

引用本文:钱晨,李一凡,汪敏:软件定义 HPON 中基于优先级的两层动态带宽分配算法[J]. 光通信技术,2019,43(9):7-12.

软件定义 HPON 中基于优先级的两层动态带宽分配算法

钱晨^{1,2}, 李一凡^{1,2}, 汪敏^{1,2}

(1.上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室,上海 200444;2.上海大学 上海市先进通信与数据科学研究院,上海 200444)

摘要:光接入网已成为一个由多种采用不同物理层复用技术的无源光网络(PON)系统构成的复杂网络。为了解决多种 PON 系统的共存问题,提出一种软件定义混合无源光网络(HPON)架构,并重点研究软件定义 HPON 的动态带宽分配算法。通过引入虚拟 PON(VPON)的概念,提出一种 VPON 间基于优先级的两层动态带宽分配(PBTL-DBA)算法。该算法采用动态权重因子并在带宽不充裕时分配保证带宽,可以为不同优先级的 VPON 进行差异化的带宽分配。仿真验证了 PBTL-DBA 算法可以提高各等级 VPON 的平均满意度、接入率和带宽利用率。

关键词:混合无源光网络;软件定义网络;动态带宽分配;优先级

中图分类号: TN929.18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)09-0007-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.09.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Priority-based two-layer dynamic bandwidth allocation algorithm in software-defined HPON

QIAN Chen^{1,2}, LI Yifan^{1,2}, WANG Min^{1,2}

(1. Key laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The optical access network has become a complicated network constituted by multiple passive optical network (PON) systems using various physical layer multiplexing technologies. In order to solve the coexistence problem of multiple PON systems, a software-defined hybrid passive optical network (HPON) architecture is proposed, and the dynamic bandwidth allocation algorithm in software-defined HPON is primarily investigated. By introducing the concept of virtual PON (VPON), a priority-based two-layer dynamic bandwidth allocation (PBTL-DBA) algorithm for inter-VPON is proposed. The PBTL-DBA algorithm uses dynamic weight factors and allocates guaranteed bandwidth when the bandwidth is not sufficient, and can provide distinctive bandwidth allocation for VPONs with differentiated priorities. The simulation results demonstrate that the PBTL-DBA algorithm can improve the average satisfaction ratio of VPONs with differentiated priorities, the access probability and bandwidth utilization.

Key words: hybrid passive optical network; software defined network; dynamic bandwidth allocation; priority

0 引言

近年来,由于互联网技术的爆发式发展,各种高带宽需求业务和新型网络应用场景不断涌现^[1]。同时,随着多种复用技术在无源光网络(PON)中的广泛应

收稿日期:2019-03-29。

基金项目:上海市科委项目(17010500400、18511103400、16511104100、16YF1403900)资助;国家自然科学基金(61420106011、61601279、61601277)资助。

作者简介:钱晨(1988-),女,博士研究生,现就读于上海大学通信与信息工程学院通信与信息系统专业,主要从事软件定义光接入网体系架构设计,以及基于网络资源抽象的动态带宽分配算法研究及其仿真验证。曾获得校级优秀学生,并多次获得校级奖学金。



用,光接入网已成为一个由多种 PON 系统(例如时分复用 PON(TDM-PON)、波分复用 PON(WDM-PON)、正交频分复用 PON(OFDM-PON))以及未来可能出现的 PON 系统构成的复杂网络^[2]。作为用户接入网络资源的入口,传统光接入网面临着巨大的网络带宽压力和管控压力。因此,下一代光接入网应朝着灵活智能和开放接入的方向发展。如何实现多种 PON 系统的共存,如何进行资源的高效灵活配置,以及如何在复杂的应用场景中保证服务质量(QoS),成为下一代光接入网研究中亟需解决的问题。

