

# TWDM-PON 中带有业务区分的 混合资源调度算法

熊 余<sup>1</sup>, 蒋 婧<sup>1,2</sup>, 张振振<sup>1</sup>, 彭海英<sup>1</sup>, 王汝言<sup>1</sup>

(1. 重庆邮电大学光通信与网络重点实验室, 重庆 400065; 2. 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长距离和广覆盖特性带来往返时延增大, 造成高优先级业务时延性能严重恶化的问题, 提出带有业务区分的混合资源调度算法. 根据网络负载实时调整光网络单元组的波长数以实现资源共享, 并动态划分子周期以对不同优先级业务进行区分服务; 设计混合资源调度算法, 以在线方式填充波长空隙, 以离线方式保障资源高效调度. 仿真结果表明, 所提算法能够满足不同优先级业务的时延要求, 保证服务质量, 并提高信道利用率.

**关键词:** 时分波分复用无源光网络; 混合资源调度; 业务区分; 服务质量

**中图分类号:** TN929.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2017)06-1490-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.06.030

## Hybrid Resource Scheduling Algorithm with Traffic Differentiation in TWDM-PON

XIONG Yu, JIANG Jing, ZHANG Zhen-zhen, PENG Hai-ying, WANG Ru-yan

(1. Key Laboratory of Optical Communication and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;  
2. State Grid Chongqing Maintenance Company, Chongqing 400039, China)

**Abstract:** The characteristics of long reach and wide coverage in time and wavelength division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) increase the round trip time, resulting in the severe deterioration of the delay performance of high priority traffic. This paper proposes a hybrid resource scheduling algorithm with traffic differentiation to solve this issue. Firstly, the wavelengths of ONU (Optical Network Unit) groups are realtimely adjusted to achieve resource sharing in accordance with the network load, and traffic sub-cycles are dynamically divided for the purpose of differentiated traffic. Furthermore, we respectively exploit the online and offline scheduling to fill the wavelength voids and ensure the efficiency of resources scheduling. Finally, the simulation results show that the proposed algorithm can satisfy the delay requirements of different priority traffic, guarantee the quality of service and improve the channel utilization ratio.

**Key words:** TWDM-PON; hybrid resource scheduling; traffic differentiation; quality of service

## 1 引言

时分波分复用无源光网络 (Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network, TWDM-PON) 具有低成本、大容量和广覆盖的特性, 成为下一代无源光网络 (Next Generation PON, NG-PON) 的主流解决方案<sup>[1]</sup>. 而资源调度对 TWDM-PON 的传输性能至关重要. 在资源调度过程中, 为避免不同光网络单元 (Op-

tical Network Unit, ONU) 之间的上行传输冲突, 光线路终端 (Optical Line Terminal, OLT) 基于多点控制协议 (Multi-Point Control Protocol, MPCP) 与各个 ONU 进行信息交互<sup>[2]</sup>, 但往返时延 (Round Trip Time, RTT) 的存在会导致上行信道经常处于空闲状态, 造成时延大且信道利用率低. 因而, 如何高效地实现资源调度, 提高信道利用率的同时又保证不同业务的服务质量 (Quality of Service, QoS), 将成为研究资源调度算法的热点.

收稿日期: 2015-08-14; 修回日期: 2016-12-06; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61401052), 重庆市教委科学技术研究项目 (No. KJ1400418, No. KJ1500445), 重庆邮电大学博士启动基金 (No. A2015-09)

根据授权方式的不同, TWDM-PON 资源调度可分为在线调度和离线调度<sup>[3]</sup>. 在线调度是 OLT 收到 ONU 的请求后立即执行调度, 如文献[4]基于 RTT 值对 ONU 进行调度, 使距离 OLT 较近的 ONU 优先传输数据. 文献[5]采用在线方式对波长空隙进行高效填充以减小闲置时间对传输性能的影响. 在线调度降低了排队时延, 但由于资源调度的公平性较差, 对于 TWDM-PON 的多波长传输, 信道利用率不高<sup>[6]</sup>. 而离线调度是 OLT 收到部分或所有 ONU 的请求后执行调度, 如文献[7]收集轻负载 ONU 的剩余带宽, 并高效地分配给重负载 ONU 以提高信道利用率. 文献[8]采用集中授权方式, 通过变更调度顺序, 减小波长空隙对信道利用率的影响. 离线调度挖掘了多波长的优势, 但由于要等待所有 ONU 的请求到达 OLT 才进行调度, 且直到 ONU 收到 OLT 的授权才开始发送数据, 会导致闲置时间的产生, 造成带宽浪费且增加时延. 而 TWDM-PON 的覆盖范围从传统的 20km 扩展到 100km 甚至更远, 时延将变得更大<sup>[9]</sup>. 为充分发挥上述两种调度的优势, 可引入在线-离线混合调度, 即 OLT 基于部分(而非全部)ONU 的请求进行调度, 如文献[10]提出在线实时调度(Just In Time, JIT), OLT 基于波长可用时刻对已发送请求并添加到资源池中的 ONU 进行调度. 文献[11]基于 JIT 调度提出改进的稳定匹配算法, 使数据在特定波长的特定时隙上传输. 混合调度降低了时延且提高信道利用率, 但未考虑不同优先级业务的 QoS. 文献[12,13]提出基于业务优先级的资源调度算法以满足各种业务的 QoS 要求, 但未能有效利用混合调度的优势.

