

软件定义时分波分复用无源光网络中基于带宽预测的资源分配策略

熊余^{*①②③} 杨娅娅^{①②③} 张振振^{①②③} 蒋婧^{①②③④}

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(重庆高校市级光通信与网络重点实验室 重庆 400065)

^③(泛在感知与互联重庆市重点实验室 重庆 400065)

^④(国网重庆市电力公司检修分公司 重庆 400039)

摘要: 针对时分波分复用无源光网络(TWDM-PON)多个光线路终端(OLT)间资源缺乏协同集中调度问题, 该文提出一种带有软件定义的基于带宽预测的资源分配策略(RABP)。在光线路终端间, 设计粒子群优化的BP神经网络模型预测各光线路终端所需带宽, 避免了控制器与光线路终端信息交互时延对资源分配实时性的影响; 其次, 在光线路终端内, 动态设定滑动周期并基于光网络单元授权信息实时统计资源池共享带宽, 同时, 设计负载均衡的波长调度机制实现多波长的高效利用。仿真结果表明, 该策略提高了信道资源利用率, 降低了平均包时延。

关键词: 软件定义网络; 时分波分复用无源光网络; 神经网络; 带宽预测; 资源分配; 滑动周期

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)08-1885-08

DOI: [10.11999/JEIT180837](https://doi.org/10.11999/JEIT180837)

Resource Allocation Based on Bandwidth Prediction in Software-defined Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network

XIONG Yu^{①②③} YANG Yaya^{①②③} ZHANG Zhenzhen^{①②③} JIANG Jing^{①②③④}

^①(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(Key Laboratory of Optical Communication and Network in Chongqing, Chongqing 400065, China)

^③(Key Laboratory of Ubiquitous Sensing and Networking in Chongqing, Chongqing 400065, China)

^④(Maintenance Branch Company, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400039, China)

Abstract: Considering lacking of centralized and synergistic scheduling for time-slots and wavelength resources of the inter-TWDM-PONs, a novel Resource Allocation based on Bandwidth Prediction (RABP) strategy with software-defined centralized schedule is proposed. For intra-Optical Line Terminal (OLT), the BP neural network model based on Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is designed to predict the required bandwidth of each OLT in order to avoid the impact of delay between controller and OLT on real-time resource allocation. For inter-OLT, the slide cycle is dynamically set, and then the shared bandwidth of resource pool is counted in real-time according to the authorized information of optical network unit. In the process of wavelength scheduling, a wavelength scheduling mechanism with load balancing to achieve efficiently utilizing of wavelength resource is designed. The simulation results show that the proposed strategy not only effectively improves the utilization of channel resources, but also reduces the average packet delay.

Key words: Software-Defined Network (SDN); Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON); Neural network; Bandwidth prediction; Resource allocation; Slide cycle

收稿日期: 2018-08-27; 改回日期: 2019-02-09; 网络出版: 2019-02-25

*通信作者: 熊余 xiongyu@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61401052), 国家留学基金委(201608500030), 重庆市教委科学技术研究资助项目(KJ1400418, KJ1500445), 重庆邮电大学博士启动基金(A2015-09)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61401052), The Project of the China Scholarship Council(201608500030), The Science and Technology Research Project of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1400418, KJ1500445), The Doctoral Start-up Fund of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2015-09)

1 引言

时分波分复用无源光网络(Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network, TWDM-PON)因高带宽、组网灵活以及平滑演进等优势成为下一代无源光网络的主流解决方案^[1]。TWDM-PON属于时分波分混合组网,资源分配过程需要综合考虑时隙和波长资源,与传统的无源光网络相比,其资源分配方法的复杂性更高。与此同时,随着覆盖用户的规模扩大,不同TWDM-PON网络之间的资源也需要进行协同调度。因此,如何实现多个TWDM-PON的时隙波长资源集中优化调度,在提高网络总体资源利用率的同时降低网络传输时延,成为下一代无源光网络领域的研究热点。

在单个TWDM-PON网络中,即面向1个光线路终端(Optical Line Terminal, OLT)情况下,资源分配策略主要分为在线调度和离线调度,国内外团队对此做了大量研究。如文献[2]采用在线调度方式来填充波长空隙,在收到光网络单元(Optical Network Unit, ONU)请求信息时立即为其分配带宽,这减小了平均包时延。但公平性差且资源分配难以优化,对具有多波长特性的TWDM-PON来说会导致信道利用率低。离线调度是在轮询周期末由OLT整合全部ONU请求信息并为所有ONU集中进行资源分配,以此提高资源分配的公平性及信道利用率。如文献[3]采用离线集中授权的资源调度方式,针对3种类型TWDM-PON设计3种优化波长调度策略,提高了资源分配的公平性,但也会导致周期间产生空闲时隙,降低信道利用率。文献[4]对ONU进行集中授权并动态调整调度顺序,在一定程度上减少闲置时间以降低网络时延且避免带宽浪费。文献[5]提出一种用户行为感知的动态资源分配策略,通过调整ONU轮询机制和区分业务的交替子周期传输机制,在满足不同用户的QoS要求的同时减小了周期间空闲时隙。文献[6]根据负载情况,对ONU组的波长数进行动态调整实现资源共享并设计混合资源调度算法,在保证不同业务时延要求的同时提高了信道利用率。但周期间空隙依然存在,如何进一步减小周期间空隙提高网络资源利用率很有必要。