软件定义网络(SDN)因具有集中控制、可编程性以及可重构性等独特优势而被引入到光接入网的研究中^[3-5]。目前已经有文献提出了一些软件定义以太网

无源光网络(EPON)架构和相应的带宽分配算法^[6,7]。但是,在实现多种 PON 系统共存的光接入网架构方面的研究还很少,并且目前的研究局限于如何在传统网络架构中实现多种 PON 系统共存并进行带宽配置^[8,9]。将 SDN 技术引入 PON 中,不仅为实现多种 PON 系统的共存提供了新的思路,还为实现可编程的带宽管理奠定了基础。本文提出一种基于 SDN 的混合无源光网络(HPON)架构,以实现多种采用不同物理层复用技术 PON 系统的共存。基于该架构,提出一种 VPON 间基于优先级的两层动态带宽分配(PBTL-DBA)算法。

1 软件定义 HPON 架构及虚拟无源光网络(VPON)组网场景

本文提出了一种新颖的软件定义 HPON 架构,如图 1 所示。该架构包括一个集中式控制器以及多个高级光线路终端(OLT),每个高级 OLT 通过光纤和光配线网络(ODN)与光网络单元(ONU)相连接。该架构具有以下优点:①现有及未来可能出现的多种采用不同

物理层复用技术的 PON 系统能够在该架构中共存;②控制器能够从全局视野进行灵活的、可重构的 VPON 组网;③控制器中的带宽管理模块可以运行不同的带宽配置机制来实现不同的带宽优化目标。

软件定义 HPON 是一种智能化网络控制架构,它分离了底层设备的控制平面和数据平面。控制平面中的控制器运行于高级 OLT 之上,主要由信息收集模块、网络抽象模块、VPON 组网模块和带宽管理模块组成,对底层设备进行可编程化控制,对于整个网络状态具有全局视野,主要具有信息收集功能、网络抽象功能、VPON 组网功能和带宽管理功能。控制器通过信息收集模块掌握全局网络状态及 ONU 的带宽需求。网络抽象模块将网络资源抽象为大量的细粒度的虚拟带宽单元(BU),作为带宽分配的基本单元。由于 VPON 是对现有 PON 的一种虚拟化抽象,VPON 中 OLT 和 ONU 之间的连接可以是动态可重构的,不需要受到物理位置的约束^[10]。VPON 组网模块可以根据实际需求和特定的组网原则,从全局视野进行灵活的 VPON 组网。本文的 VPON 组网原则是按业务类型构

