

引用本文:徐志威,毕美华,季晨阳,等.支持多业务共存的 Xhaul 网络低时延带宽分配算法[J].光通信技术,2022,46(5):15-19.

支持多业务共存的 Xhaul 网络低时延带宽分配算法

徐志威¹,毕美华^{1,2*},季晨阳¹,管立军³,胡志蕊¹

(1.杭州电子科技大学 通信工程学院,杭州 310018;2.上海交通大学 光纤区域网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240;

3.中讯邮电咨询设计院有限公司,北京 100048)

摘要:基于无源光网络(PON)系统承载 5G 增强型移动带宽(eMBB)业务和超可靠低时延通信(uRLLC)业务是当前光与无线接入网的研究热点,如何满足不同业务场景的低时延需求成为 PON 系统亟待解决的问题。提出一种支持多业务共存的 Xhaul 网络低时延带宽分配算法,通过为 uRLLC 业务分配保证带宽和为前传 eMBB 业务优先分配带宽,同时牺牲中传 eMBB 业务优先级和降低系统带宽效率为代价,降低系统内 uRLLC 业务和前传 eMBB 业务时延。在高层分割点选择选项 2,低层分割点分别选择选项 6、选项 7-3 和选项 7-2 时,采用 Matlab 软件仿真了低负载情况下的时延。仿真结果表明:这 3 种低层功能划分方式都能满足 0.25 ms 的时延要求,算法的平均时延及高负载时的最大时延均比文献[8]算法低。

关键词:动态带宽分配;Xhaul 网络;低时延;无源光网络;多业务共存

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)05-0015-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Low-latency bandwidth allocation algorithm for Xhaul network supporting multi-service coexistence

XU Zhiwei¹, BI Meihua^{1,2*}, JI Chenyang¹, GUAN Lijun³, HU Zhirui¹

(1. School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. State Key Laboratory of Optical Fiber Area Networks and New Optical Communication Systems, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. China Information Technology Designing&Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China)

Abstract: Carrying 5G enhanced mobile broadband (eMBB) services and ultra-reliable low-latency communication (uRLLC) services based on passive optical network (PON) systems is the current research focus of optical and wireless access networks. How to meet the low-latency requirements of different services has become an urgent problem to be solved in the PON system. In this paper, a low-latency bandwidth allocation algorithm for Xhaul network which supports multi-service coexistence is proposed. By allocating guaranteed bandwidth for uRLLC traffic and prioritizing bandwidth allocation for fronthaul eMBB traffic, at the same time sacrificing the priority of midhaul eMBB traffic and reducing system bandwidth efficiency, to reduce the delay of uRLLC traffic and fronthaul eMBB traffic in this system. When option 2 is selected at the high level and option 6, option 7-3 and option 7-2 are respectively selected at the low level, Matlab software is used to simulate the delay under low load. The simulation results show that the three low-level function partitioning methods can meet the delay requirement of 0.25 ms, and the average delay and maximum delay of the algorithm under high load are lower than those of the algorithm in reference [8].

Key words: dynamic bandwidth allocation, Xhaul network, low latency, passive optical network, multi-service coexistence

收稿日期:2022-03-29。

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY20F050004,LY22F010012)资助;江苏省新型光纤技术与通信网络工程研究中心开放研究课题(SDGC2120)资助。

作者简介:徐志威(1998—),男,硕士研究生,浙江绍兴人,现就读于杭州电子科技大学通信工程学院电子信息专业,主要研究方向是光与无线接入网的融合技术和基于 PON 系统的动态带宽调度算法。

* **通信作者:**毕美华(1981—),女,博士,副教授,主要研究方向为光与无线融合接入、新型光接入网系统等。



0 引言

5G 时代有不同的业务场景,如超可靠低时延通信(uRLLC)业务和增强型移动带宽(eMBB)业务,它们对时延和带宽要求不同,这意味着 5G 网络架构必须在时延、带宽和集中功能之间进行权衡^[1]。Xhaul 网络是一种集成移动前传、移动中传和移动回传的传输网络^[2],它通过软件定义网络(SDN)技术灵活地向所有网络提供统一管理环境。目前,国内外研究人员针对基于 Xhaul 网络架构下的带宽利用率、动态带宽分配算法