以上策略是针对单个OLT所属的不同ONU间的网络资源分配情况,而随着用户规模的急剧扩大在同一个区域存在多个TWDM-PON。如文献[7]提出一种基于多个OLT的TWDM-PON架构,通过为ONU和OLT灵活划分所属关系,提高了网络吞吐量。然而,在传统多TWDM-PON中,当单个OLT

内部的资源无法满足所属ONU的带宽请求时,不能与其他相对空闲的OLT动态调度资源,导致带宽资源浪费严重。因此,为实现多个TWDM-PON间资源的共享,具有全局集中式控制特性的软件定义网络(Software Defined Networking, SDN)技术被引入到TWDM-PON中。文献[8]在多TWDM-PON中提出一种服务流感知调度策略,通过SDN控制器实时感知网络流量变化,灵活高效地分配带宽资源,然而它没有考虑SDN技术引入后带来的SDN控制器与OLT之间信息交互的时延问题。文献[9]由SDN控制器实现资源远程统一控制,设计软件定义的动态带宽优化(Software-Defined Dynamic Bandwidth Optimization, SD-DBO)策略实现多TWDM-PON间的资源共享,降低了网络时延,但控制器与OLT之间的时延仍然存在。为此文献[10]对如何降低网络时延做了进一步探索,提出基于预测的全局资源分配(Global Resources Allocation with Prediction, GRAP)策略,但所提OLT间和OLT内的资源分配方法较为简单,其优化调度效果还存在进一步提升空间。因此,如何平衡资源利用率和网络时延这对矛盾体,结合新型的TWDM-PON结构实现资源的集中优化配置,是需要研究的关键点。

为此,提出一种基于带宽预测的资源分配(Resource Allocation based on Bandwidth Prediction, RABP)策略。在OLT间,采用预测机制避免SDN技术引入到TWDM-PON后,SDN控制器与OLT之间交互时延对网络的影响。在OLT内所属的不同ONU之间,基于ONU的轮询时间为其设置滑动周期,并在滑动周期的基础上实时统计资源池的共享带宽,提高信道利用率,同时采用负载均衡的波长调度机制,提高波长资源利用率。

2 软件定义的TWDM-PON架构

在传统的多TWDM-PON架构中,网络管理端全部集中于OLT端,由于OLT端的管理能力有限,难以实现多类型服务部署调度和多层资源协同优化。在无源光网络中融入SDN技术,构建软件定义光接入网(Software Defined Optical Access Network, SDOAN)架构,可实现逻辑控制与数据转发的分离,有效地解决了以上问题^[11]。基于TWDM-PON的SDOAN架构如图1所示,该架构主要由OLT、远端节点(Remote Node, RN)、分光器、ONU和SDN控制器组成。多个支持OpenFlow协议的OLT(OF-OLT)与城域网相连,由SDN控制器控制其网络状态和资源分配过程,并通过SDN控制器北向应用程序编程接口(Application Programming

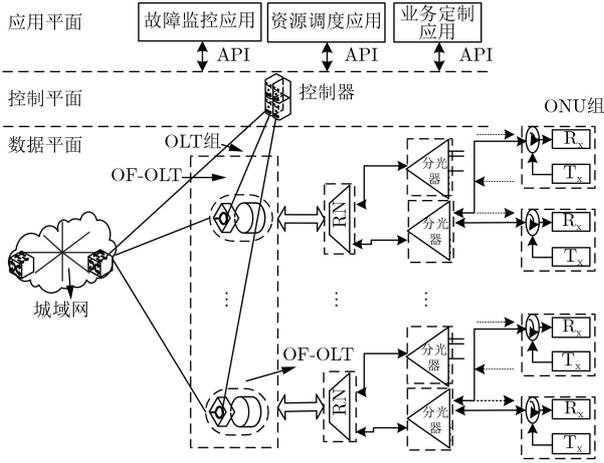


图1 软件定义光接入网架构

Interface, API)为应用平面提供统一抽象的接口, 从而实现对故障监控、资源调度、业务定制等多种服务应用的支持。在该架构中, 将全网OLT间的资源抽象成资源池, 由SDN控制器根据各OLT的请求信息对全局资源集中优化调度后, 通过软件定义高效地感知各OLT所需的时隙波长带宽资源, 并将所需资源结果通过OpenFlow流表发送到各个OLT的OpenFlow代理器, 由OLT具体执行时隙和波长资源的分配动作, 为所属ONU分配满足要求的相应资源。