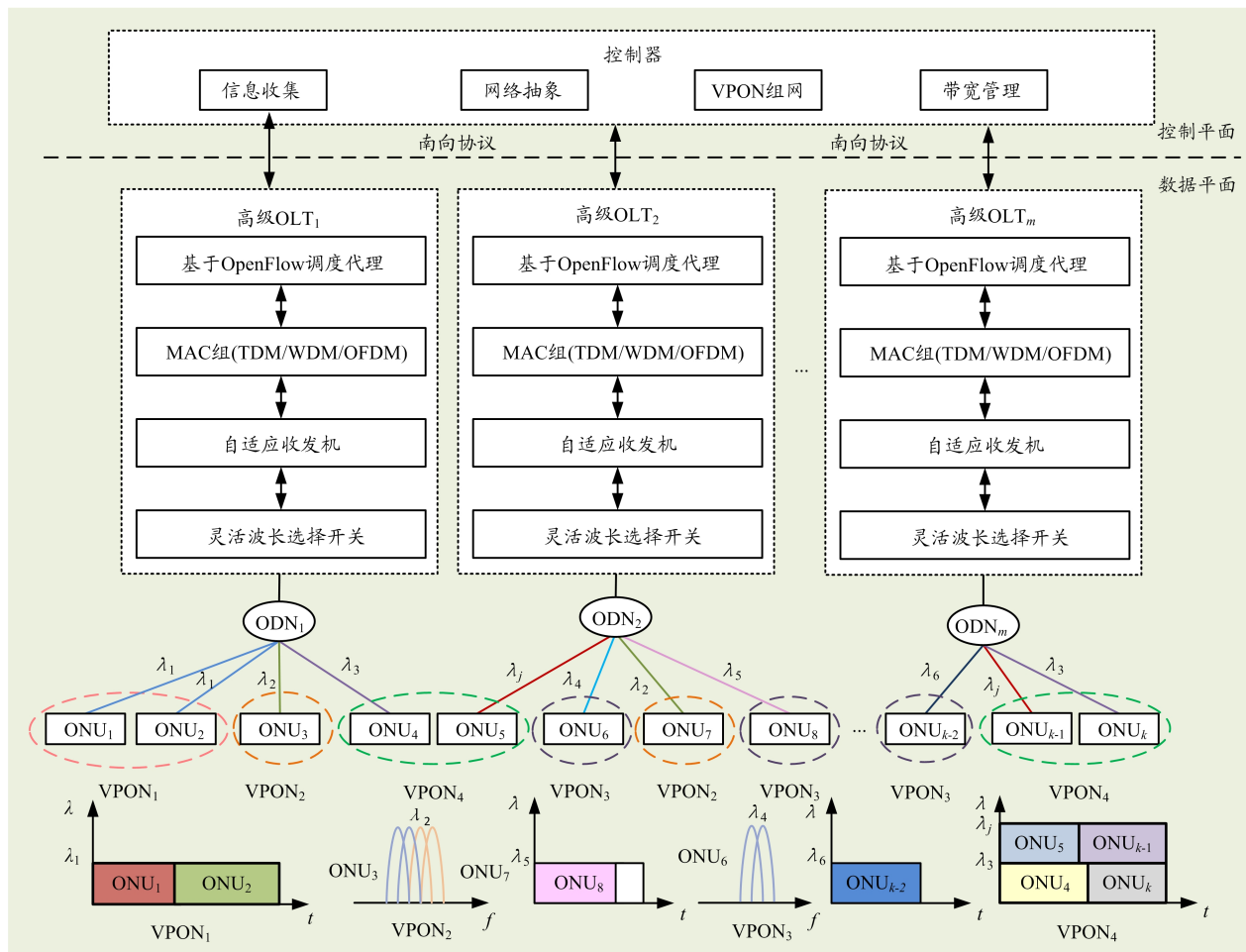


图 1 软件定义 HPON 架构及 VPON 组网场景

建 VPON, 每个 VPON 传输不同类型的业务, 构建的 VPON 可能跨越不同的 OLT。可编程化带宽管理模块能够根据不同的优化目标执行不同的带宽管理机制。控制器在整个网络范围内将带宽管理分为 VPON 间带宽分配和 VPON 内带宽分配两部分:VPON 间带宽分配是指根据每个 VPON 的带宽请求为各个 VPON 分配带宽;VPON 内带宽分配则是为 VPON 内的 ONU 分配带宽, 首先进行每个 ONU 的带宽分配结果是由 VPON 间和 VPON 内带宽分配共同决定的, 然后进行 VPON 间带宽分配, 最后进行 VPON 内带宽分配。

与主要由收发机和单一的媒质接入控制(MAC)构成的传统 OLT 不同, 高级 OLT 由基于 Openflow 的调度代理、MAC 组、自适应收发机和灵活波长选择开关(WSS)组成。传统 OLT 在上行带宽分配方面的功能包括处理多点控制协议(MPCP)信息(例如 REPORT 和 GATE)和对 ONU 的带宽分配进行决策。然而, 高级 OLT 的带宽决策功能由控制器代其实现。控制器在做出 ONU 的带宽分配决策后, 将会为每个高级 OLT 生成一个包含很多流表项的调度表, 该调度表位于基于 Openflow 的调度代理中。ONU 的带宽授权值可以在调度表中匹配相关信息后获得。每个调度流表项都由控制器通过南向协议(例如 Openflow 协议)进行周期化地配置。这些流表项主要有 Match、Instructions 和 Counters 等^[11]。Match 域主要包括 ONU ID 及带宽请求值等信息。Instructions 域包含采用的带宽分配策略(例如限制带宽分配策略、授权带宽分配策略等)。Counters 域负责带宽请求值及带宽授权值等信息的统计收集。MAC 组负责实现异构 ONU 的接入控制。自适应收发机能够发送和接收任意数据格式的数据流。灵活 WSS 在 OLT 和 ONU 之间实现波长路由的功能, 即 WSS 能支持 OLT 和 ONU 之间任意波长任意上、下行的功能。当控制器做出 ONU 的带宽分配决策后, WSS 可以将任意波长分配给任意 ONU。ODN 主要包括光纤和无源分光器, 用于在 OLT 和 ONU 间提供光传输通道。