TWDM-PON 的接入用户数多, 业务呈多样化趋势, 且不同优先级业务具有不同的 QoS 需求; 同时, 多级分光的长距离传输结构使得信息交互的往返时延增大, 对资源的高效利用带来新的挑战. 因此, 提出带有业务区分的混合资源调度算法(Hybrid Resource Scheduling Algorithm with Traffic Differentiation, HRSA-TD), 即实时分析网络负载与系统带宽容量之间关系, 自适应调整 ONU 组的波长数以实现资源共享; 同时, 根据业务带宽授予量, 将周期动态划分为两个子周期, 使高优先级业务优先传输, 以满足 ONU 端多业务的 QoS 要求. 通过在线填充波长空隙, 解决信息交互过程产生的资源浪费问题, 并保证高优先级业务的时延性能; 最后, 根据额外带宽请求的权重因子, 采用离线调度对剩余带宽进行有效分配以保证低优先级业务的带宽需求, 并实现信道的最大化利用.

## 2 问题描述

TWDM-PON 是基于 MPCP 进行数据传输, 如图 1 所示. 数据在“请求-授予”过程中, 不可避免地产生波

长空隙. 而其长距离广覆盖特性将使空隙进一步增加, 造成带宽浪费, 这在资源调度过程中已不容忽视. 此外, TWDM-PON 的多波长特性可使数据在任意波长上传输, 但频繁的波长转换会增加网络开销. 为此, 基于 RTT 对 ONU 分组可一定程度上避免空隙产生; 同时, 动态调整各 ONU 组的波长数以实现资源共享.

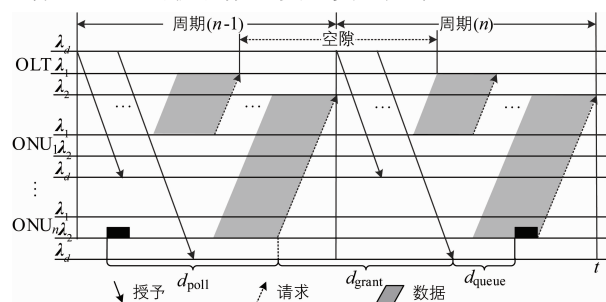


图1 TWDM-PON数据传输过程

TWDM-PON 数据包端到端时延由轮询时延、授予时延和排队时延组成<sup>[14]</sup>, 如式(1).

$$d = d_{poll} + d_{grant} + d_{queue} \quad (1)$$

其中,  $d_{poll}$  为数据包到达时刻与下一个请求发送时刻之间的时间间隔;  $d_{grant}$  为 ONU 发出请求与接收到下行授予之间的时间间隔;  $d_{queue}$  为数据包在 ONU 端的排队时延. 接入距离增大会引起  $d_{grant}$  增加, 使得 ONU 端缓存更多的数据, 将导致  $d_{poll}$  和  $d_{queue}$  增加, 进而增大传输时延. 特别地, TWDM-PON 作为 NG-PON2 主要的解决方案, 对高优先级业务需保证其低时延性能; 对低优先级业务需确保分配足够的带宽以传输数据. 为此, 根据不同优先级业务的带宽授予量动态划分子周期, 实现对不同优先级业务区分服务.

上述机制实现了不同业务的高效传输, 一定程度上可避免空隙的产生. 然而, 在实际网络部署过程中, 不同 ONU 与 OLT 之间的距离不同, 会导致 RTT 差异更大, 无法完全避免空隙的产生. 因而, 为弥补上述缺陷并结合在线调度低时延的优势, 进行在线填充波长空隙, 保证高优先级业务时延, 并提高信道利用率.

在线调度虽具有时延小的优势, 但未基于全局信息实现信道的统计复用, 使高优先级业务有可能比低优先级业务占更多的机会发送数据, 引起不公平地资源调度. 此外, 当网络处于重负载时, 在线调度还会引起网络拥塞进而导致数据包丢失. 为此, 根据低优先级业务的带宽请求进行离线剩余带宽分配, 满足不同业务的带宽需求并提高信道利用率.