3 光线路终端间资源分配

因TWDM-PON长距离和广覆盖等特性, 接入端用户数量急剧增加, 网络设备也更加复杂。SDN的引入实现全局资源的集中调度与灵活分配, 但与传统架构相比, 软件定义的TWDM-PON增加了SDN控制器与OLT信息交互的时延, 从而增大网络整体时延。因此, 为有效避免SDN控制器与OLT信息交互时, 过高时延对OLT控制实时性的影响, 可根据历史周期数据构建网络预测模型来实现下一周期OLT所需带宽资源的预测, 并对OLT内的资源进行联合调度优化, 尽可能提供满足预测所需的带宽资源。同时, SDN控制器可以通过OpenFlow流表集中分析所有OLT的资源需求信息, 通过整理全部状态信息为所有OLT集中协调资源, 从而避免TWDM-PON的OLT间因信息不互通引起资源分配不均衡造成的资源浪费。

在TWDM-PON中, 由于业务具有非线性、自相似和长相关性等特点, 而反向传播(Back Propagation, BP)神经网络优良的非线性映射能力和强大的自学习自适应能力, 能够较好地对应TWDM-PON中复杂业务进行预测。图2是用于带宽资源预测的3层BP神经网络模型。

图2中的 n 代表输入层的节点数, l 代表隐含层的节点数, w_{ij} 表示输入层到隐含层的链路权重, w_{jk} 表示隐含层到输出层的链路权重。则隐含层的输出为

$$H_j = f\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}x_i - \theta_j\right), j = 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

其中, x_i 表示输入, θ_j 表示隐含层第 j 个节点的阈值, $f(\cdot)$ 是一个非线性转移函数: $f(x) = 1/(1 + e^{-x})$ 。因此实际网络输出值, 即OLT下一周期请求带宽的预测值为如式(2)所示, 其中, ς 为输出层阈值。

$$B = \sum_{j=1}^l H_j w_{jk} - \varsigma, k = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

通过OLT下一周期需求带宽期望输出值与实际请求带宽 B_r 可以计算其预测误差

$$e_k = \frac{1}{2} \sum_k (B - B_r)^2, k = 1, 2, \dots, l \quad (3)$$

BP神经网络具有优异的逼近非线性映射的能力, 但是其存在易陷入局部极小等缺陷。鉴于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)强大的全局寻优能力, 为此采用PSO算法优化BP神经网络模型。

PSO算法把每一个粒子当作 n 维搜索空间中的一个微粒, 并忽略其体积和重量, 同时假设这些微粒在搜索空间中自由飞行。其飞行速度和位置由粒子和群体飞行经验进行动态调整^[12]。PSO采用的进化公式为

$$v_i(t+1) = \omega \cdot v_i(t) + c_1 \cdot \text{rand}(0, 1) \cdot (p_i - x_i(t)) + c_2 \cdot \text{rand}(0, 1) \cdot (p_g - x_i(t)) \quad (4)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1), i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

其中, 式(4)、式(5)分别表示的是粒子的速度和位

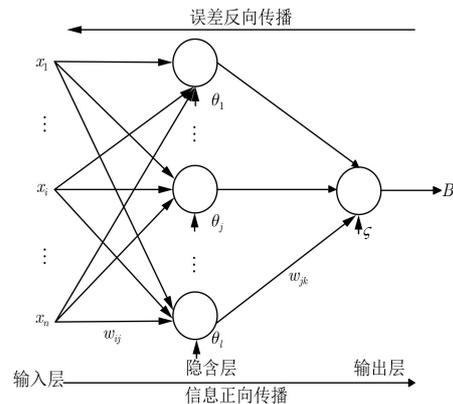


图2 BP神经网络模型

置, $\text{rand}(0,1)$ 表示(0, 1)区间上的随机数, p_i 和 p_g 分别表示单个粒子和种群中所有粒子的最佳位置, c_1, c_2 是加速常数, ω 是惯性权重因子, 其定义为

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{t_{\max}} \cdot \tau \quad (6)$$

其中, t_{\max}, τ 分别代表最大进化代数和当前进化代数, 通过对式(6)中各参数的限制可以有效控制粒子的搜索范围, 减小搜索时间。各粒子根据式(4)、式(5)飞向各自新的位置, 此过程一直重复直到达到用户的期望效果。

根据预测结果得到各个OLT需要分配的带宽资源, 其中第 u 个OLT所需带宽资源为第 v 周期或者第 v 周期与其相邻 $v+1$ 周期的资源总和, 如式(7)所示

$$B_u = B_u^v + B_u^{v+1} \quad (7)$$

其中, B_u^v 表示的是第 v 周期内所需的带宽, B_u^{v+1} 表示的是当第 v 周期内所需的带宽小于OLT请求的带宽时, 在 $v+1$ 周期内为其调度的剩余带宽。 B_u^v 的计算公式为

$$B_u^v = \frac{B_u^{'v}}{Z} B_{\text{to}}^v \quad (8)$$

$$\sum_{u=1} B_u^{'v}$$

其中, $B_u^{'v}$ 表示由BP神经网络预测得到的第 u 个OLT在第 v 周期请求的带宽大小, Z 表示OLT总数, B_{to}^v 表示SDOAN在第 v 周期的全网总带宽。