图 1 举例说明了软件定义 HPON 中的 VPON 组网场景。ONU₁ 和 ONU₂ 共享波长 λ_1 上的时隙, 二者组成的 VPON₁ 可以视为 TDM-PON。VPON₂ 包含 2 个连接着不同的 OLT 的 ONU, ONU₃ 和 ONU₇ 共享波长 λ_2 上的子载波, 因此 VPON₂ 可以视为 OFDM-PON。VPON₃ 由 3 个 ONU 构成, 即 ONU₆、ONU₈ 和 ONU_{k-2}。其中 ONU₆ 占用波长 λ_4 上的子载波, ONU₈ 占用波长 λ_5 上的时隙, ONU_{k-2} 独自占用波长 λ_6 , 因此 VPON₃ 则

可视为由 OFDM-PON、TDM-PON 和 WDM-PON 构成的 HPON。ONU₄、ONU₅、ONU_{k-1} 和 ONU_k 共享波长 λ_3 和 λ_j 上的时隙, 构成的 VPON₄ 可视为时分波分复用 PON (TWDM-PON)。

2 VPON 间基于优先级的两层动态带宽分配算法

VPON 的带宽需求在每个分配周期 T_{cycle} 都会发生变化, 因此需要周期性地地进行带宽分配。本文根据每个 VPON 传输业务的优先级, 将所有 VPON 分为 3 种优先级($P_m, m=0, 1, 2$)。 P_0 、 P_1 、 P_2 分别代表 VPON 的高、中、低优先级。对于相同优先级的 VPON, 遵循“短作业优先(SJF)”原则, 即带宽请求较少的 VPON 比带宽请求较多的 VPON 具有更高的优先级^[12]。假设所有 VPON 构成集合 X , 每个 VPON 表示为 $u_i (i=1, \dots, |X|)$ 。集合 X 的子集 X_m 由 P_m VPON 构成。 $h_{m,i}$ 和 $y_{m,i}$ 分别表示 P_m VPON u_i 请求的带宽和获得的带宽。由整体网络带宽抽象而来的虚拟 BU 总量为 K , 每个 BU 的粒度为 C 。因此, $r_{m,i} = \frac{h_{m,i}}{C}$ 和 $g_{m,i} = \frac{y_{m,i}}{C}$ 分别表示 P_m VPON u_i 请求的 BU 数和获得的 BU 数。专门用于传输控制信息的控制信道占用的 BU 数为 k , 因此可供用于带宽分配的 BU 数为 $K^* = K - k$ 。

VPON 间基于优先级的两层动态带宽分配算法的第一层是为集合 X_m 中所有 P_m VPON 分配 BU 数, 第二层是为集合 X_m 中的各 P_m VPON 分配 BU 数。根据集合 X_m 中所有 P_m VPON 的 BU 请求比例并保证 P_0 VPON 的高优先级, 首先为集合 X_m 中所有 P_m VPON 分别设置动态权重因子 γ_m 。3 个权重因子分别为:

$$\gamma_0 = \frac{\sum_{i | u_i \in X_0} r_{0,i}}{\sum_{i | u_i \in X_m} r_{m,i}} + \tau, 0 \leq \tau \leq 1 - \frac{\sum_{i | u_i \in X_0} r_{0,i}}{\sum_{i | u_i \in X_m} r_{m,i}} \quad (1)$$

$$\gamma_1 = \frac{\sum_{i | u_i \in X_1} r_{1,i}}{\sum_{i | u_i \in X_m} r_{m,i}} \quad (2)$$

$$\gamma_2 = \frac{\sum_{i | u_i \in X_2} r_{2,i}}{\sum_{i | u_i \in X_m} r_{m,i}} - \tau \quad (3)$$