## 3 算法描述

HRSA-TD 的基本思想为: 基于网络负载实时调整各 ONU 组波长数, 以实现资源共享; 通过动态划分子周期, 保证用户对 QoS 的差异化需求; 计算往返时延引起

的波长空隙,并在线补偿浪费带宽以提高信道利用率;以离线方式进行剩余带宽分配,实现公平地资源调度.为描述所提算法,定义如表 1 所示参数:

表 1 变量定义表

符号	意义
$N$	ONU 总数
$M$	波长总数
$K$	ONU 组数
$R_k^i$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的请求带宽
$R_{k,EF}^i$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的 EF 业务请求带宽
$R_{k,AF}^i$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的 AF 业务请求带宽
$R_{k,BE}^i$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的 BE 业务请求带宽
$R_{k,AF}^{i,ex}$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的 AF 业务额外请求带宽
$R_{k,BE}^{i,ex}$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的 BE 业务额外请求带宽
$G_{k,EF}^i$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的 EF 业务授权带宽
$G_{k,AF}^i$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的 AF 业务授权带宽
$G_{k,BE}^i$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的 BE 业务授权带宽
$G_{k,AF}^{i,ex}$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的 AF 业务首次授权带宽
$G_{k,BE}^{i,ex}$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的 BE 业务首次授权带宽
$G_{k,AF/BE}^{i,ex}$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的 AF/BE 业务总额外授权带宽
$B_{k,m}^{max}$	ONU 组的最大传输容量
$B_{k,m}^i$	最小保证带宽
$B_{k,m,AF/BE}^i$	AF/BE 子周期最小保证带宽
$B_{k,m}^{total,ex}$	AF/BE 子周期总剩余带宽
$t$	REPORT 帧到达 OLT 端的时间
$RTT_i$	OLT 与 ONU <sub><i>i</i></sub> 之间的往返时延
$t_{k,EF}^i$	ONU <sub><i>i</i></sub> 的 EF 业务传输时间
$\lambda_{k,j}$	第 $j$ 条波长
$C_{k,j}^y$	波长 $j$ 上第 $y$ 个调度起始时刻
$D_{k,j}^y$	波长 $j$ 上第 $y$ 个调度结束时刻
$F_{k,j}$	波长 $j$ 上最后一个调度结束时刻
$\Delta_{k,j}$	波长 $j$ 的空隙大小
$v_{k,j}$	波长空隙集合
$\lambda_{k,j}^{ef}$	最早可用波长
$\lambda_{k,j}^{vf}$	最早可用波长空隙
$Y_{k,j}^{ef}$	波长最早可用的调度顺序
$Y_{k,j}^{vf}$	波长空隙填充的调度顺序

### 3.1 基于 ONU 分组的波长调度机制

假设 TWDM-PON 中有  $N$  个 ONU,  $M$  条波长 ( $M \leq N$ ). OLT 按 RTT 从小到大对所有 ONU 排序形成集合  $\{ONU_1, ONU_2, \dots, ONU_N\}$ , 并将集合划分为  $K$  ( $1 \leq K \leq M$ ) 组. 前  $Z$  ( $Z = N \bmod K$ ) 个 ONU 组含有  $n + 1$

( $\lceil N/K \rceil$ ) 个 ONU, 第  $K-Z$  个 ONU 组含有  $n$  ( $\lfloor N/K \rfloor$ ) 个 ONU, 且每组分配  $m$  ( $M = K \times m$ ) 条波长. 设定每组的组内共享波长为  $\{\lambda_{k,1}, \lambda_{k,2}, \dots, \lambda_{k,m-1}\}$ , 只能传输该 ONU 组的数据; 同时, 每组存在组间共享波长  $\lambda_{k,m}$ , 可动态服务于任意 ONU 组, 如图 2 所示.

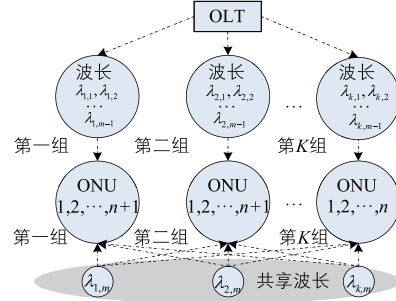


图2 基于ONU分组的波长分配机制

**定义 1** ONU 组的最大传输容量  $B_{k,m}^{max}$ , 即根据 ONU 组内的波长数, 确定周期  $T_{cycle}$  内  $m$  条波长的最大传输容量, 如式(2).

$$B_{k,m}^{max} = [T_{cycle} - 2n \times t_g] \times m \times R \quad (2)$$

其中,  $R$  表示波长传输速率,  $t_g$  表示 ONU 间的保护时隙. 如果业务服务商与用户之间定义的服务等级相同, 那么每个 ONU 的最小保证带宽为  $B_{k,m}^i$ , 如式(3).

$$B_{k,m}^i = \frac{[T_{cycle} - 2n \times t_g] \times m \times R}{n} \quad (3)$$

假设第  $k$  个 ONU 组任意 ONU 的带宽请求为  $R_k^i$ , 那么该 ONU 组总带宽请求为  $\sum_{i=1}^n R_k^i$ . 而 ONU 组的波长数与其带宽请求密切相关, 分为以下三种情况.