4 光线路终端内资源分配

基于PSO-BP神经网络的资源分配能有效避免SDN控制器与OLT之间延时对OLT控制实时性的影响。然而, 要实现全网资源集中高效地分配, 还要进一步考虑OLT内资源的分配, 以尽可能提高OLT内资源的利用率, 从而满足预测所需的带宽资源。对TWDM-PON来说, 由于其时分波分混合复用的特点, 则应考虑时隙带宽资源和波长带宽资源的联合优化分配。

4.1 基于滑动周期的时隙资源分配

在OLT内, TWDM-PON轮询周期的差异会导致网络时延呈现波动性, 不利于时延敏感型业务的传输。此外, 周期内的空闲时隙会导致带宽资源的浪费, 显著恶化信道利用率性能。为此, 提出基于滑动周期的OLT内时隙资源分配, 为更清晰地描述其具体分配过程, 对一些公式符号标明含义, 如表1所示。

根据ONU相邻两次数据传输之间的时间间隔(轮询时间), 为ONU设置滑动周期 T_{sl} , 如式(9)所示

$$T_{\text{sl}} = t_i^{s,K+1} - t_i^{s,K} \quad (9)$$

表1 公式符号含义

符号	含义
N	ONU的数目
M	波长数
R	传输速率
T_{max}	最大轮询周期
T_{sl}	滑动周期
t_g	ONU之间的保护时隙
B_{min}	最小保证带宽
t_i	ONU $_i$ 数据传输时间
$t_i^{s,K}$	在第 K 个周期ONU $_i$ 传输数据的开始时刻
λ_j	第 j 条波长
t_c	GATE帧或REPORT帧的传输时间
e_{ij}	波长 λ_j 与ONU $_i$ 之间的关系
R_i	ONU $_i$ 的请求带宽
G_i	ONU $_i$ 的授权带宽
O_i	ONU $_i$ 的额外授权带宽
B_i^{po}	资源池共享带宽

其中, $t_i^{s,K}, t_i^{s,K+1}$ 分别为第 K 个周期与第 $K+1$ 个周期ONU $_i$ 数据传输的开始时间, 图3所示为ONU的滑动周期示意图, 将ONU $_i$ 连续两次被轮询的时间间隔记为1个滑动周期。



图3 ONU的滑动周期

由于滑动周期过大势必会恶化时延敏感型业务的传输性能, 因此需要限定滑动周期的范围, 以此保证TWDM-PON具有较低的网络时延。如式(10)所示, 滑动周期的上限为最大轮询周期。

$$T_{\text{sl}} \leq T_{\text{max}} \quad (10)$$

滑动周期的设置可以降低由轮询周期差异性造成的时延抖动, 并确保业务QoS。同时, 轻负载ONU剩余的带宽可以被重负载ONU合理地使用, 极大地提高了资源利用率。然而, 在传统带宽分配算法中, 由于相邻周期内的资源不能共享, 因此造成严重的资源浪费。鉴于此, 将网络中的时隙资源抽象成资源池, 基于ONU的带宽请求, OLT动态调度资源池, 并为各个ONU计算授权带宽, 最后实时更新资源池共享带宽。

OLT根据滑动周期内前 $N-1$ 个ONU的授权带宽 $\{G_{i-N+1}, G_{i-N+2}, \dots, G_{i-1}\}$, 资源池中可用的共享带宽为

$$B_i^{\text{po}} = \max \left((T_{\max} \cdot R \cdot M) - N \cdot t_g - \sum_{q=i-N+1}^{i-1} G_q - B_{\min}, 0 \right) \quad (11)$$

其中, B_{\min} 表示ONU最小保证带宽, G_q 表示第 q 个ONU的授权带宽。当ONU总数、波长总数、传输速率、最大周期、ONU之间的保护时隙分别为 N , $M(M \leq N)$, R , T_{\max} , t_g 时, 根据式(12)可计算出 B_{\min} 。

$$B_{\min} = \frac{T_{\max} \cdot M \cdot R - N \cdot t_g}{N} \quad (12)$$

资源池的引入使得相邻周期的时隙资源得以共享, 资源分配更加灵活。然而, 网络负载的实时变化使其在资源调度的过程中不断更新。因此需要统计各种负载情况下的带宽请求并计算 B_i^{po} , 具体过程如下:

步骤 1 在初始周期($K=0$), OLT综合考虑 B_{\min} 并根据式(13)为所有ONU计算授权带宽; 同时, 基于此授权带宽由式(11)计算 $K=0$ 时资源池共享带宽。

$$G_i = \min(R_i, B_{\min}) \quad (13)$$

步骤 2 在常规周期($K \geq 1$), 由于每个ONU请求带宽大小各异, 因此采用的授权方式也不同, 具体分为两种情形。情形1: 当 $R_i \leq B_{\min}$ 时, 将其归为轻负载ONU, 其授权带宽如式(13); 情形2: 当 $R_i > B_{\min}$ 时, 将其归为重负载ONU。OLT根据当前时刻资源池共享带宽为该重负载ONU计算授权带宽, 如式(14)

$$G_i = \min(B_{\min} + B_i^{\text{po}}, R_i) \quad (14)$$

步骤 3 OLT重新对 T_{sl} 全部ONU的授权带宽进行统计, 同时对资源池共享带宽进行更新, 提前做好为后续ONU进行资源调度的准备:

图4展示了资源池共享带宽的更新过程。将时隙资源池抽象成一个容器, 如图4(a)中灰色部分表示在ONU $_{i-1}$ 调度之前的资源池共享带宽。若存在

可用波长, 根据式(14)和式(15)分别计算ONU $_{i-1}$ 的授权带宽和额外授权带宽 O_{i-1} 。此时, 将 B_i^{po} 的一部分授权给ONU $_{i-1}$, 如图4(b)所示。

$$O_{i-1} = \max(G_{i-1} - B_{\min}, 0) \quad (15)$$

对于轻负载ONU, 其 O_{i-1} 为0; 对于重负载ONU, 其 O_{i-1} 为 G_{i-1} 与 B_{\min} 的差值。图4(c)表示在ONU $_{i-1}$ 的授权带宽 G_{i-1} 计算结束后, OLT统计此时资源池共享带宽, 然后在滑动周期的基础上计算ONU $_i$ 上一次额外授权带宽, 最后将额外授权带宽释放到资源池中。此时, 再次计算资源池共享带宽, 如式(16)。一旦网络中再次存在可用波长, OLT重新计算ONU $_i$ 授权带宽并更新资源池共享带宽, 如图4(d)和图4(e)所示。

$$B_i^{\text{po}} = B_{i-1}^{\text{po}} - O_{i-1} + O_{i-N} \quad (16)$$

4.2 负载均衡的波长调度

TWDM-PON是基于时分波分混合复用的, 其带宽资源分配包括授权大小和授权调度两方面, 授权大小是指时隙资源分配, 授权调度是指波长调度。因此, 在进行如上节所述的时隙资源分配后, 下面将重点考虑波长调度。为此, 这里设计一种高效的负载均衡波长调度机制, 以提高波长调度时波长资源的利用率。引入布尔变量 e_{ij} 表示TWDM-PON中第 j 条波长 λ_j 与ONU $_i$ 之间的关系, 当ONU $_i$ 在 λ_j 上进行数据传输时, $e_{ij} = 1$; 反之, $e_{ij} = 0$ 。因此, 在 λ_j 上传输数据需满足以下约束条件:

(1) 波长数小于ONU总数, 如式(17)

$$M < N \quad (17)$$

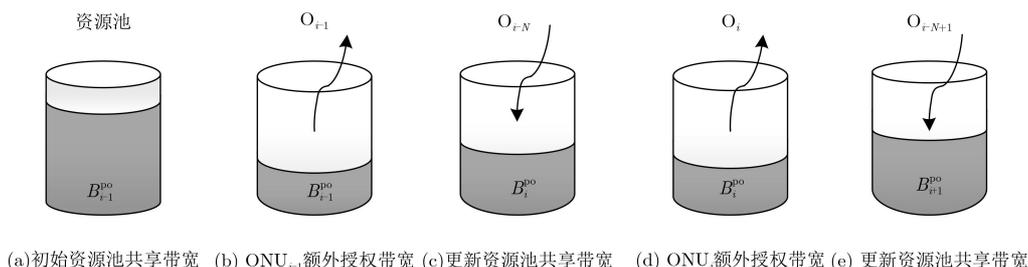
(2) 在相同时刻, ONU $_i$ 的数据不能在大于或等于两条波上传输, 如式(18)

$$e_{ij_m} e_{ij_n} = 0, \text{ s.t. } j_m \in M, j_n \in M, j_m \neq j_n, i \in N \quad (18)$$

(3) 在相同时刻, 1条波长上只可传输1个ONU的数据, 如式(19)

$$e_{i_m j} e_{i_n j} = 0, \text{ s.t. } i_m \in N, i_n \in N, i_m \neq i_n, j \in M \quad (19)$$

为尽早将ONU数据上传到波长上进行传输, 在波长选择时常采用最早可用原则。但不同的ONU上传顺序对波长利用情况有着不同的影响。因此采



(a)初始资源池共享带宽 (b) ONU $_{i-1}$ 额外授权带宽 (c)更新资源池共享带宽 (d) ONU $_i$ 额外授权带宽 (e)更新资源池共享带宽

图4 基于资源池共享带宽

用负载均衡波长调度机制对相同周期相同ONU数据块进行传输,如图5所示。此时被授予的每个ONU数据块大小虽不相同,但都在基于最小保证带宽的基础上,可保证每个ONU数据块大小相差不至于过于悬殊,有利于负载均衡的实现。假设共有12个ONU数据块,将其按照数据块大小升序排列,同样采取波长最早可用原则依次向波长 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_w$ 上传输,1轮传输完成后,ONU数据块倒序向波长 $\lambda_w, \dots, \lambda_2, \lambda_1$ 上传输,此过程循环往复至本周期 $T_{\text{cycle}}(n)$ ONU数据块传输完毕。此时,本周期每条波长上ONU数据块所占信道资源较为均衡,产生的周期空闲时隙较小,提高了波长资源的利用效率。

