



LTE 无线网络虚拟化中切片调度策略

庞晓丹¹, 李薇薇¹, 孙茜², 田霖^{2,3}

(1. 河北工业大学, 天津 300401; 2. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:研究了未来移动通信网络切片机制, 针对 LTE 系统下行在基站内建立媒体接入控制(MAC)层流级别的切片调度器, 使得运营商之间可以按照预设比例共享资源。运营商作为切片的拥有者可以根据不同的服务等级协议(SLA)来对其资源比例进行设定。比较固定切片与网络虚拟化基片(NVS)框架下切片的资源块利用率, 进行了系统级仿真实验。相对于固定切片方法, NVS 方法在不同切片间用户相互隔离的情况下有更好的资源利用率。此外, 针对实时(RT)业务和非实时(NRT)业务在时延上的差异建立业务切片, 定制化地选择其调度算法策略, 从而在降低分组丢失率的同时提升整个系统的性能。

关键词:网络切片; 虚拟化技术; 资源分配

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017041

Slice scheduling strategy in LTE wireless network virtualization

PANG Xiaodan¹, LI Weiwei¹, SUN Qian², TIAN Lin^{2,3}

1. Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

2. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The future mobile communication network slicing mechanism was studied. A slice scheduler of flow level in medium access control (MAC) layer within the base station was used to utilize the shared resources between operators by predetermined proportion in the downlink LTE system. According to the different service level agreement parameters, the wireless resources are allocated for operators, which is the owner of slices in wireless network virtualization. System level simulation experiment and the comparison of the utilization between different slice methods were carried out. Compared to fixed slice method, the NVS method ensures that the users in different slices can achieve better utilization of wireless resources. In addition, the slices for services were established according to the difference of real-time (RT) and non-real-time (NRT) traffic requests, which minimizes the packet loss rate and ensures performance of the whole system.

Key words: network slice, virtualization technology, resource allocation

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2017-02-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61431001)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61431001)

1 引言

进入 5G 时代,需求呈现多样化的趋势,驱动着移动网络继续发展。MBB(mobile broadband,移动宽带)、V2X(vehicle to X)、HDTV(高清视频)和 VR(虚拟现实)等新应用逐渐发展起来^[1]。这些需求类型上的多样性和数量的增多加剧了数据流的暴涨,迫使 MNO(mobile network operator,移动网络运营商)通过更密集的部署基础设施以应对频谱短缺等问题。而密集的部署又会引起不可忽视的干扰问题。此外,基础设施建设费用巨大,MNO 的投资效率不高也是一个较为突出的问题。网络切片作为一个端到端的虚拟化网络^[2]可以解决上述问题。通过对共享资源的隔离,可以实现切片间业务传输服务以及网络本身的更新和维修不受干扰。这种形式的共享一方面增强了整个 RAN(radio access network,无线接入网)的利用率,降低了 MNO 的架构投入。另一方面,MNO 通过定制化设计和编排的切片满足了下一代网络多样化的需求。本文利用通用的 NVS(network virtualization substrate,网络虚拟化基片)^[2]切片架构,研究基于 MNO 切片调度策略。

2 研究现状

近几年涉及基站和天线系统复用的网络共享使得 CAPEX(capital expense,资本支出)和 OPEX(operating expense,运维支出)的花费降至 40%^[3]。包括 3GPP、IMT-2020 在内的标准组织和设备厂商在推进无线网络虚拟化的部署等工作方面起到了积极作用^[4]。参考文献[5]中,提出了将类似于 SDN(software defined networking,软件定义网络)的方法应用到无线移动网络上的架构。详细说明了一些采用该架构的用例,其中具体到模型、接口、高级别的信令。参考文献[6]提出 SDN 控制面与数据面的分离概念能够有效解决现存网络不灵活导致的控制复杂化问题,在控制器上依据需求动态地调整网络,实现无线网络的虚拟化。参考文献[7]提出了能够进行 D2D(device-to-device)通信的软件定义和以信息为中心的网络虚拟化架构,便利地实现动态虚拟资源的分配和通过 SDN 控制器进行的全局系统下的内容缓存。由 SDN 衍生出的 NFV(network function virtualization,网络功能虚拟化)的概念体现了硬件设备与软件的分离^[8]。此后,SDN 与 NFV 在无线通信网络的融合研究成为热点,提出了可定制化编排虚拟资源和服务功能的 NS(network slice,网络切片),以实现按需定制的