徐志威, 毕美华, 季晨阳, 等: 支持多业务共存的 Xhaul 网络低时延带宽分配算法

和多业务共存资源调度算法等方面进行了研究。其中, 文献[3]通过 SDN 技术来实现对传输网络控制平面的管理, 包括对上/下行交互的带宽分配信令, 对不同网络切片进行更好的资源分配, 有效减少了上/下行通信时延, 提高了传输网络的带宽利用率。但是, 这种集中式管理加重了核心网的负担, 过大的通信时延对时间敏感型业务也是一种挑战。文献[4]分析了不同功能划分下 Xhaul 网络的传输容量, 然而, 该研究并未考虑多业务共存的问题。在基于无源光网络(PON)的带宽分配算法研究方面, 文献[5]提出了一种使用 mini-slot 的动态带宽分配算法, 该算法的设计可同时满足 3 种不同网络切片的要求。低时延业务在低负载网络下使用 mini-slot 有效减少了数据包在缓冲区的排队时延, 但是文中单个光网络单元(ONU)只承载单一业务, 对不同网络切片只进行简化管理, 这种过于理想化的假设并不符合现实网络的情况。文献[6]提出了一种 uRLLC 业务、eMBB 业务共存算法, 根据 uRLLC 数据零星到达的特点, 在 eMBB 资源块上穿刺或叠加 uRLLC 数据。叠加方法意味着在同一资源块上同时传输 eMBB 信号和 uRLLC 信号, 这必将对 eMBB 信号和 uRLLC 信号造成一定程度的信干噪比, 影响 uRLLC 业务的可靠性; 而穿刺方法会导致系统带宽利用率的下降。文献[7]针对含有 3 种不同优先级业务的 Xhaul 网络架构的 PON 上行传输系统, 提出了一种即时动态带宽分配算法, 该算法通过给高优先级业务分配保证带宽来保证其通信质量, 可以很好地满足高优先级业务的通信需求。但是, 该算法是面向上行传输的, 且文章对上行中上报和授权的信令交互过程描述不清晰。文献[8]对基于 PON 承载 5G 多业务系统中的带宽调度算法进行了研究, 该算法根据 uRLLC 业务和 eMBB 业务不同调度周期的特点, 在保证 uRLLC 低时延特点的前提下, 通过动态规划中 0-1 背包算法来实现前传 eMBB 业务的最大吞吐量。然而, 考虑到 PON 下行传输是点到多点的广播形式, 与上行传输中需要将不同 ONU 数据进行资源切片不同, 因此, 采用 0-1 背包算法研究前传 eMBB 业务最大吞吐量的实际意义不大。

本文结合国内外研究现状, 在考虑前传网络和中传网络不同业务场景、不同时延特性需求的基础上, 提出一种支持多业务共存的 Xhaul 网络低时延带宽分配算法。

1 Xhaul 网络结构和功能划分选项

在 5G 集中式无线接入网(C-RAN) 3 层网络结构

中, 基带处理单元(BBU)被划分成集中式单元(CU)和分布式单元(DU), 同时部分物理层底层的功能也下沉到远程单元(RU)。因此, 需要引入新的功能划分选项^[9]将不同单元分割开。5G NR 协议栈含有 8 个功能拆分选项和多个子选项。功能划分的分割点越高, 在传输之前对数据的处理越多, 传输网上的比特率就越低。选项 2 作为主流的高层功能划分选项, 分组数据汇聚协议(PDCP)和无线资源控制(RRC)功能集中在 CU 中, 其它低层功能和所有实时功能都在 DU 中执行, 因此选项 2 具有最宽松的链路要求。对于低层功能划分, 选项 6 是被研究最多的低层分割点, 该选项在媒体接入控制(MAC)协议功能集中的前提下, 将物理层处理操作均安置在 DU 完成。选项 7-3 位于物理层中加扰和调制之间, 选项 7-2 位于资源元素映射和数字信号处理之间^[10-11]。