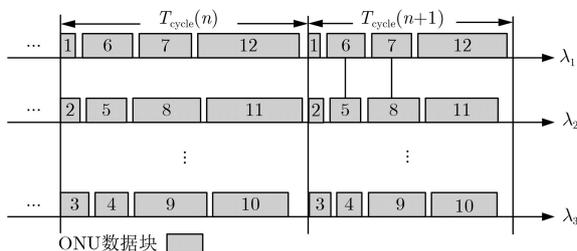


图5 基于ONU数据块大小的波长调度

5 仿真分析

5.1 仿真性能指标

定义1 平均包时延,即给定网络环境下,数据业务从到达ONU起至抵达OLT时经历的端到端时延。

定义2 上行信道利用率,即单位时间内用来传送有效数据的带宽占总信道的百分比。

5.2 仿真环境设定

本文所提RABP策略的对比策略为文献[9]中的基于软件定义的SD-DBO策略、文献[10]中的GRAP策略以及将所提策略中预测模型去除后的RABP-NP策略。SD-DBO基于SDN技术实现了全局资源集中控制,提高了信道利用率,但没有考虑周期空闲时隙引起的资源浪费。GRAP策略运用模糊神经网络模型避免了SDN控制器与OLT间的信息交互时延对网络性能的影响,在OLT内对周期存在的空闲时隙加以利用,在一定程度上减小了资源浪费。仿真拓扑采用图6所示SDOAN拓扑结构,SDN控制器通过OpenFlow协议与4个OLT相连接,设每个OLT中工作波长数目为 $M=2$,且每条波长传输速率相等,都为1 Gbps,每个OLT支持的ONU数目为 $N=64$;SDOAN中控制器与OLT的距离为5 km,ONU到OLT的传输距离设为40 km;数据传输时,用户数据包的到达率服从泊松分布,

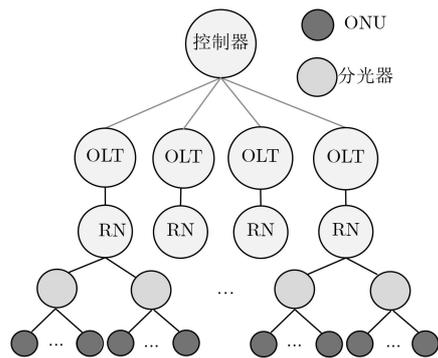


图6 网络拓扑

其大小满足均匀分布,其字节大小处于64 Byte到1518 Byte之间;轮询周期最大为2 ms^[13],ONU保护时隙为1 μs ^[14],动态带宽分配运行时长为10 μs ^[5]。SDN控制器与OLT交互时流表更新的响应时间为200 ms^[15]。

5.3 仿真结果与分析

图7表示波长数 $M=4$ 时,SD-DBO,GRAP,RABP-NP和RABP 4种策略平均包时延随负载的变化情况。由图7可见,4种策略的平均包时延随负载的增加而增大,且负载较低时增长较为缓慢。当负载大于0.6时,RABP-NP策略的平均包时延急剧增大,而在其他3种策略中,当负载大于0.8时其平均包时延才呈现急剧增大的趋势。这是因为SD-DBO,GRAP和RABP策略结合神经网络预测模型和SDN技术,提前计算下一时刻分配的带宽资源,从而延缓平均包时延急剧增大的负载点。此外,RABP策略平均包时延最小,较SD-DBO策略平均降低了29.8%,较GRAP降低了19.2%。因RABP策略较SD-DBO策略采用粒子群优化的BP神经网络预测机制,避免了SDN控制器与OLT交互时延对OLT控制实时性的影响,从而降低了平均包时延。与对比策略GRAP相比,通过设置滑动周期减小了周期空闲时隙,此外,资源池共享带宽的引入使得ONU间可以共享资源,缩短了数据包传输的等待时间,因此降低了平均包时延。

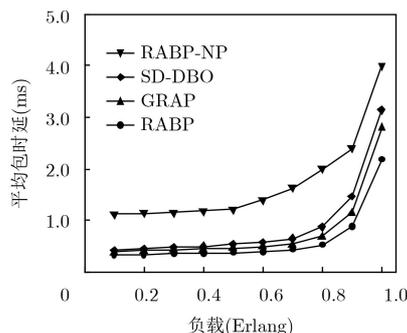


图7 不同策略下平均包时延

图8表示不同波长数下，RABP策略平均包时延随负载的变化情况。由图8可见，随着负载增加，RABP的平均包时延也增大。负载越高，在每条波长上传输的数据包也越多，造成数据包传输的等待时间增加，进而引起平均包时延持续增加。从图8可以看出，当波长数 M 为2时，在负载大于0.8后平均包时延呈现急剧增加的趋势。这是因为负载过大时，网络中没有充足的带宽资源，能够承载的数据包数量有限，导致数据在缓存中排队等待的时间增加。此外，当负载相同时，波长数与平均包时延成反比，即波长数越大，对应的平均包时延反而更低。因为波长数越大，网络中可用的资源也越充足，使得数据能够尽早地被传输，所以降低了平均包时延。