其中, τ 为优先级参数。集合 X_m 中所有 P_m VPON 获得的 BU 数为:

$$K_{X_m}^{total} = K^* \cdot \gamma_m \quad (4)$$

若 $\gamma_2 \leq 0$, 则集合 X_2 中所有 P_2 VPON 无法获得 BU, 集合 X_1 中所有 P_1 VPON 获得的总 BU 数如式(5)所示:

$$K_{X_1}^{total} = K^* \cdot (1 - \gamma_0) \quad (5)$$

接下来, 根据集合 X_m 中所有 P_m VPON 获得的总 BU 数为集合 X_m 中的各 P_m VPON 分配 BU 数。以为集合 X_0 中的各 P_0 VPON 分配 BU 数为例。首先, 将可供分配给所有 P_0 VPON 的 BU 数 K_0 的初始值设置为 $K_{X_0}^{total}$, 然后, 将集合 X_0 中的 P_0 VPON 按优先级降序排列并表示为 $u_i^n (n=1, \dots, |X_0|)$ 。当可供分配的 BU 数能够满足 VPON u_i^n 的请求时, 则完全满足该 VPON 的请求, 否则为其分配保证 BU 数 $b_{m,i}$; 当保证 BU 数也不能满足时, 则不为其分配 BU。这一部分的带宽分配在依次遍历所有的 P_0 VPON 后结束。为集合 X_0 中的各 P_0 VPON 分配 BU 数的算法流程图如图 2 所示。为集合 X_1, X_2 中的各 P_1, P_2 VPON 分别分配 BU 数的算法与上述算法相同。

3 仿真及结果分析

本文在 OPNET 平台搭建仿真模型, 对提出的两层动态带宽分配(PBTL-DBA)算法进行仿真。仿真系

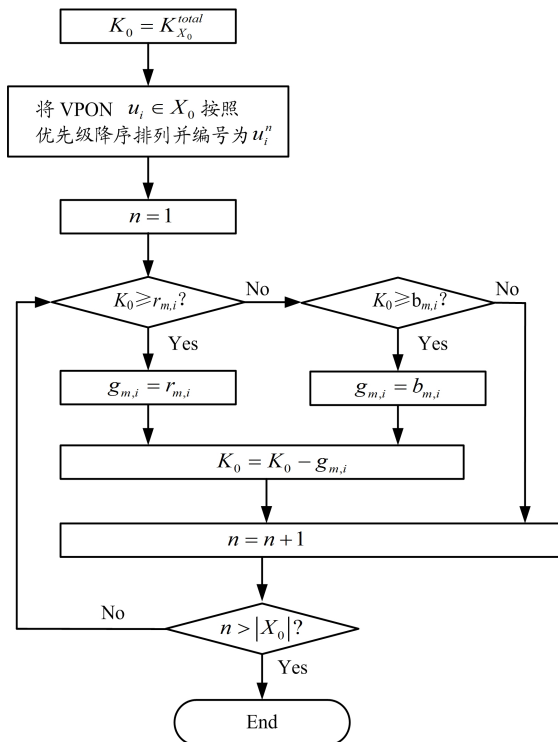


图2 集合 X_0 中的各 P_0 VPON 分配 BU 数的算法流程图

统包含 10 个 VPON, 每个 VPON 包括 32 个 ONU。 P_m VPON 的数量按照优先级由高到低依次为 2、4、4。上行网络总容量为 10 Gb/s, 被抽象为 $H = 5000$ 个 BU, 每个 BU 的粒度为 2 Mb/s。控制信道容量为 60 Mb/s。配置周期时间固定为 10 ms。ONU 端到达的流量是服从帕累托(Pareto)分布的自相似流量, 帕累托指数 $\alpha = 1.6$ 。平均数据包大小为 1 kbits, 通过变化数据包平均到达时间间隔来产生不同的网络负载。