2 支持多业务共存的 Xhaul 网络低时延带宽分配算法

支持多业务共存的 Xhaul 网络低时延带宽分配算法首先考虑业务优先级问题进行带宽分配, 在每个 mini-slot 为 uRLLC 业务分配保证带宽, 以避免在每个授权周期中出现较大的延迟; 然后, 引入前传 eMBB 业务带宽分配阈值和 uRLLC 业务保证带宽避让机制进行前传中 eMBB 业务的带宽分配; 最后, 剩余的带宽将分配给中传 eMBB 业务。

uRLLC 业务和 eMBB 业务将分别采用 1 ms 的传输时间间隔(TTI)和 0.125 ms 的 mini-slot 为周期进行下行传输。PON 系统将承载 4 种不同类型的下行链路数据流, 它们分别是前传 uRLLC 数据、前传 eMBB 数据、中传 uRLLC 数据和中传 eMBB 数据。前传 uRLLC 数据只会在缓冲区作短暂停留, 在当前到达的 mini-slot 中即时传输; 对于中传 uRLLC 数据, 调度器在当前 mini-slot 传输前一个 mini-slot 到达且已放入缓冲区的 uRLLC 数据。在每个 TTI 的开头, ONU 缓冲区收集当前 TTI 到达的前传 eMBB 数据和前一个 TTI 到达的中传 eMBB 数据分别采用不同的分配策略为各自分配带宽。支持多业务共存的 Xhaul 网络低时延带宽分配算法的分配过程如图 1 所示, 具体步骤如下:

①为 uRLLC 业务分配保证带宽。为了满足时延要求, 本文提出的低时延带宽分配算法是在每个 mini-slot 的开始为 uRLLC 业务分配一定的保证带宽, 光线路终端(OLT)根据前 n 个 mini-slot 中保证带宽的大小预设第 k 个 mini-slot 对 uRLLC 业务的保证带宽 g_k ,

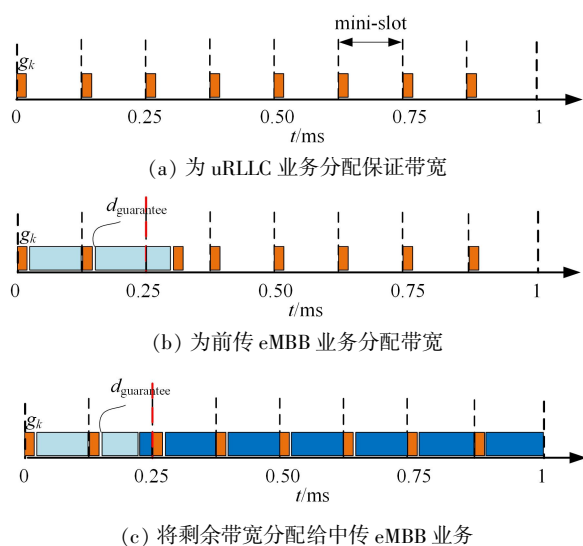


图 1 支持多业务共存的 Xhaul 网络低时延带宽分配算法的分配过程

其计算式为

$$g_k = \sum_{i=1}^n \frac{g_{k-i}}{n} \quad (1)$$

若 uRLLC 业务保证带宽分配不足,将导致部分数据包无法及时得到传输;反之,则会导致带宽资源的浪费,减少 eMBB 业务的可分配带宽。由于网络负载在短时间内保持稳定,本文可根据前几个周期中到达的实际帧的数量预测当前周期中的到达数,并分配相应的保证带宽。