(1) 如果  $m - 1$  条波长提供的最大传输容量满足  $\sum_{i=1}^n R_k^i \leq B_{k,m-1}^{max}$ , 那么组内的  $m - 1$  条波长即可满足数据的传输, 即 ONU 组波长为  $\lambda_{k,1}, \lambda_{k,2}, \dots, \lambda_{k,m-1}$ .

(2) 如果  $m - 1$  条波长与  $m$  条波长提供的最大传输容量满足  $B_{k,m-1}^{max} < \sum_{i=1}^n R_k^i \leq B_{k,m}^{max}$ , 那么该组所有波长均处于工作状态, 即 ONU 组波长为  $\lambda_{k,1}, \lambda_{k,2}, \dots, \lambda_{k,m-1}, \lambda_{k,m}$ .

(3) 如果  $m$  条波长提供的最大传输容量满足  $B_{k,m}^{max} < \sum_{i=1}^n R_k^i$ , 那么该组所有波长均处于工作状态, 且还需调度其他 ONU 组的共享波长, 即 ONU 组波长为  $\lambda_{k,1}, \lambda_{k,2}, \dots, \lambda_{k,m-1}, \lambda_{k,m}, \lambda_{k',m}$ .

### 3.2 基于业务的动态子周期划分机制

波长调度机制有效解决了资源共享问题, 而 TWDM-PON 可承载优先级最高的加速转发业务 (Expedited Forwarding, EF)、优先级次之的保证转发业务 (Assured Forwarding, AF) 和优先级最低的尽力而为业务

(Best Effort, BE). 其中, EF 业务对时延性能敏感, 信息量小但服务质量要求高; AF 业务对时延不敏感但要求带宽保证; BE 业务对时延不敏感且不需要带宽保证. 针对上述三种业务特性, 将周期动态划分为 EF 子周期和 AF/BE 子周期, 如图 3 所示.

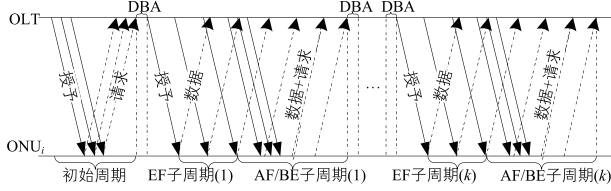


图3 基于业务的动态子周期划分机制

ONU<sub>i</sub> 发送带宽请求  $R_k^i$ , 包括  $R_{k,EF}^i$ 、 $R_{k,AF}^i$  和  $R_{k,BE}^i$ , 如式(4). OLT 根据 ONU<sub>i</sub> 的 EF 业务带宽请求量, 计算该子周期的授权带宽, 如式(5).

$$R_k^i = R_{k,EF}^i + R_{k,AF}^i + R_{k,BE}^i \quad (4)$$

$$G_{k,EF}^i = \min(R_{k,EF}^i, B_{k,m}^i) \quad (5)$$

**定义 2** 业务子周期大小  $T_{EF}$  和  $T_{AF/BE}$ , 即发送 EF 业务和 AF/BE 业务的时间. OLT 根据 EF 业务的授权带宽确定该子周期大小, 如式(6), 并计算 AF/BE 子周期大小, 如式(7).

$$T_{EF} = \frac{1}{M} \left( \frac{1}{R} \left( \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n G_{k,EF}^i \right) + N \times t_g \right) \quad (6)$$

$$T_{AF/BE} = T_{cycle} - T_{EF} \quad (7)$$

动态子周期划分使得 EF 子周期和 AF/BE 子周期交替传输数据, 保证了 EF 业务不受 AF 与 BE 业务的影响; 同时, EF 子周期在 AF/BE 子周期之前, 使得 EF 业务都在 AF/BE 业务之前传输, 保证 EF 业务低时延特性, 并充分利用了周期内的闲置带宽, 提高了信道利用率. 而当所有 ONU 的 EF 业务传输完成后, EF 子周期到此结束, 进入 AF/BE 子周期.

### 3.3 基于空闲时隙的在线填充机制

子周期的划分保证了不同业务的 QoS, 但信息交互过程产生的波长空隙会引起带宽浪费; 同时, 在线调度还具有低时延的优势. 因而, EF 子周期采用在线调度, 即 OLT 收到 ONU<sub>i</sub> 的请求后, 立即计算并发送该子周期的授权大小和授权调度. ONU<sub>i</sub> 收到下行授予后, 发送缓存中的 EF 业务数据, 但不附带传输 REPORT 帧; 同时, 在线填充波长空隙, 以避免带宽浪费. 假设在  $t$  时刻 REPORT 帧到达 OLT, OLT 首先查看在  $t$  时刻是否存在可用的波长或空隙波长; 若存在, 将进行 EF 业务的数据传输, 其调度方式如下.