不同优先级参数下各等级 VPON 的平均满意度如图 3 所示。各等级 VPON 的平均满意度 Q_m 定义为每个 P_m VPON 获得的 BU 数与申请的 BU 数之比的平均值, 如式(6)所示:

$$Q_m = \frac{\sum_{i | u_i \in X_m} \frac{g_{m,i}}{r_{m,i}}}{|X_m|} \quad (6)$$

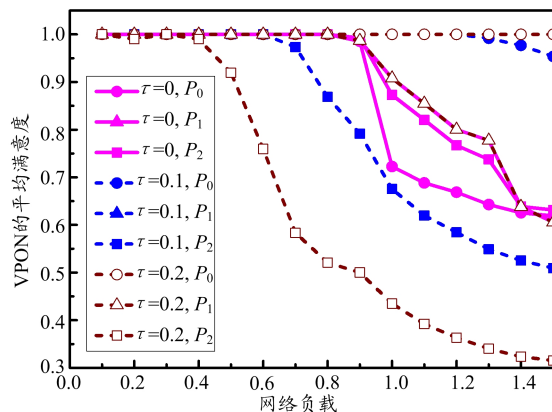


图3 不同优先级参数下各等级 VPON 的平均满意度

由图 3 可知, 当优先级参数 $\tau=0$ 时, 各等级 VPON 在分配带宽时没有优先级差异, 因此无法保证 P_0 VPON 的高优先级。当 $\tau=0.1$ 时, P_0 VPON 的高优先级得到了保证, 不同等级的 VPON 可以获得差异化的带宽支持。当 $\tau=0.2$ 时, 不同等级的 VPON 获得带宽的差异化程度更为明显。这意味着随着 τ 值的增大, 在维持 P_0 VPON 获得较高的平均满意度的基础上会逐渐出现带宽浪费, 并且会导致 P_2 VPON 的平均满意度越来越低。综合考虑, 本文选择的优先级参数为 $\tau=0.1$ 。

为了验证 PBTL-DBA 算法的性能, 本文对各等级 VPON 平均满意度、接入率及带宽利用率等指标进行了研究。为了进行比较, 我们在仿真中引入了固定权重完全满足动态带宽分配(SWCM-DBA)算法。该算法根据固定权重为集合 X_m 中所有 P_m VPON 分配 BU 数。在为集合 X_m 中的各 P_m VPON 分配 BU 数时, 当可

供分配的 BU 数能够满足 VPON u_i^n 的请求时,则完全满足该 VPON 的请求。否则不为其分配 BU^[9,13]。

不同网络负载下各等级 VPON 的平均满意度如图 4 所示。PBTL-DBA 算法优先保证 P_0 VPON 获得较高的平均满意度,并且 P_1 VPON 的平均满意度高于 P_2 VPON。此外,PBTL-DBA 算法中各等级 VPON 的表现均优于 SWCM-DBA 算法,这是因为 PBTL-DBA 算法采用了动态权重因子并在带宽不充裕时分配保证带宽,不仅能根据网络负载的变化为各等级 VPON 提供差异化的带宽分配,还减少了带宽的浪费。仿真结果表明:PBTL-DBA 算法可以为不同等级的 VPON 提供更好的带宽支持。

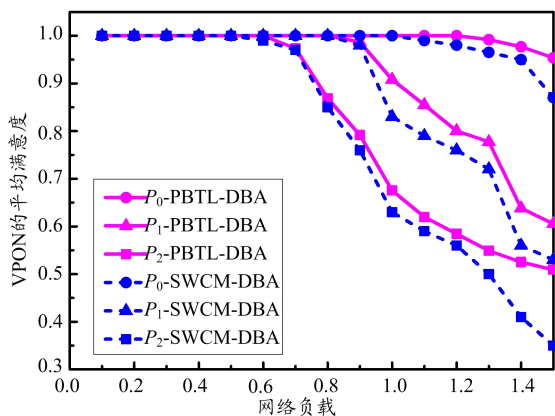


图4 不同网络负载下各等级 VPON 的平均满意度

不同网络负载下 VPON 的总接入率如图 5 所示。VPON 总接入率定义为接入网络的 VPON 数量与 VPON 总数量之比。当网络负载大于 0.6 时,PBTL-DBA 算法和 SWCM-DBA 算法的总接入率开始从 1 下降,并且 SWCM-DBA 算法的表现更差。不同网络负载下各等级 VPON 的接入率如图 6 所示。各等级 VPON 的接入率定义为各等级 VPON 中接入网络的 VPON