②为前传 eMBB 业务分配带宽。由于前传网络中的 eMBB 业务对时延要求很高,因此本文算法将每 1 ms 的传输时间间隔的前 0.25 ms 时隙分配给前传 eMBB 业务。若前传 eMBB 业务量大,则采用 uRLLC 业务保证带宽避让机制(当前传 eMBB 业务帧数量大于分配阈值,避让机制将会触发,即一个 TTI 中从第三个 mini-slot 开始的 uRLLC 业务保证带宽将推迟分配,先进行前传 eMBB 业务带宽分配,分配完毕后会才会恢复 uRLLC 业务保证带宽的分配)来降低 eMBB 业务的时延。分配阈值 B_{th} 的计算式为

$$B_{th} = \frac{(D_{FE} - 2g_k) \times C}{8 \times b_e} \quad (2)$$

其中, g_k 表示保证带宽, D_{FE} 表示前传 eMBB 业务的时延需求,取值为 250 μs ; C 表示 PON 数据速率; b_e 表示 eMBB 业务帧大小。

③为中传 eMBB 业务分配带宽。中传 eMBB 业务的时延要求较低,本算法根据先到先服务原则分配带宽,先到达 OLT 的数据包会优先获得时隙带宽进行传输。在 2 种不同业务的传输窗口之间有一个保护间隔 $d_{guarantee}$ 将不同业务的数据包隔离开。

3 仿真参数设置及结果分析

3.1 仿真参数设置

本文采用 Matlab 软件模拟了 Xhaul 网络在 3 个不同低层功能划分选项的情况下,前传 uRLLC 业务、中传 uRLLC 业务和前传 eMBB 业务的时延发生概率累积分布,具体仿真参数如表 1 所示。其中,每个 ONU 都包含 uRLLC 业务和 eMBB 业务,下行传输数据在 PON 中都被封装成不同长度的以太网帧。通过数值模拟,本文评估了所提算法对 3 种功能划分选项组合的适用性。其中,高层功能划分(下文简称高层)选择选项 2,低层功能划分(下文简称低层)选择选项 6、选项 7-3 和选项 7-2。随着功能分割点的下移,链路中数据量会变大,网络负载不断增加。

表 1 仿真参数

参数	值
传输时间间隔/ms	1
mini-slot/ms	0.125
中传 ONU 数量/个	8
前传 ONU 数量/个	8
PON 容量/(Gb·s ⁻¹)	25
波长数/个	1
uRLLC 帧大小/字节	150
eMBB 帧大小/字节	1500
中传链路传输距离/km	10
前传链路传输距离/km	10
光纤时延/($\mu s \cdot km^{-1}$)	5

3.2 仿真结果分析

3.2.1 使用高层选项 2+低层选项 6 仿真

使用高层选项 2+低层选项 6 的仿真结果如图 2 所示。图 2(a)中,由于采用了 mini-slot 且分配了保证带宽,低负载下的前传 uRLLC 业务数据包能 100% 保证时延控制在 0.25 ms 内;而高负载下 98.7% 的前传 uRLLC 业务数据包也将时延控制在 0.25 ms 以内,部分数据包由于高负载下存在保证带宽预设值小于实际到达网络数据量的小概率可能性,这部分数据包需等待下一个保证带宽,因此时迟大于 0.25 ms。图 2(b)中,低负载下所有数据包时延控制在 0.25 ms 以内,高负载下 99.2% 的数据包将时延控制在 0.25 ms 以内。由于中传业务是以泊松分布到达的,因此时延累积分布函数(CDF)值图是线性的。图 2(c)是前传 eMBB 业务分别在 uRLLC 业务高负载、低负载情况下的时延 CDF 值图。可以看出,uRLLC 业务低负载下的 eMBB 业务时延特性优于 uRLLC 业务高负载条件,由于引入了 uRLLC 业务保证带宽,eMBB 业务的 CDF 值有一个平

