入到高频成员载波;相反,若在高频成员载波无 RB 资源时,视频业务可以接入到低频成员载波。如果两个成员载波都没有空闲的 RB 资源且队列已满,则新到的用户接入阻塞而掉线。基于服务类型调度策略的变迁优先级如表 3 所列。

表 3 基于服务类型调度策略的变迁优先级

服务类型	优先级排序
Voice	Preee_Serv11>Begin_Serv11>Queue_Serv11>Preee_Serv21>Begin_Serv21>Queue_Serv21
Video	Preee_Serv22>Begin_Serv22>Queue_Serv22>Preee_Serv12>Begin_Serv12>Queue_Serv12

3.4.2 最短队列优先调度策略

用户到达宏蜂窝时,宏蜂窝基站首先对两个成员载波的队列长度进行比较,然后选择一个队列最短的成员载波作为目标载波为用户服务。若两个成员载波队列长度相同或均为空,则为用户随机分配其中一个成员载波。当两个队列已满且无可用的 RB 资源时,新到用户阻塞丢弃。语音业务和视频业务所相关的变迁的使能函数和优先级分别如表 4 和表 5 所列。

表 4 最短队列优先语音业务使能函数和优先级

瞬时变迁	使能函数	优先级
Preee_Serv11	NULL	5
Preee_Serv21	NULL	5
Begin_Serv11	#CC1_Cap_Queue ≥ #CC2_Cap_Queue	4
Begin_Serv21	#CC1_Cap_Queue ≤ #CC2_Cap_Queue	4
Queue_Serv11	#CC1_Cap_Queue ≥ #CC2_Cap_Queue	3
Queue_Serv21	#CC1_Cap_Queue ≤ #CC2_Cap_Queue	3
Drop	NULL	1

表 5 最短队列优先视频业务使能函数和优先级

瞬时变迁	使能函数	优先级
Preee_Serv12	NULL	5
Preee_Serv22	NULL	5
Begin_Serv12	#CC1_Cap_Queue ≥ #CC2_Cap_Queue	4
Begin_Serv22	#CC1_Cap_Queue ≤ #CC2_Cap_Queue	4
Queue_Serv12	#CC1_Cap_Queue ≥ #CC2_Cap_Queue	3
Queue_Serv22	#CC1_Cap_Queue ≤ #CC2_Cap_Queue	3
Drop	NULL	1

3.4.3 动态自适应调度策略

比较以上两种调度策略,对于基于服务类型的载波调度,若在 RB 资源充足的情况下,根据服务类型而分配成员载波可以满足不同用户的 QoS 需求,且提高了系统的吞吐量。如低频载波覆盖广,信道状况稳定,更适合传输语音业务;相反,高频载波的传输速度快,更适合传输视频业务。与基于服务类型的载波调度策略不同,最短队列优先调度策略可以保证成员载波之间的负载均衡,不仅可以减少用户的平均等待时间,且可以充分利用 RB 资源。通过对比分析基于服务类型的调度策略和最短队列优先调度策略的优缺点并结合两个策略各自的优点,本文提出了动态自适应调度策略,在空闲 RB 资源充足且成员载波队列为空时,根据服务类型选择合适的成员载波;而当有用户进行排队时,调度策略则自动调整为最短队列优先调度。动态自适应调度策略流程如图 7 所示。