图9表示波长 $M=4$ ，SD-DBO，GRAP，RABP-NP和RABP 4种策略的信道利用率随负载变化的情况。由图9可见，随着负载增加，信道利用率逐渐增大并在负载较高时趋于饱和。在低负载时，RABP-NP策略的信道利用率与其余策略大致相同，但随着负载增加，RABP-NP的信道利用率远低于其他3种策略。这是因为负载增加，网络中可用带宽资源急剧下降，此时若不采用预测机制避免控制器与OLT之间的信息时延交互问题，将使得业务不能及时分配到足够的带宽资源，从而导致信道利用率低。与此同时，RABP策略信道利用率较SD-DBO平均提高了20.7%，较GRAP平均提高了

12.4%。因为RABP策略较SD-DBO策略，通过集中控制实现OLT间资源共享，避免OLT间资源分配不合理造成信道资源浪费的情况。RABP较GRAP策略，利用滑动周期减小周期期间空闲时隙的产生并且实时统计资源池共享带宽，使资源得以充分利用，此外，RABP策略采用基于ONU数据块大小的波长调度机制，从而提高了信道资源的利用率。

图10表示在不同波长数 $M=2, 4, 8$ 下，RABP策略信道资源利用率随负载的变化情况。由图10可见，不同波长数下，RABP策略信道资源利用率随负载的增加而增大。因为随着负载的增大，越来越少的波长处于空闲状态，信道利用率均会增长。但当波长数为2时，在负载大于0.8后，信道利用率增长趋势缓慢，并趋于平稳，因为此时上行信道总容量接近饱和。波长 $M=4, 8$ 时，负载大于0.8时上行信道资源利用率持续增长，但信道资源利用率较低，因波长数越大，信道资源总容量越大，同等负载下信道空闲资源越多，信道资源利用率越低，且系统总容量越大，同等网络状态下随负载增加达到饱和值越慢，因此当负载大于0.8时，随负载增加上行信道资源仍继续增长。

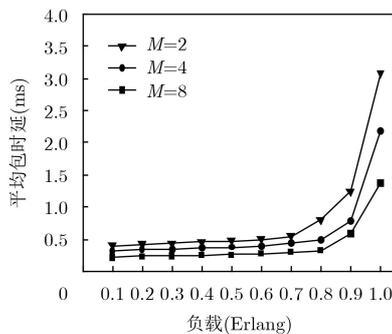


图8 不同波长数RABP的平均包时延

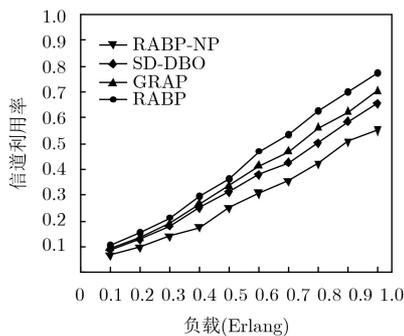


图9 不同策略下上行信道资源利用率图

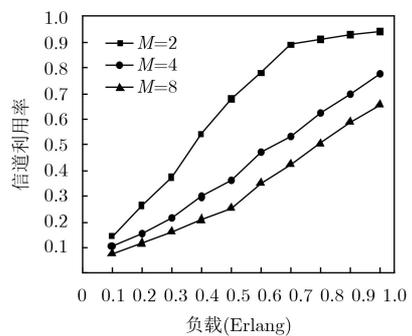


图10 不同波长数下上行信道资源利用率

6 结束语

针对下一代无源光网络TWDM-PON中多个OLT之间带宽资源缺乏集中调度，不同ONU之间时隙波长资源需要协同优化等问题，本文基于软件定义光接入网架构，提出一种基于带宽预测的资源分配策略。在OLT间，设计粒子群优化的BP神经网络模型提前预测OLT的资源请求情况，避免SDN控制器与OLT在资源配置过程中，交互时延对OLT控制实时性的影响；其次，在OLT内，针对TWDM-PON周期期间空闲时隙引起的带宽资源浪费问题，基于ONU的轮询时间，动态设置滑动周期并基于光网络单元的授权信息对资源池共享带宽进行实时统计，最大化利用时隙资源。同时，在波长调度过程中，设计负载均衡的波长调度机制，以