(1) OLT 跟踪所有上行波长, 设定每条波长数据传输的起始时刻及结束时刻  $\{C_j^y, D_j^y\}$ , 并按式(8)计算波长  $\lambda_{k,j}$  空隙大小  $\Delta_{k,j}$ .

$$\Delta_{k,j} = \min \left\{ \begin{aligned} & \left( C_{k,j}^{y+1} - \frac{RTT_i}{2} \right) - D_{k,j}^y \\ & \left( C_{k,j}^{y+1} - \frac{RTT_i}{2} \right) - \left( t + \frac{RTT_i}{2} + t_c \right) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

其中,  $t_c$  为传输 REPORT 帧或 GATE 帧的时间,  $\left( C_{k,j}^{y+1} - \frac{RTT_i}{2} \right) - D_{k,j}^y$  为波长  $\lambda_{k,j}$  第  $y+1$  个调度的起始时刻与第  $y$  个调度的结束时刻的时间间隔;  $\left( C_{k,j}^{y+1} - \frac{RTT_i}{2} \right) - \left( t + \frac{RTT_i}{2} + t_c \right)$  为波长  $\lambda_{k,j}$  第  $y+1$  个调度的起始时刻与 ONU<sub>i</sub> 接收完 GATE 帧的时间间隔. 选择上述两个时间差中的较小值, 作为波长  $\lambda_{k,j}$  的空隙大小.

(2) OLT 通过式(5)计算 EF 业务授权带宽, 并确定 EF 业务传输时间, 如式(9).

$$t_{k,EF}^i = \frac{G_{k,EF}^i}{R} \quad (9)$$

(3) OLT 比较波长空隙与传输 EF 业务时间之间的关系: 如果满足  $\Delta_{k,j} \geq t_{k,EF}^i + t_g$ , 那么此空隙为合法空隙, 可进行在线填充调度; 反之, 为非法空隙.

$$v_j = \{j \mid \Delta_{k,j} \geq t_{k,EF}^i + t_g\} \quad (10)$$

(4) OLT 计算最早可用合法空隙的波长和最早可用波长, 如式(11)和(12); 比较两者的最早可用时刻, 并选择较小值作为传输 EF 业务的波长, 如式(13). 如果最早可用的合法空隙波长  $\lambda_{k,j}^{vf}$  空闲时刻早于最早可用波长  $\lambda_{k,j}^{eff}$ , 那么选择  $\lambda_{k,j}^{vf}$  作为传输波长, 如图 4(a); 反之, 选择  $\lambda_{k,j}^{eff}$  作为传输波长, 如图 4(b).

$$\lambda_{k,j}^{vf} = \arg \min_{(k,j)} (D_{k,j}^y \mid D_{k,j}^y \in v_{k,j}) \quad (11)$$

$$\lambda_{k,j}^{eff} = \arg \min_{(k,j)} (F_{k,j}) \quad (12)$$

$$\lambda_{k,j} = \min(\lambda_{k,j}^{vf}, \lambda_{k,j}^{eff}) \quad (13)$$

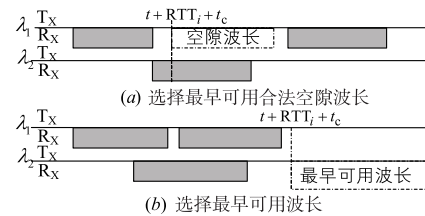


图4 基于空闲时隙的在线波长选择

(5) OLT 如果选择最早可用波长作为 EF 子周期的传输波长, 那么按式(14)在第  $y+1$  个调度上传输 EF 业务数据; 反之, 按式(15)在第  $y+1$  个调度上传输 EF 业务数据.

$$Y_{k,j}^{eff} = \arg \max_y (D_{k,j}^y) + 1 \quad (14)$$

$$Y_{k,j}^{vf} = \arg \min_y (D_{k,j}^y) + 1, D_{k,j}^y \in v_{k,j} \quad (15)$$

### 3.4 基于权重因子的离线剩余带宽分配机制

在线填充有效保证 EF 业务的服务质量, 但未基于

全局信息实现信道的高效利用. 因而, 为实现信道利用最大化, AF/BE 子周期可采用离线调度, 即 OLT 收到所有 ONU 的请求后, 统一进行资源调度并发送下行授予. ONU 收到下行授予后, 发送 AF 和 BE 业务数据, 并附带传输 REPORT 帧, 向下一个周期提出带宽申请. 在 EF 子周期的完成数据传输后, OLT 重新计算  $ONU_i$  的最小保证带宽如式(16):

$$B_{k,m,AF/BE}^i = \frac{[T_{AF/BE} - n \times t_g] \times m \times R}{n} \quad (16)$$