无线网络^[9,10]。

无线网络虚拟化中的网络共享可以实现网络切片。在此前提下的架构内,由于切分虚拟资源的不同,将产生包括基础设置级别、网络级别、流级别和内容级别在内的多种类型切片以及一些对切片进行管理的控制器^[11]。参考文献[2]提出的 NVS 架构为不同的 MNO 虚拟化出不同的网络切片。参考文献[12]提出以信息为中心的无线网络虚拟化架构,通过动态内容接入和共享的扩展提出了内容级别的切片。参考文献[13]设计了一个解决基站之间没有进行通信的完全分布式的系统,这个 RAN 多租用基站切片控制器评估每个与已确定的服务协议和策略相对应的利用率状态。参考文献[14]在 SoftRAN 的基础上建立了动态切分运营商 3D 网络资源的 RadioVisor,保证了控制信道消息、无线要素资源以及不同切片的隔离性。

切片需要满足虚拟化的某些特征如隔离化、定制化和资源利用率最大化。参考文献[15]对来自于不同服务提供商(service provider,SP)的切片动态调度分配,这些分配方案通过最大化不同 SP 和速率来最大化资源利用率。参考文献[16]提出了对来自于不同 SP 的虚拟切片业务优先排序,形成了一个先调度 RT(real-time,实时)业务后调度 NRT(non-real-time,非实时)业务的虚拟优先级切片(VPS)。网络切片在获得资源隔离性的同时对不同类型的服务定制化造成混合服务网络复用增益损失^[17]。参考文献[18]提出虚拟媒体接入控制子层(VMAC)的概念来进行资源虚拟化与管理,使得异构 RAN 聚合为标准的协议栈且根据服务定制化数据分组。参考文献[19]在现有软件定义无线网络(SDWN)频谱管理架构的基础上进行了基带虚拟化的设计,无缝集成 IEEE 802.11 协议栈和射频前端的同时提高了频谱效率。

上述对切片调度的研究中,一些仅针对虚拟化网络切片整体架构的设计不涉及 RAN 侧切片调度过程,或对于核心网切片隔离及复用增益等问题的研究不涉及 RAN 侧切片调度。而另外一些研究将切片作为约束条件求次优解,使得对于无线资源的切分不灵活,或虽然考虑时延这一因素在 RAN 侧不同的用户的差别且利用切片构建不同的优先级来提升系统性能,但在切片调度过程中仅依据信道质量进行资源分配优化。因此,在基站 MAC(media access control,媒体接入控制)层对 NVS 架构下切片以及固定切片类型进行系统级别的仿真,实现 RAN 侧无线资源利用率最大,采取切片调度策略定制化 RT 和 NRT 业