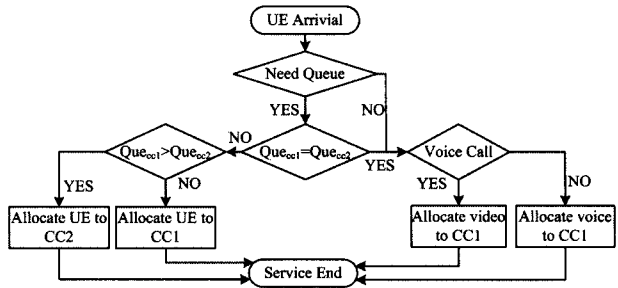


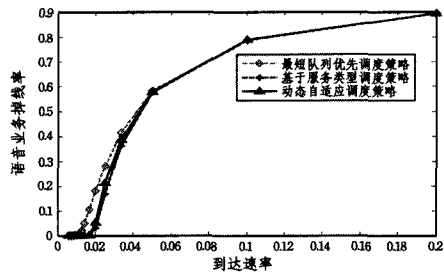
图 7 动态自适应调度策略

4 性能分析及仿真验证

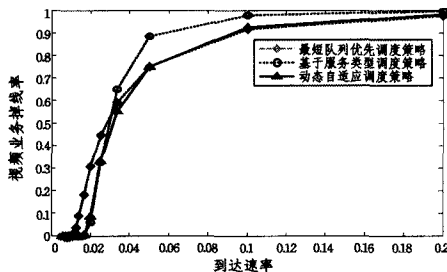
本文利用 TimeNets 仿真工具进行模拟仿真,通过掉线率和平均吞吐量两个性能指标对不同的调度策略进行对比分析。仿真实验中宏蜂窝系统有两个成员载波,每个成员载波包含 25 个 RB 无线资源。成员载波 CC1 属于低频载波,成员载波 CC2 属于高频载波,每个成员载波的队列长度均设为 6。系统仿真两种不同的业务类型:语音业务和视频业务。由于不同的业务需求的带宽容量不同,在此假设语音业务需要 1 个 RB,视频业务需要 3 个 RB。同时,不同的成员载波可提供的传输速率不同且平均服务时间服从指数分布。本文设在成员载波 CC1 上两种业务的平均服务时间为 120,在成员载波 CC2 上两种业务的平均服务时间为 80。

图 8 示出了语音业务和视频业务分别在基于服务类型调度策略、最短队列优先调度策略和动态自适应调度策略下的掉线率对比。由图 8(a)可知,在到达率较低时,即在队列无排队的前提下,动态自适应策略和基于服务类型调度策略的掉线率低于最短队列优先调度策略。在到达速率接近 0.06 时,3 种策略的掉线率趋于一致且上升,因为随着用户增多,有限的 RB 资源均已被充分利用,造成掉线率的提高。由图 8

(b)可知,在到达速率小于0.04时,动态自适应调度策略和基于服务类型调度策略的掉线率相近且均低于最短队列优先调度策略,因为两个成员载波队列均为空时,最短优先队列调度策略由于队列长度为空,基站为视频服务随机地选择成员载波,而CC2的服务速率高于CC1,造成CC2不能被更加充分地利用。当RB资源全部被占用后,新到用户需要排队服务,此时,动态自适应调度策略和最短队列优先调度策略优于基于服务类型的调度策略。从图8可以看出,动态自适应调度策略的掉线率始终低于基于服务类型调度策略和最短队列优先调度策略。



(a)语音业务掉线率对比



(b)视频业务掉线率对比

图8 不同策略下的掉线率对比

图9对比了系统总业务在3种不同调度策略下的吞吐量。由于动态自适应调度策略和基于服务类型调度策略在RB资源充足时可以更加合理地利用不同频段的无线资源,单位时间内可以得到更大的吞吐量。随着到达速率的提高,RB资源不足从而产生排队现象,此时动态自适应调度策略和最短队列优先调度策略可以减少系统服务用户的平均响应时间,单位时间内可以服务更多的用户,所以其吞吐量高于基于服务类型调度的策略。

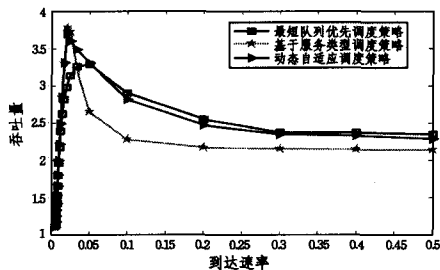


图9 系统吞吐量对比

图10解释了图9中总业务吞吐量先上升后下降的原因。采用动态自适应调度策略进行说明,其余两种策略的原因类似。在到达速率较低时,视频业务和语音业务均随着到达率的提高而上升,当到达速率达到一定值后,由于RB的服务速率较用户到达速率慢,即释放空闲RB速率慢,则会引起排队