如果 AF/BE 子周期低优先级业务的带宽请求量满足  $\sum_{i=1}^n (R_{k,AF}^i + R_{k,BE}^i) \leq \sum_{i=1}^n B_{k,m,AF/BE}^i$ , 表示网络为轻负载, 所有带宽请求均能得到满足. 算法基于波长最早可用原则为  $ONU_i$  按需分配带宽, 如式(17).

$$\begin{cases} G_{k,AF}^i = R_{k,AF}^i \\ G_{k,BE}^i = R_{k,BE}^i \end{cases} \quad (17)$$

如果 AF/BE 子周期低优先级业务的带宽请求量满足  $\sum_{i=1}^n (R_{k,AF}^i + R_{k,BE}^i) > \sum_{i=1}^n B_{k,m,AF/BE}^i$ , 表示网络处于重负载, 算法将根据 ONU 的带宽请求量分两类进行处理. 如果  $R_{k,AF}^i + R_{k,BE}^i \leq B_{k,m,AF/BE}^i$ , 表示为轻负载 ONU, 其授权带宽也为式(17). 此时, OLT 按式(18)计算轻负载 ONU 的剩余带宽.

$$B_{k,m}^{\text{total},ex} = \sum_{i=1}^n (B_{k,m,AF/BE}^i - R_{k,AF}^i - R_{k,BE}^i) \quad (18)$$

如果  $R_{k,AF}^i + R_{k,BE}^i > B_{k,m,AF/BE}^i$ , 表示为重负载 ONU, 将根据业务优先级为 AF 和 BE 业务首次分配带宽, 如式(19).

$$\begin{cases} G_{k,AF}^{i'} = \min(R_{k,AF}^i, B_{k,m,AF/BE}^i) \\ G_{k,BE}^{i'} = B_{k,m,AF/BE}^i - G_{k,AF}^{i'} \end{cases} \quad (19)$$

OLT 计算重负载 ONU 的 AF 和 BE 业务额外带宽请求如式(20), 并按权重因子分配剩余带宽.

$$\begin{cases} R_{k,AF}^{i,ex} = R_{k,AF}^i - G_{k,AF}^{i'} \\ R_{k,BE}^{i,ex} = R_{k,BE}^i - G_{k,BE}^{i'} \end{cases} \quad (20)$$

**定义 3** 权重因子  $\omega_{k,AF/BE}^{i,ex}$ , 即在 AF/BE 子周期  $ONU_i$  的低优先级业务额外带宽请求量占该组总额外带宽请求量的比, 如式(21).

$$\omega_{k,AF/BE}^{i,ex} = \frac{R_{k,AF}^{i,ex} + R_{k,BE}^{i,ex}}{\sum_{i=1}^n (R_{k,AF}^{i,ex} + R_{k,BE}^{i,ex})} \quad (21)$$

$\omega_{k,AF/BE}^{i,ex}$  越大, 表明  $ONU_i$  的低优先级业务额外带宽请求越大; 反之, 表明越小. OLT 根据权重因子计算  $ONU_i$  在 AF/BE 子周期分配的带宽如式(22), 并为 AF 和 BE 业务再次分配授权带宽如式(23).

$$G_{k,AF/BE}^{i,ex} = B_{k,m}^{\text{total},ex} \times \omega_{k,AF/BE}^{i,ex} \quad (22)$$

$$\begin{cases} G_{k,AF}^i = G_{k,AF}^{i'} + G_{k,AF/BE}^{i,ex} \times \frac{R_{k,AF}^{i,ex}}{R_{k,AF}^{i,ex} + R_{k,BE}^{i,ex}} \\ G_{k,BE}^i = G_{k,BE}^{i'} + G_{k,AF/BE}^{i,ex} \times \frac{R_{k,BE}^{i,ex}}{R_{k,AF}^{i,ex} + R_{k,BE}^{i,ex}} \end{cases} \quad (23)$$

为更好地说明 HRSA-TD 算法, 下面采用伪代码的形式对算法进行简要说明, 如算法 1 所示.