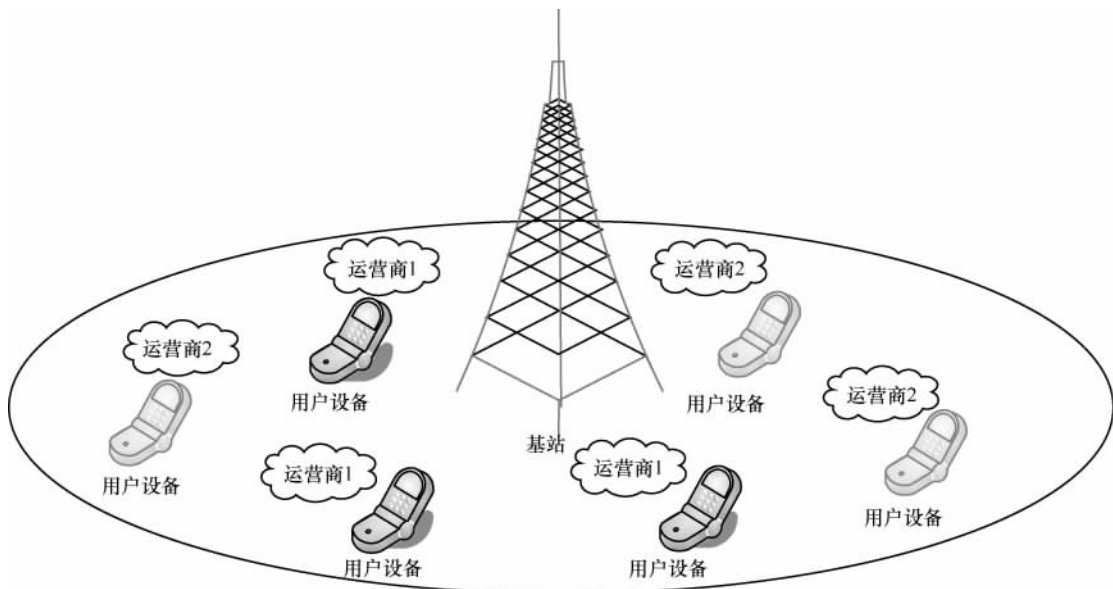


图1 MNO共享资源的虚拟网络

务,在隔离的情况下灵活地实现不同业务用户时延和频谱效率最优。

3 系统模型

集中式 RAN 是一个有潜力的下一代无线通信网络架构,包括虚拟网络运营商、服务提供者以及 MNO 等多种商用角色租用和共享中心化的 RAN。MNO 共享资源的虚拟网络如图 1 所示。由图 1 可知,同一地理范围内多个 MNO 进行切片调度,每个 MNO 对应一个切片通过动态共享实现资源利用率的最优化。此外,MNO 中的用户具有多种形式的业务,这些业务在速率、时延等方面均有不同。在 MNO 切片的基础上,利用切片隔离性对不同的业务定制不同的调度策略,以优化用户 QoS(quality of service,服务质量)和公平性等。

NVS 框架下 MAC 层流级别切片调度过程如图 2 所示。由图 2 可知,该调度过程包括两个步骤:切片调度和帧调度。研究 LTE 协议下行链路切片调度。由于 LTE 下行数据传输的资源分配的最小单位为 RB (resource block, 资源块),其数目与带宽对应。调度时用 1 到 N 为资源块进行编号, N 为最大的 RB 数目。频域和时域上分别由宽度为 180 kHz 的 12 个连续的子载波和 7 个 0.5 ms 长的 1 个时隙构成。

切片调度器的效用函数为式(1)中 $V(R_g)^{[15]}$,其中 R_g 表示基于带宽速率或基于资源块保留率, $R_{\min}^g$ 表示授权的最小满足 SLA(service level agreement,服务等级协议)的带宽速率或资源块保留率, g 代表切片数目与所属的 MNO

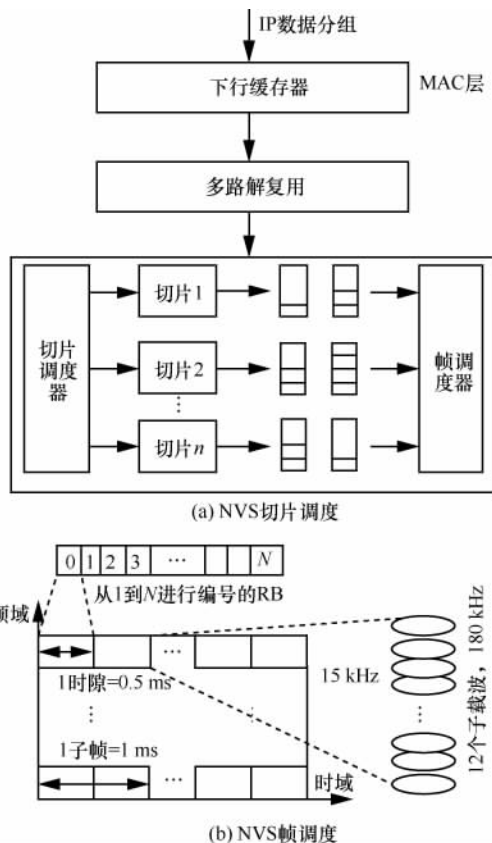


图2 NVS框架下MAC层流级别切片调度过程

对应。 $V(R_g)$ 试图得到各切片资源利用率的最大。式(1)中的效用函数可以改写为对数凹函数形式,见式(2),其中 t_g^{SLA} 表示两个运营商商议而来的 SLA^[2]。由于 LTE 系统通过在 MAC 层分配 RB 实现无线资源的调度,较之基于带宽速率