实现多波长的高效利用。仿真结果表明,所提策略不仅有效地避免多TWDM-PON之间的资源浪费,提高了信道资源的利用率,还降低了平均包时延。

参考文献

- [1] CHEN Yuanxiang, LI Juhao, ZHU Paikun, *et al.* Demonstration of flexible multicasting and aggregation functionality for TWDM-PON[J]. *Optics Communications*, 2017, 392: 202–207. doi: [10.1016/j.optcom.2017.02.006](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.02.006).
 - [2] KANONAKIS K and OMKOS I. Improving the efficiency of online upstream scheduling and wavelength assignment in hybrid WDM/TDMA EPON networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(6): 838–848. doi: [10.1109/JSAC.2010.100809](https://doi.org/10.1109/JSAC.2010.100809).
 - [3] XIA Weidong, GAN Chaoqin, XIE Weilun, *et al.* Priority-rotating DBA with adaptive load balance for reconfigurable WDM/TDM PON[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 26: 142–149. doi: [10.1016/j.yofte.2015.10.002](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.10.002).
 - [4] SHUAI Qianjun and ANSARI N. Scheduling hybrid WDM/TDM EPONs with heterogeneous propagation delays[C]. 2014 IEEE International Conference on Communications, Sydney, Australia, 2014: 3877–3882. doi: [10.1109/ICC.2014.6883926](https://doi.org/10.1109/ICC.2014.6883926).
 - [5] 熊余, 唐剑波, 张鸿, 等. TWDM-PON中用户行为感知的动态资源分配策略[J]. 电子学报, 2016, 44(2): 398–404. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2016.02.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2016.02.022).
XIONG Yu, TANG Jianbo, ZHANG Hong, *et al.* User-behavior aware dynamic resource allocation strategy in TWDM-PON[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(2): 398–404. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2016.02.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2016.02.022).
 - [6] 熊余, 蒋婧, 张振振, 等. TWDM-PON中带有业务区分的混合资源调度算法[J]. 电子学报, 2017, 45(6): 1490–1497. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.06.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.06.030).
XIONG Yu, JIANG Jing, ZHANG Zhenzhen, *et al.* Hybrid resource scheduling algorithm with traffic differentiation in TWDM-PON[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(6): 1490–1497. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.06.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.06.030).
 - [7] ZHANG Shizong, GU Rentao, JI Yuefeng, *et al.* Efficient traffic grooming with dynamic ONU grouping for multiple-OLT-based access network[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 26: 220–228. doi: [10.1016/j.yofte.2015.09.009](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.09.009).
 - [8] YANG Hui, ZHANG Jie, Zhao Yongli, *et al.* Experimental demonstration of remote unified control for OpenFlow-based software-defined optical access networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2016, 31(3): 568–577. doi: [10.1007/s11107-015-0547-6](https://doi.org/10.1007/s11107-015-0547-6).
 - [9] ZHAO Yongli, YAN Boyuan, WU Jialin, *et al.* Software-defined dynamic bandwidth optimization (SD-DBO) algorithm for optical access and aggregation networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2016, 31(2): 251–258. doi: [10.1007/s11107-015-0540-0](https://doi.org/10.1007/s11107-015-0540-0).
 - [10] 熊余, 张振振, 师劲, 等. TWDM-PON中软件定义控制的全局资源分配机制[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2017, 44(5): 140–146. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2017.05.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2017.05.024).
XIONG Yu, ZHANG Zhenzhen, SHI Jin, *et al.* Global resource allocation mechanism based on software-defined of TWDM-PON[J]. *Journal of Xidian University*, 2017, 44(5): 140–146. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2017.05.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2017.05.024).
 - [11] GU Rentao, JI Yuefeng, WEI Pei, *et al.* Software defined flexible and efficient passive optical networks for intradatacenter communications[J]. *Optical Switching and Networking*, 2014, 14: 289–302. doi: [10.1016/j.osn.2014.05.015](https://doi.org/10.1016/j.osn.2014.05.015).
 - [12] DASHORA G and AWWAL P. Adaptive particle swarm optimization employing fuzzy logic[C]. International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering, Jaipur, 2016: 1–4.
 - [13] XIONG Yu, SUN Peng, LIU Chuanbo, *et al.* Traffic-aware energy saving scheme with modularization supporting in TWDM-PON[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 33: 7–15. doi: [10.1016/j.yofte.2016.09.011](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2016.09.011).
 - [14] LI Ling, ZHANG Lincong, and ZHANG Wenbo. High-priority assignment first dynamic wavelength and bandwidth allocation algorithm in TWDM-PON[C]. The 16th International Conference on Optical Communications and Networks, Wuzhen, China, 2017: 1–3. doi: [10.1109/ICOCN.2017.8121515](https://doi.org/10.1109/ICOCN.2017.8121515).
 - [15] LIU Weijie, BOBBA R B, MOHAN S, *et al.* Inter-flow consistency: A novel SDN update abstraction for supporting inter-flow constraints[C]. 2015 IEEE Conference on Communications and Network Security, Florence, Italy, 2015: 469–478.
- 熊余: 男, 1982年生, 研究员, 博士, 研究方向为宽带网络的服务质量控制、绿色节能技术及可靠性抗毁技术。
杨娅娅: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为基于时分波分复用的下一代无源网络资源分配算法。
张振振: 男, 1988年生, 硕士生, 研究方向为基于时分波分复用的下一代无源网络资源分配策略。
蒋婧: 女, 1988年生, 硕士生, 研究方向为基于时分波分复用的下一代无源网络资源调度算法。