#### 算法 1 HRSA-TD 算法伪代码

---

Input:  $R_{k,EF}^i, R_{k,AF}^i, R_{k,BE}^i$   
Output:  $G_{k,EF}^i, G_{k,AF}^i, G_{k,BE}^i$   
1:  $ONU \leftarrow \text{Sort}(ONU, \text{RTT})$   
2:  $ONU \leftarrow \text{Set}(ONU_1, ONU_2, \dots, ONU_N)$   
3: For  $1 \leq i \leq n$  do  
4: If  $\sum_{i=1}^n R_k^i \leq B_{k,m-1}^{\max}$  then  
5: 选择  $m-1$  ( $\lambda_{k,1}, \lambda_{k,2}, \dots, \lambda_{k,m-1}$ ) 条波长  
6: Else If  $B_{k,m-1}^{\max} < \sum_{i=1}^n R_k^i \leq B_{k,m}^{\max}$  then  
7: 选择  $m$  ( $\lambda_{k,1}, \lambda_{k,2}, \dots, \lambda_{k,m-1}, \lambda_{k,m}$ ) 条波长  
8: Else If  $B_{k,m}^{\max} < \sum_{i=1}^n R_k^i$  then  
9: 选择  $m+1$  ( $\lambda_{k,1}, \lambda_{k,2}, \dots, \lambda_{k,m-1}, \lambda_{k,m}, \lambda_{k,m+1}$ ) 条波长  
10: End If  
11: End If  
12:  $T_{EF}, T_{AF/BE} \leftarrow T_{\text{cycle}}$   
13: 根据式(6)和(7), 划分 EF 及 AF/BE 子周期  
14: If  $R_k^i \in \text{EF}$  then  
15: 执行式(8)、(9)和(10), 计算合法空隙  $\Delta_{k,j}$   
16: 执行式(13), 选择 EF 业务传输波长  
17: If  $\lambda_{k,j} = \lambda_{k,j}^{\text{eff}}$  then  
18: 执行式(14)  
19: Else If  $\lambda_{k,j} = \lambda_{k,j}^{\text{eff}}$  then  
20: 执行式(15)  
21: End If  
22: Else If 收到所有 AF/BE 业务的带宽请求 then  
23: If  $\sum_{i=1}^n (R_{k,AF}^i + R_{k,BE}^i) \leq \sum_{i=1}^n B_{k,m,AF/BE}^i$   
24: 执行式(17), 为 AF/BE 业务分配带宽  
25: Else If  $\sum_{i=1}^n (R_{k,AF}^i + R_{k,BE}^i) > \sum_{i=1}^n B_{k,m,AF/BE}^i$   
26: 执行式(23), 为 AF/BE 业务分配带宽  
27: End If  
28: End If  
29: End for

---

OLT 按 RTT 的升序对所有 ONU 排序, 并将其划分为  $K$  组; 同时, 比较 ONU 组请求带宽与最大传输容量的大小, 动态调整波长数(1 到 11 行). 然后, 将周期动态划分为 EF 子周期和 AF/BE 子周期(12 到 13

行). 如果  $ONU_i$  的请求为 EF 业务, 则为其选择传输波长, 并基于该波长计算数据传输位置 (14 到 21 行); 否则, OLT 收到所有 AF/BE 业务的带宽请求后, 基于权重因子进行离线剩余带宽分配 (22 到 29 行). 至此, 算法结束.

## 4 仿真分析

为更好地评估所提算法, 将 EFT-VF<sup>[5]</sup> 和 DWPBA-TCH<sup>[12]</sup> 作为 HRSA-TD 的对比算法. EFT-VF 基于波长最早可用原则, 在线填充波长空隙以提高信道利用率, 并实现数据的高效传输. DWPBA-TCH 引入固定和动态两个子周期以在线和离线的方式进行资源调度. 各类业务在固定波长子周期只能基于特定波长传输数据, 而动态波长子周期将根据业务优先级分配剩余带宽, 以实现资源共享.

### 4.1 仿真评价指标

**定义 3** 平均包时延  $T_{\text{delay}}$ , 给定网络环境下, 所有数据包从到达 ONU 缓存起至抵达 OLT 端经历的端到端时延之和与数据包的总个数之比<sup>[15,16]</sup>.

$$T_{\text{delay}} = \frac{\sum_{q=1}^{\text{num}} (t_{q,\text{receive}} - t_{q,\text{arrive}})}{\text{num}} \quad (24)$$

其中,  $t_{q,\text{arrive}}$  为第  $q$  个数据包到达 ONU 缓存的时刻;  $t_{q,\text{receive}}$  为 OLT 接收到第  $q$  个数据包最后一字节的时刻;  $t_{q,\text{receive}} - t_{q,\text{arrive}}$  为第  $q$  个数据包的端到端时延. 单位时间内, TWDM-PON 传输了 num 个数据包, 如果 num 个数据包的总时延为  $\sum_{q=1}^{\text{num}} (t_{q,\text{receive}} - t_{q,\text{arrive}})$ , 那么平均包时延为总时延与总数据包个数之比.

**定义 4** 上行信道利用率 (Channel Utilization Ratio, CUR), 单位时间内上行信道传输有效数据的带宽占总带宽的百分比<sup>[17]</sup>, 如式 (25).

$$\text{CUR} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n (G_{k,\text{EF}}^i + G_{k,\text{AF}}^i + G_{k,\text{BE}}^i)}{T_{\text{cycle}} \times M \times R} \quad (25)$$

其中,  $\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n (G_{k,\text{EF}}^i + G_{k,\text{AF}}^i + G_{k,\text{BE}}^i)$  为单位时间内数据传输的有效带宽;  $T_{\text{cycle}} \times M \times R$  为系统的总带宽.