形式,基于RB保留率的调度能够更加准确地调控切片调度。因此采用基于RB保留率的调度进行无线资源切分:

$$\max \sum_g V(R_g) \quad \text{s.t.} \quad R_g \geq R_{\min}^g, \forall g \quad (1)$$

$$V(t_g) = t_g^{\text{rsv}} \lg t_g, \quad g \in H \quad (2)$$

4 切片调度

在NVS通用的切片调度框架下进行资源调度实质上是在基站中引用了一个分层的调度。上层切片调度保证根据SLA保证的资源配比,下层流调度采用基站内原有的流调度器,根据不同的需求选择不同复杂度和灵活度的流调度器,实现基站硬件上更为轻量级的部署。

4.1 切片调度器

切片调度器调度权重更新:

$$w_{g,j} = \frac{t_{g,j}^{\text{rsv}}}{t_{g,j}^{\text{exp}}}, \quad g \in H \quad (3)$$

$$w_{g,j} = (1-\beta)t_{g,j-1} + \beta \frac{N_{g,j-1}}{K} \quad (4)$$

切片调度权重 $w_{g,j}$ 由效用函数 $V(t_g)$ 转化而来,表示系统在瞬时时间 j 选择效用最大的切片。如果选择切片调度完毕之后RB仍有剩余,则在这个时间 j 间隔内选择带有次级权重 $w_{g,j}$ 的切片进行帧调度,如图3所示。其中 H 是基于RB保留率切片集合, $t_{g,j}^{\text{exp}}$ 表示从开始到 $t-1$ 的时间间隔内RB利用率的平均值, K 表示系统RB总数, $N_{g,j-1}$ 表示上次RB的数目。这个过程继续进行直到利用完所有的RB或没有切片剩余。通过这种方式,系统保证单个切片需求情况下基站利用率的最大化,MNO最大化整个切片的效用实现收益的最大化。

4.2 帧调度器

NVS基片架构下的帧调度器是对现行基站帧调度的扩展,包含与基站MAC层帧调度器功能一致的多个调度器。切片隔离性可以保证多个调度器灵活利用,定制化为不同时延和信道状态的用户提供不同QoS,保障整个系统时延和频谱效率最优。

4.2.1 比例公平算法

PF(proportional fair,比例公平)调度算法给小区需要传输的数据流分配优先级用于调度,优先级最高的数据有权利用资源进行数据传输。该算法既考虑了用户所在的信道条件,又考虑了不同业务之间的公平性,在此基础上最大化网络吞吐量。业务流在资源块上的权重值^[20]表示为:

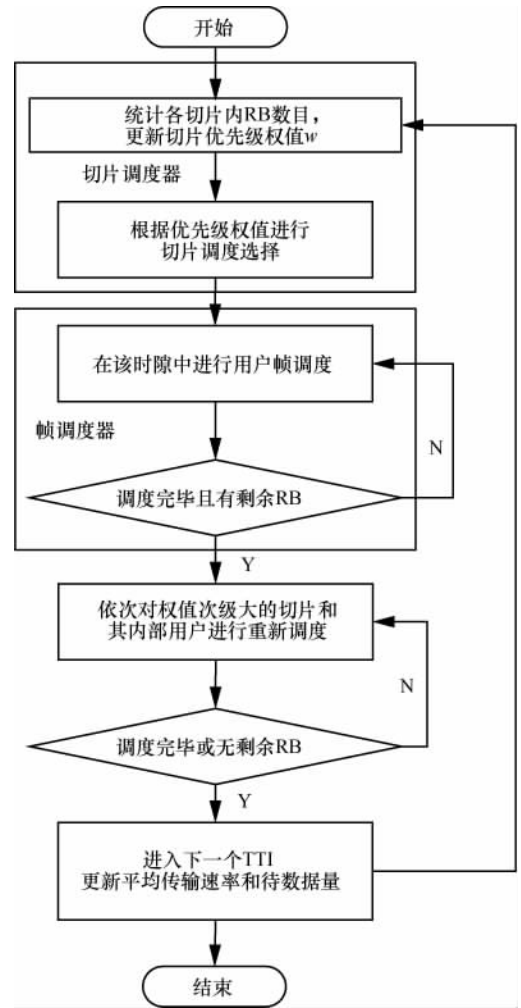


图3 切片调度算法流程

$$w_{i,j}(t) = \frac{r_{i,j}(t)}{R_i(t-1)} \quad (5)$$

其中, $r_{i,j}(t)$ 为当前时隙理想瞬时速率,由自适应调制和编码(AMC)模块根据CQI(channel quality indicator,信道质量指示)值计算对应的MCS(modulation and coding scheme,调制和编码方式)得到, $R_i(t-1)$ 为以前时隙为起点的时间窗内的平均传输速率的估计值。每个用户在所有RB上的速率为:

$$\bar{R}_i(t) = (1-\alpha)\bar{R}_i(t-1) + \alpha r_i(t) \quad (6)$$

4.2.2 修正最大加权时延优先

M-LWDF(modified largest weighted delay first,修正最大加权时延优先)调度算法考虑分组数据业务的端到端时延以及各类业务QoS,取得频谱效率、公平性和多用户QoS折中。具体地,在处理实时业务时利用式(7)计算用户数据流在每个用户RB上的实时权重^[21]。其中, δ_i 是介于0



到 1 之间的值, τ_i 表示与服务质量相关的分组丢失率, 表示用户所允许的最大时延门限, $D_{\text{HOL},i}$ 表示用户 i 队所在队列队首的等待时延:

$$w_{i,j} = -\frac{\lg \delta_i}{\tau_i} \cdot D_{\text{HOL},i} \cdot \frac{r_{i,j}(t)}{R_i(t-1)} \quad (7)$$

5 仿真模型与结果分析

在 MATLAB 平台上实现了切片功能的系统级仿真。具有切片功能的调度器设计在 MAC 层帧调度器上。仿真平台系统仿真了整个下行链路的传输功能。采用 LTE 系统 3 层 19 蜂窝小区, 产生了非全缓冲 (full-buffer) 业务模型以及所需的实时和非实时业务数据队列。此外, 利用 L2S(link level to system level, 链路级到系统级) 模块功能, 节省了大量的仿真时间。具体仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置

参数类型	设置
仿真场景	3GPP case1
载频	2 GHz
带宽	10 MHz
小区布置	六边形小区, 19 个宏基站, 每个宏基站覆盖三扇区模型
基站间距离 (ISD)	500 m
路径损耗	$L=128.1+37.6\lg R$, R 单位为 km
速度	3 km/h
阴影衰落标准差	8 dB
阴影衰落相关距离	50 m
阴影衰落相关系数	小区间 0.5 扇区间 1.0
天线模型	$A_H(\varphi) = -\min \left[12 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{3\text{dB}}} \right)^2, A_m \right]$ $\varphi_{3\text{dB}}=70^\circ, A_m=20 \text{ dB}$
信道模型	TU 信道
基站总功率	46 dBm
用户分布	均匀撒点
UE 和 BS 最小距离	$\geq 35 \text{ m}$

为验证 NVS 切片按预定比例分配无线资源以及最大化资源利用率, 进行如下设置。为了简便起见, 仿真实验中的用户在一段时间内仅有一种类型的业务。切片 1 和切片 2 下的每个扇区内采用相等数量的 FTP 业务和视频流业务。FTP 业务的到达时间服从指数分布, 大小为 250 KB, 持续时间为 10 s。视频流业务发送速率为 256 kbit/s。SLA1、SLA2 参数是预先分配给 MNO 对应切片占整体 RB 资源的比重。固定切片与 NUS 切片比较参数设置见表 2。