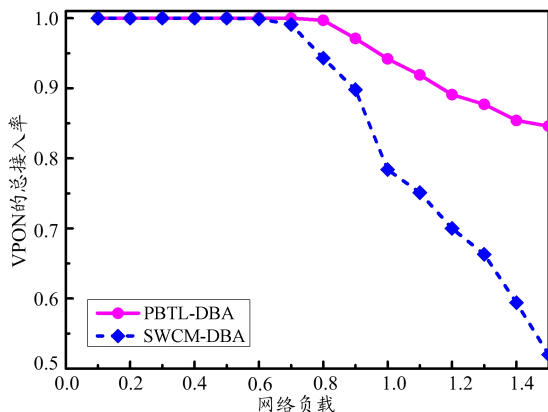


图5 不同网络负载下 VPON 的总接入率

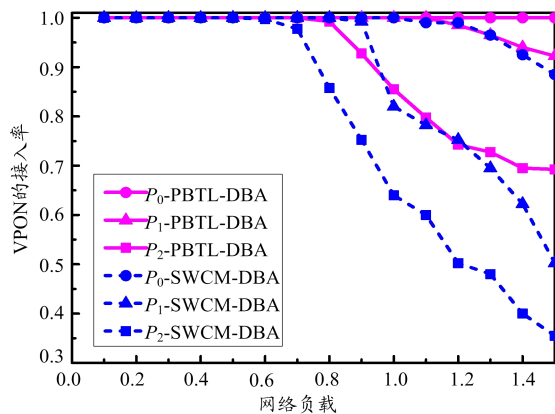


图6 不同网络负载下各等级 VPON 的接入率

数量与该等级 VPON 的总数量之比。PBTL-DBA 算法中各等级 VPON 的接入率均高于 SWCM-DBA 算法。这说明通过设置动态权重因子并在带宽不充裕时分配保证带宽,PBTL-DBA 算法更加合理地利用和分配了网络带宽,使得更多的 VPON 可以接入网络。

不同网络负载下平均 BU 利用率如图 7 所示。平均 BU 利用率定义为分配给 VPON 的所有 BU 数与总 BU 数之比。由图 7 可知,当网络负载小于 0.6 时,2 种算法的平均 BU 利用率的表现基本一致,PBTL-DBA 算法最终可以达到的平均 BU 利用率高于 SWCM-DBA 算法。这说明 PBTL-DBA 算法可以更加充分地利用带宽。

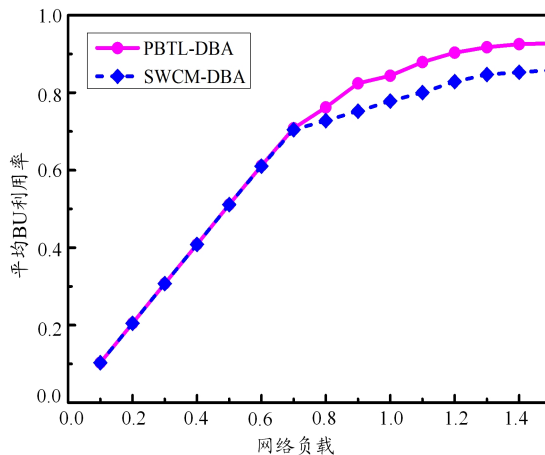


图7 不同网络负载下平均 BU 利用率

4 结束语

本文提出了一种新颖的软件定义 HPON 架构和一种 VPON 间 PBTL-DBA 算法。该架构可以实现多种采用不同物理层复用技术的 PON 系统的共存,具有集中控制、可编程性及可重构性等优点;该算法可以为

不同优先级的 VPON 提供差异化的带宽支持。通过在 OPNET 平台搭建仿真模型,将提出的 PBTL-DBA 算法与固定权重完全满足动态带宽分配 (SWCM-DBA) 算法进行了比较。仿真结果表明:PBTL-DBA 算法显著提升了各等级 VPON 的平均满意度、接入率及带宽利用率。在今后的工作中,我们将对软件定义 HPON 中的 VPON 间和 VPON 内的联合带宽分配算法进行研究。