等候资源。但是,语音业务需要1个RB资源,而视频业务需要3个RB资源,因此语音业务更容易抢到空闲资源,其竞争优势更大,所以语音业务会缓慢的上升,而视频业务由于得不到RB资源,开始下降且趋势较快,最终带来总业务呈现下降趋势。从图10可以看出,选择适当的到达速率有助于提高系统的吞吐量。

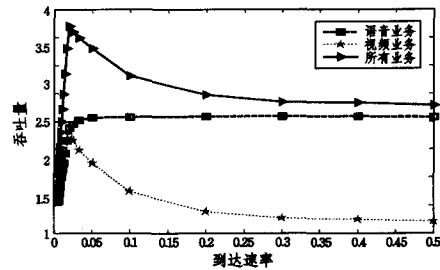


图10 吞吐量变化趋势

结束语 本文首先运用GSPN对在宏蜂窝网络下的LTE用户成员载波进行建模,综合考虑了成员载波性能差异和用户业务类型的不同,提出了一种动态自适应调度策略。在用户到达率较低且成员载波无排队时,基站根据用户的业务类型为用户分配成员载波,语音业务由低频成员载波服务,视频业务由高频成员载波服务;随着用户到达率的提高和空闲RB资源的减少,用户因到达速率大于服务速率而排队等候服务,不同成员载波的服务速率和排队长度不同,基站为用户优先选择排队队列较短的成员载波为其服务。本文提出的动态自适应调度策略由于更加合理地利用无线资源,在掉线率方面优于基于服务类型调度策略和最短队列优先调度策略;在吞吐量方面,到达速率较低时,本方案逼近于基于服务类型调度策略且优于最短队列优先调度策略;随着到达速率的提高,其逼近于最短队列优先调度策略且优于基于服务类型的调度策略。由于LTE-A用户可以在多个成员载波上同时传输数据,下一步工作将针对载波聚合技术的GSPN模型进行研究,以研究选择何种聚合调度策略来满足LTE-A用户的QoS需求。

参考文献

- [1] Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update[R]. 2014-2019. Mar 2015
- [2] Sathiaselan A, Crowcroft J. Internet on the move: challenges and solutions[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(1): 51-55
- [3] Requirements for Evolved UTRA(E-UTRA) and Evolved Utran(E-UTRAN)[R]. Technical Report 25. 913, 3rd Generation Partnership Project(3GPP), Mar 2008
- [4] Liao Hong-sheng, Chen Po-yu, Chen W. An Efficient Downlink Radio Resource Allocation with Carrier Aggregation in LTE-Advanced Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(10): 2229-2239
- [5] Wang Miao, Min Ge-yong, Jiang Yu-ming. QoS-Aware Resource Allocation for LTE-A Systems with Carrier Aggregation[C]// Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2014: 6-9
- [6] Fu Wei-hong, Kong Qing-liang, Zhang Yue, et al. A Resource

Scheduling Algorithm Based on Carrier Weight in LTE-Advanced System with Carrier Aggregation[C]//Wireless and Optical Communication Conference(WOCC). 2013;1-5

- [7] Wand Chia-pin, Huang Jeng-ji, Su Chun-gen. Buffer-Aware and Delay-Sensitive Resource Allocation in the Uplink of 3GPP LTE Networks[J]. Wireless Personal Communication, 2015, 84(3): 1877-1890
- [8] Wang Y, Pedersen K I, Sorensen T B, et al. Carrier load balancing and packet scheduling for multi-carrier systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1780-1789
- [9] Tian Hui, Gao Song-tao, Zhu Jian-chi, et al. Improved component carrier selection method for non-continuous carrier aggregation in LTE-advanced systems[C]//IEEE Vehicular Technology Conference(VTC Fall). 2011;1-5
- [10] AlQerm I, Shihada B, Enhanced S K G. Enhanced Cognitive Ra-

dio Resource Management for LTE Systems[C]//IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications(WiMob). 2013;565-570

- [11] Jang H, Lee Y. QoS-constrained resource allocation scheduling for LTE network[C]//2013 International Symposium on Wireless and Pervasive Computing(ISWPC). 2013;1-6
- [12] Liu F, Zheng K, Xiang W, et al. Design and performance analysis of an energy-efficient uplink carrier aggregation scheme[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(2):197-207
- [13] Murata T. Petri nets; Properties, Analysis, and Application[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(4):541-580
- [14] Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Base Station(BS) radio transmission and reception[R]. Technical Report 36. 104, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Apr 2011