表 2 固定切片与 NVS 切片比较参数设置

MNO 切片	切片类型	
	固定	NVS
切片 1	RB 数目编号 1~35	SLA1 参数为 0.7
切片 2	RB 数目编号 36~50	SLA2 参数为 0.3

NUS 切片与固定切片 RB 利用率对比如图 4 所示。仿真结果表明, 在小区用户数不断增大的情况下, RB 利用率逐渐达到饱和, 接近最初的设定值 7:3, 实现了不同运营商切片的隔离。此外, NVS 切片 1 与切片 2 的 RB 利用率均大于固定切片, 这表明相对于固定切片, NVS 架构下的切片方案能够更灵活地利用基站内的无线资源, 得到更优的资源利用率。由于固定切片只能利用预先所分配的有限 RB, 而 NVS 算法通过优先级权重可以使得在每一帧中先满足优先级权重的切片对于 RB 的请求。NVS 切片与固定切片系统吞吐量对比如图 5 所示, 随着用户数的增长, 整个系统的吞吐量值会相应地持续性增长, 使得不同切片之间的资源调度更加有效。

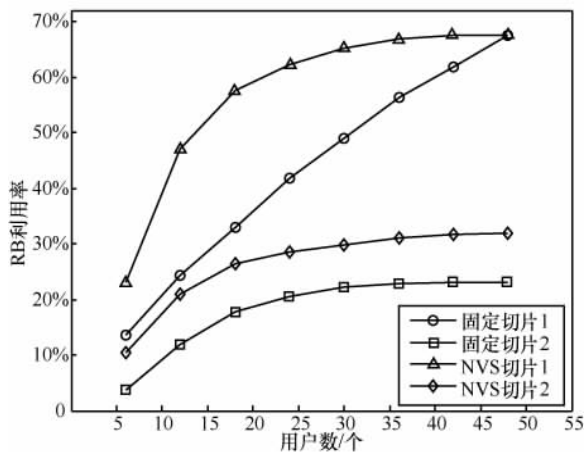


图 4 NVS 切片与固定切片 RB 利用率对比

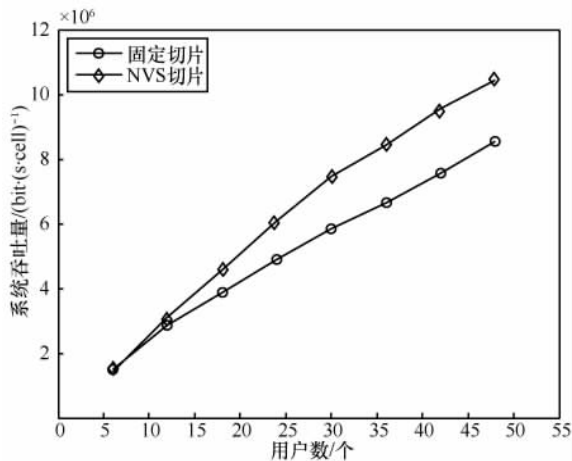


图 5 NVS 切片与固定切片系统吞吐量对比

同一地域内不同的 MNO 因为某些定制服务需求,存在服务用户业务不均衡的情况。可以利用 NVS 切片的隔离性,针对不同用户需求选择不同的调度方式。切片 1 中包含接收 FTP 数据分组的 NRT 业务用户较多,切片 2 中包含时延敏感的视频流用户较多。具体地,设置切片 1 中包含接收 FTP 业务与视频流业务的用户比重为 3:1,切片 2 中包含接收 FTP 业务与视频流业务的用户比重为 1:3。RT 与 NRT 仿真场景设置见表 3。

表 3 RT 与 NRT 业务仿真场景设置

MNO 切片	设置类型	
	用户业务情况	切片调度策略
切片 1(NRT)	FTP 业务	策略 1:PF
		策略 2:PF
		策略 3:M-LWDF
切片 2(RT)	视频流业务	策略 1:M-LWDF
		策略 2:PF
		策略 3:M-LWDF