参考文献:

- [1] EFFENBERGER F J, MUKAI H, PARK S, et al. Next-generation PON-part II: candidate systems for next-generation PON [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(11): 50-57.
- [2] WEI W, HU J Q, QIAN D Y, et al. PONIARD: a programmable optical networking infrastructure for advanced research and development of future Internet [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 233-242.
- [3] 顾仁涛. 光接入网演进趋势展望: 软件定义的光接入网 [J]. 电信科学, 2015(10): 103-104.
- [4] 赵永利, 吴家林, 张杰. 软件定义光接入网[J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(5): 38-41.
- [5] ZHOU L, PENG G K, CHAN D. Demonstration of a novel software-defined Flex PON [J]. Photonic Network Communication, 2015, 29(3): 282-290.
- [6] LI C J, GUO W, WANG W, et al. Programmable bandwidth management in software-defined EPON architecture [J]. Optics Communications, 2016, 370: 43-48.
- [7] CHITIMALLA D, THOTA S, SAVAS S S, et al. Application-aware software-defined EPON upstream resource allocation [C]// Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC 2015), March 22-26, 2015, Los Angeles, USA. Piscataway: IEEE, 2015.
- [8] KANONAKIS K, CVIJETIC N, TOMKOS I, et al. Dynamic software-defined resource optimization in next-generation optical access enabled by OFDMA-based meta-MAC provisioning [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(14): 2296-2306.
- [9] XIA W D, GAN C Q, XIE W L, et al. Bandwidth-allocated mechanism and its algorithm for multi-subsystem-based virtual passive optical network in metro-access optical network [J]. IET Communications, 2016, 10(2): 154-161.
- [10] WEI W, WANG T, QIAO C M. Resource provisioning for orthogonal frequency division multiple access (OFDMA)-based virtual passive optical networks (VPON)[C]// Proceedings of 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2008), February 24-28, 2008, San Diego, USA. Piscataway: IEEE, 2008: 1-3.
- [11] YANG H, ZHANG J, ZHAO Y L, et al. Experimental demonstration of remote unified control for OpenFlow-based software-defined optical access networks [J]. Photonic Network Communications, 2016, 31: 568-577.
- [12] ALVI A N, BOUK S H, AHMED S H, et al. Enhanced TDMA based MAC protocol for adaptive data control in wireless sensor networks [J]. Journal of Communications and Networks, 2015, 17(3): 247-255.
- [13] SHAO A H, DOU Q, XIAO Y H, et al. Bandwidth allocation design to guarantee QoS of differentiated services for a novel OFDMA-PON [C]// Proceedings of 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2012), October 15-17, 2012, Jeju Island, South Korea. Piscataway: IEEE, 2012: 775-780.

OSID 内容制作手册

凡经本刊审稿录用后即将发表的论文都将添加 OSID 开放科学(资源服务)标识码。作者需要录制 1 段或几段语音介绍(每段语音不超过 10 分钟)上传到 OSID 码中。具体操作如下:

1、注册 OSID 作者助手。作者收到“OSID” <says_support@vip.163.com>发来的那封邮件后,用手机扫描邮件中的二维码,注册“OSID 作者助手”工具账号(也可以通过电脑注册账号 <https://author.says.ren/A10000088871/register>)。

2、录制并上传语音。获得【OSID 作者助手】工具账号后,请先准备好要录制上传的语音内容,然后登录【OSID 作者助手】工具账号,这时窗口会自动弹出系统为您的文章生成的独一无二的 OSID 码;接下来您只需按提示操作录音、提交。录好第 1 段语音后请提交(右侧那个“提交”);然后录第 2 段、提交(右侧那个“提交”)……最多可录 5 段,录完最后一段语音后,先点右侧那个“提交”,再点正下方的那个“提交”。

3、添加开放科学数据与内容(可选项)。

4、学术圈动态(可选项)。

重要提醒:作者需在收到邮件的 10 个工作日内将补充材料进行上传。完成上传为本刊稿件正式录用发表的必要条件,请各位作者务必配合,以便完成论文发表流程。

《光通信技术》编辑部