(上接第 110 页)

所约束问题有利于复杂系统的结构设计,可以降低系统整体的设计难度。

基于本文的研究结论,下一步将继续研究一些更为复杂的协调控制设计器,如混杂 Petri 网系统中的变迁协调控制器、 $\geq$ 不等式约束向 $\leq$ 不等式约束的转换方法,以及多变迁“减法”次数约束协调控制器等。

参 考 文 献

- [1] Ramadge P J, Wonham W M. Supervisory control of a class of discrete event processes[J]. Siam Journal on Control and Optimization, 1987, 25(1):206-230
- [2] Ramadge P J, Wonham W M. Modular feedback logic for discrete event system[J]. Siam Journal on Control and Optimization, 1987, 25(5):1202-1218
- [3] Wang S G, Xu Z W. The synthesis of Petri nets controller for general inequality constraints with uncontrollable transitions [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(9): 1551-1555(in Chinese)
王寿光,许振伟.带有不可控变迁的一般不等式约束的 Petri 网控制器综合[J].上海交通大学学报,2007,41(9):1551-1555
- [4] Luo J L, Wu W M, Dong L D, et al. Supervisor synthesis for a class of discrete event systems[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(4):621-624(in Chinese)
罗继亮,吴维敏,董利达,等.一类离散事件系统的控制器综合[J].控制理论与应用,2007,24(4):621-624
- [5] Xu S S, Dong L D, Zhu D, et al. Redundancy detection and structure simplification for a class of liveness-enforcing Petri net supervisors[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(6):673-682(in Chinese)
徐珊珊,董利达,朱丹,等.一类活性 Petri 网控制器的冗余检测及结构简化[J].控制理论与应用,2013,30(6):673-682
- [6] Hu H S, Zhou M C, Li Z W. Liveness and ratio-enforcing supervision of automated manufacturing systems using Petri nets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, A, 2012, 42(2):392-403

- [7] Li Z W, Zhang J, Zhao M. Liveness-enforcing supervisor design for a class of generalized Petri net models of flexible manufacturing systems[J]. IEEE Transaction on Control Theory and Applications, 2007, 1(4):955-967
- [8] Li S Y, An A M, Cai Y, et al. A deadlock control policy for a subclass of Petri nets G-system[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(11):1430-1437(in Chinese)
李绍勇,安爱民,蔡颖,等. Petri 网的子类 G-system 网的死锁控制策略[J].控制理论与应用,2013,30(11):1430-1437
- [9] Wu N Q, Zhou M C. System modeling and control with resource-oriented Petri nets [M] // Control Engineering Series. Newyork, USA: CRC Press, 2009
- [10] Li Z W, Zhou M C. Deadlock resolution in automated manufacturing systems [M] // A Novel Petri Net Approach. London, UK: Springer, 2009
- [11] Li S Y, Wang A R. A deadlock prevention policy in Petri nets using necessary siphons [J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(6):771-780(in Chinese)
李绍勇,王安荣.应用必需信标的 Petri 网死锁预防策略[J].控制理论与应用,2011,28(6):771-780
- [12] Li S Y, Li Z W. Structure reduction of liveness-enforcing Petri nets using mixed integer Programming [J]. Asian Journal of Control, 2012, 14(2):384-399
- [13] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京:机械工业出版社,2006
- [14] Fang H, Lu Y, Huang Z J, et al. Synchronization distance determination and synchronization controller design for hybrid Petri nets[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(7):884-892 (in Chinese)
方欢,陆阳,黄镇谨,等.混杂 Petri 网系统同步距离求解及同步控制器设计[J].控制理论与应用,2012,29(7):884-892
- [15] Fang H, Lu Y, Xu Z J, et al. Resource allocation model and deadlock-free optimization scheduling for underground locomotive transportation [J]. System Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(8):2087-2096(in Chinese)
方欢,陆阳,徐自军,等.井下机车运输调度的资源分配模型及无死锁优化调度[J].系统工程理论与实践,2013,33(8):2087-2096