徐志威, 毕美华, 季晨阳, 等: 支持多业务共存的 Xhaul 网络低时延带宽分配算法

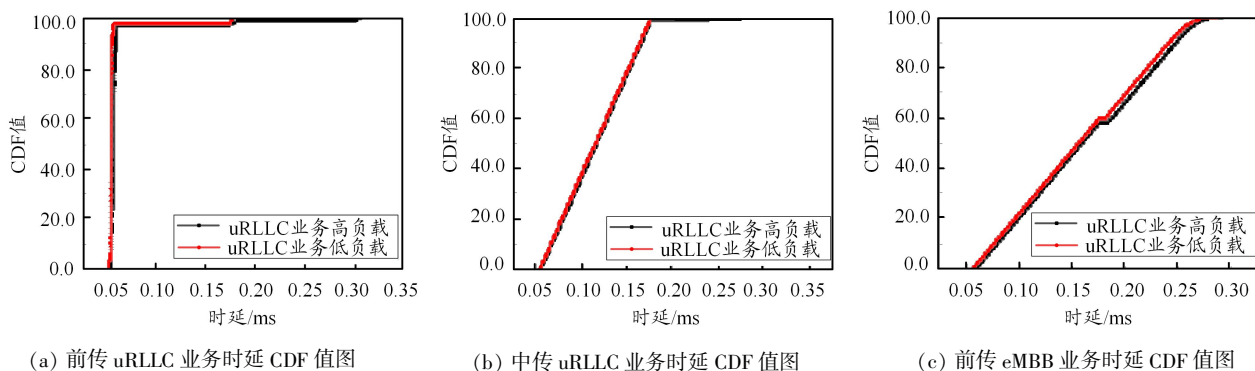


图2 使用高层选项2+低层选项6的仿真结果图

台期。由于高负载下 uRLLC 业务的保证带宽更大而导致平台期更长。同时, uRLLC 业务保证带宽的避让机制有效避免了在前传 eMBB 业务带宽分配中出现第二个平台期, 这有效降低了其在前传网络的时延。

3.2.2 使用高层选项2+低层选项7-3 仿真

使用高层选项2+低层选项7-3的仿真结果如图3所示。在图3(a)和图3(b)中, 高负载和低负载下所有前传、中传 uRLLC 业务数据包的延迟都保持在 0.25 ms 以内。从图3(c)可知, uRLLC 业务低负载下的网络情况对前传 eMBB 业务更友好, 引入的 uRLLC 业务保证带宽小于高负载下的保证带宽, 也有更多的数据包时延被控制在 0.25 ms 以内。

3.2.3 使用高层选项2+低层选项7-2 仿真

随着 Xhaul 网络功能划分的分割点不断下沉, 前传网络的数据量不断上升, 图4(a)显示的前传 uRLLC 业务的时延特性明显优于前2种划分选项(选项6、选项7-3), 其数据包在第一次平台期到达前的最大 CDF 值较低。在图4(b)中, 由于突发信号的特性, 只有极少数数据包的时延超过 0.25 ms。图4(c)中, uRLLC 业务低负载下的 eMBB 业务时延特性略好于高负载条件。