不同策略的分组丢失率如图 6 所示。策略 1 的分组丢失率比仅用 PF 调度的策略 3 的情况有所改善,但高于两切片均用 M-LWDF 算法的策略 3。不同策略的系统吞吐量如图 7 所示。随着用户数的增多,策略 1 系统吞吐量高于比两切片均用 PF 算法的策略 2,但略低于均用 M-LWDF 算法的策略 3,考虑到在实际设备上调度过程中的算法复杂度问题,通过切片的隔离设置的策略 1 能够使系统达到理想的效果。此外,当用户数量较少时,在一段时间内用户撒点具有更大的随机性,考虑到信道质量等因素,会出现数值上不符合图 6 和和图 7 中分组丢失率和系统吞吐量曲线整体走势的情况。

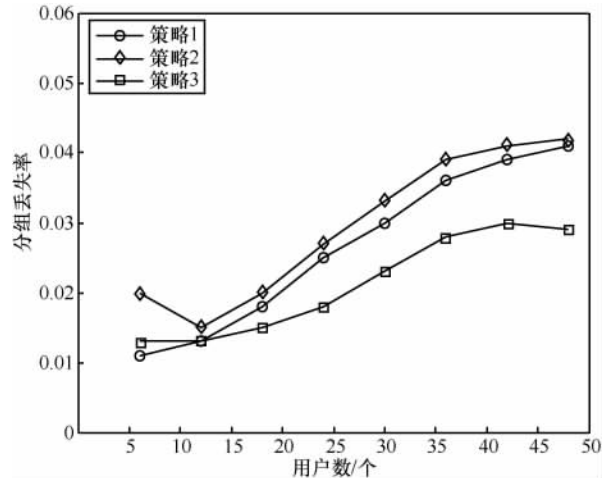


图 6 不同策略的分组丢失率

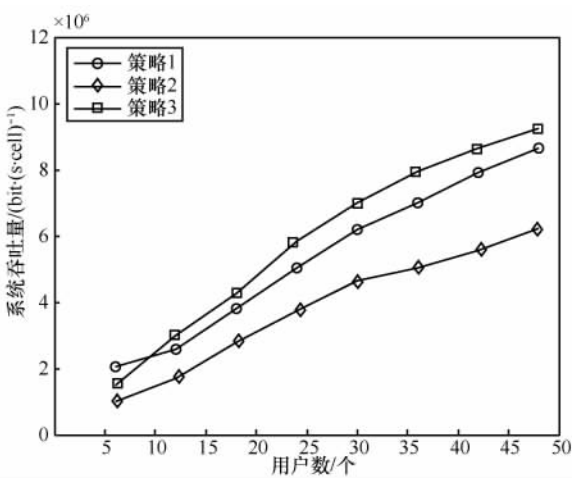


图 7 不同策略的系统吞吐量

6 结束语

在一个虚拟化接入网场景中构建了基于 MNO 的切片。MNO 切片通过 SLA 协议保证不同 MNO 无线资源之间的隔离,使得彼此的业务不受影响,同时根据接入承载的情况动态调整资源的分配,优化了 RAN 侧资源利用率。此外,基于服务业务类型的不同,利用切片隔离的特性对实时业务采用 M-LWDF 调度算法,对非实时业务采取 PF 调度算法,在降低系统整体分组丢失率的同时保障了资源的有效利用。总之,本文实现了一般网络切片隔离性、定制化、资源利用率最大的特性。切片作为未来网络的一个重要的发展趋势,将对无线网络的发展带来更多积极的效应。

参考文献:

[1] Network sharing; architecture and functional description(release 13): 3GPP.TS23.251:2015[S/OL]. (2015-03-17)[2016-09-22]. http://www.3gpp.org/ftp/specs/2015-03/Rel-10/23_series/.

[2] KOKKU R, MAHINDRA R, ZHANG H H, et al. NVS: a substrate for virtualizing wireless resources in cellular networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(5): 1333-1346.

[3] Network sharing; architecture and functional description(release 13):3GPP. TR22.891:2014[S/OL]. (2014-09-26)[2016-09-22]. http://www.3gpp.org/ftp/Specs/2014-09/Rel-13/22_series/.

[4] CHENG C L, YU F R. Wireless network virtualization: a survey, some research issues and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 358-380.