3.2.4 本文算法与其它算法的对比

本文算法以低层功能划分为选项6、高层功能划分为选项2为基础, 与文献[8]提出的基于 PON 承载 5G 多业务系统中的带宽调度算法进行对比仿真实验,

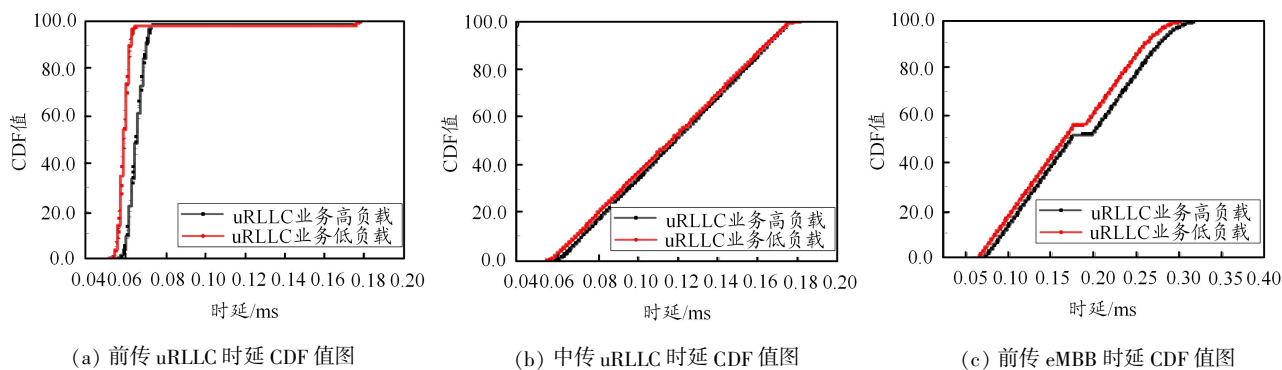


图3 使用高层选项2+低层选项7-3的仿真结果图

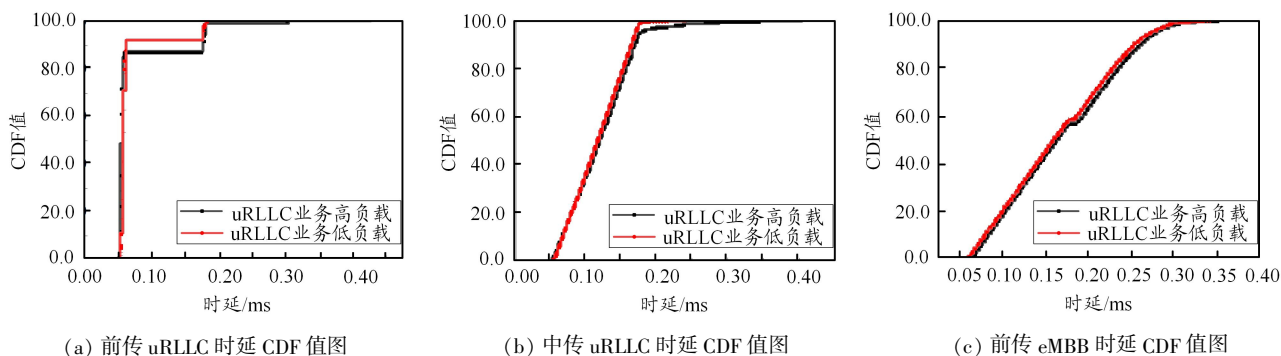


图4 使用高层选项2+低层选项7-2的仿真结果图

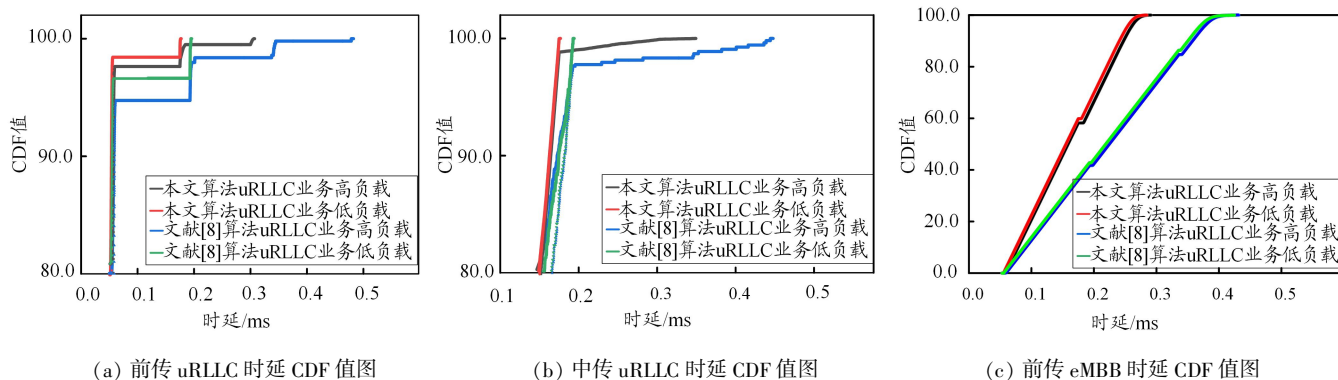


图5 算法实验结果对比图

结果如图5所示。从图5(a)可以看出,本文算法与文献[8]算法在低负载下都满足了0.25 ms的时延需求,但本文算法在平均时延上明显低于文献[8]算法;同时,在高负载下,文献[8]算法产生的最大时延已经超过0.4 ms,远远大于本文算法。从图5(b)可以看出,由于本文算法采用了更短的mini-slot,其时延效果优于文献[8]算法。从图5(c)可以看出,由于本文算法采用了uRLLC业务保证带宽避让机制,其时延效果远优于文献[8]算法;由于文献[8]算法未采用避让机制,前传eMBB业务在带宽分配过程中经历了2次uRLLC业务保证带宽,因此CDF值出现了2次平台期。

4 结束语

本文基于Xhaul网络结构和PON传输技术,提出了一种支持多业务共存的Xhaul网络低时延带宽分配算法。研究表明:在Xhaul网络中高层选项2与3种不同低层选项的搭配在时延保证上都有着不错的效果。同时,随着划分选项越向下,前传链路上的数据量急剧上升,导致了选项7-2在前传uRLLC业务时延保证上比选项6与选项7-3效果差。由于本文算法采用了比文献[8]更短的mini-slot,因此前传、中传uRLLC业务时延特性优于文献[8]算法;同时,本算法引入的uRLLC业务保证带宽避让机制也有效降低了前传eMBB业务的时延。

参考文献:

[1] BAIRAGI A K, MUNIR M S, ALSENWI M, et al. Coexistence mechanism between eMBB and uRLLC in 5G wireless networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(3): 1736–1749.

[2] OLIVA D L, PEREZ X C, AZCORRA A, et al. Xhaul: toward an integrated fronthaul/backhaul architecture in 5G networks [J]. IEEE wireless communications, 2015, 22(5): 32–40.

[3] CAMPS-MURD, GUTIERREZ J, GRASS E, et al. 5G-Xhaul: a novel wireless-optical SDN transport network to support joint 5G backhaul and fronthaul services[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(7): 99–105.

[4] BIDKAR S, BONK R, PFEIFFER T. Low-latency TDM-PON for 5G Xhaul [C]//IEEE. Proceedings of 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Bari: IEEE, 2020: 1–4.

[5] UZAWA H, HONDA K, NAKAMURA H, et al. Dynamic bandwidth allocation scheme for network-slicing-based TDM-PON toward the beyond-5G era[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 12(2): A135–A143.

[6] KASSAB R, SIMEONE O, POPOVSKI P. Coexistence of uRLLC and eMBB services in the C-RAN uplink: an information-theoretic study[C]//IEEE. Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi: IEEE, 2018: 18485138-1–18485138-6.

[7] EDEAGU S O, BUTT R A, IDRUS N S M, et al. Performance of PON dynamic bandwidth allocation algorithm for meeting Xhaul transport requirements[C]//IEEE. Proceedings of 2021 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM). Gothenburg: IEEE, 2021: 1–6.

[8] 季晨阳. 支持多业务的下一代PON系统带宽调度算法研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2021.

[9] ETSI. Service requirements for next generation new services and markets (V15.6.0; 3GPP TS 22.261 version 15.6.0 Release 15): ETSI TS 122261-2018 [EB/OL]. [2022-03-29]. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3107>.

[10] ERICSSON, HUAWEI, NEC, et al. eCPRI specification V2.0 common public radio interface: eCPRI interface specification [EB/OL]. (2019-05-10)[2022-03-29]. <http://www.cpri.info/spec.html>.

[11] LARSEN L, CHECKO A, CHRISTIANSEN H L. A survey of the functional splits proposed for 5G mobile crosshaul networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 21(1): 146–172.