[5] BERNARDOS C J, OLIVA D L, SERRANO P, et al. An architecture for software defined wireless networking [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(3): 52-61.

[6] CAO B, HE F, LI Y. Software defined virtual wireless network: framework and challenges [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 29(4): 6-12.



- [7] WANG K, LI H, YU R F, et al. Virtual resource allocation in software-defined information-centric cellular networks with device-to-device communications and imperfect CSI [J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 65(12): 10011-10021.
- [8] Network function virtualization-introductory white paper #3[R]. 2014.
- [9] 赵明宇, 严学强. SDN 和 NFV 在 5G 移动通信网络架构中的应用研究[J]. 移动通信, 2015(14): 64-68.
ZHAO M Y, YAN X Q. Research on application of SDN and NFV in 5G mobile communication network architecture [J]. Mobile Communications, 2015(14): 64-68.
- [10] 孙茜, 田霖, 周一青, 等. 基于 NFV 与 SDN 的未来接入网虚拟化关键技术[J]. 信息通信技术, 2016(1): 57-62.
SUN Q, TIAN L, ZHOU Y Q, et al. Virtualization of access network in future RAN based on NFV and SDN[J]. Information and Communications Technologies, 2016(1): 57-62.
- [11] HOFFMANN M, STAUFER M. Network virtualization for future mobile networks: general architecture and applications[C]//2011 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), June 5-9, 2011, Kyoto, Japan. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [12] CHENG C L, YU F R, ZHANG X. Information-centric network function virtualization over 5G mobile wireless networks [J]. IEEE Network, 2015, 29(3): 68-74.
- [13] CABALLERO G P, COSTA P X, SAMDANIS K, et al. RMSC: a cell slicing controller for virtualized multi-tenant mobile networks [C]//IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTCSpring), May 11-14, 2015, Glasgow, Scotland, UK. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [14] GUDIPATI A, LI E, KATTI S. RadioVisor: a slicing plane for radio access networks[C]//ACM 3rd Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking, HotSDN'14, August 22-24, 2014, Chicago, Illinois, USA. New York: ACM Press, 2014: 237-238.
- [15] KAMEL M I, LE L B, GIRARD A. LTE wireless network virtualization: dynamic slicing via flexible scheduling [C]//IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall), Sept 14-17, 2014, Vancouver, BC, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [16] ABDELHAMID A, KRISHNAMURTHY P, TIPPER D, et al. Resource allocation for heterogeneous traffic in LTE virtual networks [C]//IEEE International Conference on Mobile Data Management, June 15-18, 2015, Pittsburgh, PA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 173-178.
- [17] CHENG C L, YU F R. Wireless virtualization for next generation mobile cellular networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(1): 61-69.
- [18] FAN B, TIAN H, YAN X. A generic framework for heterogeneous wireless network virtualization: virtual MAC design [C]//2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, April 3-6, 2016, Doha, Qatar. New Jersey: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [19] WANG W, CHEN Y, ZHANG Q, et al. A software-defined wireless networking enabled spectrum management architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(1): 33-39.
- [20] 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.
LI Y Y, JIN J, SU H S, et al. Resource allocation scheme based on scheduling metrics in LTE downlink [J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(12): 4100-4104.
- [21] 杨鹏, 闫俊杰, 王汝言. LTE 中队列状态感知的优化 M-LWDF 调度算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(4): 514-520.
YANG P, YAN J J, WANG R Y. Queue status aware optimized M-LWPF Scheduling algorithm in LTE[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2015, 27(4): 514-520.

[作者简介]



庞晓丹(1991-),女,河北工业大学硕士生,主要研究方向为未来移动通信网络架构与虚拟化技术。



李薇薇(1978-),女,博士,河北工业大学副教授,主要研究方向为无线侧网络虚拟化技术、集成电路制造工艺等。



孙茜(1990-),女,中国科学院计算技术研究所实习研究员,主要研究方向为虚拟化技术与天地一体化信息网络。



田霖(1980-),女,博士,中国科学院计算技术研究所副研究员,中国科学院大学副教授,主要研究方向为绿色无线通信系统与无线资源管理技术。