### 4.2 仿真环境设定

采用 TWDM-PON 中典型的树型结构进行仿真, OLT 通过远端节点 (Remote Node, RN) 与 TDM 子网相连, 如图 5 所示. ONU 端的用户数据源分为 EF、AF 和 BE 三种不同优先级业务. 为模拟网络中真实的业务特性, EF 业务数据包到达率服从泊松分布, 大小固定为 70 字节; AF 和 BE 业务为具有自相似和长相关特性的突发数据源, 数据包大小服从 64 ~ 1518 字节的均匀分布<sup>[12]</sup>, 具体仿真参数设置如表 2 所示:

表 2 仿真参数表

参数	数值
OLT 个数	1
ONU 个数	128
ONU 组数	2
波长传输速率	1 Gbit/s <sup>[12]</sup>
周期	2 ms <sup>[12]</sup>
OLT 与 ONU 之间距离	20 ~ 100km <sup>[14]</sup>
保护时隙	1 $\mu$ s <sup>[12]</sup>
DBA 计算时间	10 $\mu$ s <sup>[18]</sup>
业务比例 EF:AF:BE	2:4:4 <sup>[12]</sup>
ONU 队列缓存大小	1 Mbytes <sup>[12]</sup>
REPORT 和 GATE 帧大小	64 bytes <sup>[12]</sup>

### 4.3 仿真结果分析

图 6 表示波长数  $M = 2, 4, 8$ , HRSA-TD 进行资源调度时, 负载对平均包时延的影响. 显然, 平均包时延随负载的增加均呈上升趋势. 当负载小于 0.5 时, 不同波长数下的平均包时延相差不大. 然而, 随着负载的继续增加, 在  $M = 2$  的网络中, 平均包时延最先急剧增大. 这是由于负载越大, ONU 的带宽请求越多; 而网络的带宽资源有限, 不足以承载过多数据包以至于排队等待时延过长, 造成平均包时延急剧增大. 从图还可以看出, 相同负载下, 波长数越多, 平均包时延越小, 且达到时延急剧增加的负载值更晚. 这是因为波长数越多, 网络可用的带宽资源越多, 缓存内的数据包越易被传输, 可减小排队等待时延.

图 7、图 8 和图 9 为波长数  $M = 8$ , HRSA-TD 与 EFT-VF 及 DWPBA-TCH 的不同业务平均包时延的对比情况. 从图 7 可以看出, 随着负载增加, 三种算法的 EF 业务平均包时延都不断增大. 当负载增加到 0.8 左右时, 系统即将饱和, 时延急剧增加; 同时, 还可以看出, HRSA-TD 的平均包时延一直优于 EFT-VF, 这是因为 EFT-VF 未对业务进行分级考虑, 不能保证 EF 业务的服务质量. HRSA-TD 通过动态划分子周期优先保障 EF 业务传输, 并设计在线填充方式降低业务时延. 而 DWPBA-TCH 根据带宽分配量来确定周期大小, 负载越低, 周期越小, 其数据包的排队时延也越短, 使得低负载情况下 DWPBA-TCH 的平均包时延表现更优异. 然而, 随着负载的增加, 其数据包需要等待较长一段时间才能被发送, 故随着负载的增加, HRSA-TD 的时延性能迅速优于 DWPBA-TCH.

由图 8 和图 9 可知, 三种算法的低优先级业务平均包时延随负载的增加而增大, 且 HRSA-TD 的 AF 和 BE 业务平均包时延均小于 DWPBA-TCH, 但大于 EFT-VF.

这是因为 HRSA-TD 的低优先级业务在 AF/BE 子周期, 通过实时调整不同 ONU 组的波长数和剩余带宽分配, 高效地实现波长共享, 其 AF 和 BE 业务时延性能好于 DWPBA-TCH; 但 EFT-VF 对任意 ONU 发送的请求都立即授予, 一定程度上保证了低优先级业务时延, 其性能优于 HRSA-TD. 此外, 随着负载的进一步增加, HRSA-TD 的 BE 业务平均包时延比 AF 业务先剧增加. 这是因为负载较大, 剩余带宽不足以支持所有数据包的传输, 数据包需在缓存中等待, 而所提算法优先保证 AF 业务的数据传输, 使得 BE 业务平均包时延急剧增加.

通过以上分析可知, 无论在何种优先级的业务情况下, HRSA-TD 的平均包时延都优于 DWPBA-TCH. 其中, EF 业务平均提升 24.9%, AF 业务平均提升 26.5%, 甚至 BE 业务也提升 39.8%. 与 EFT-VF 相比, 虽然在低优先级业务情况下如 AF 业务, HRSA-TD 的平均包时延约低 19.4%, 但对高优先级的 EF 业务而言, 其时延性能提升了 68.7%. 这在某些区分服务场景中,

以牺牲低优先级业务性能来保证高优先级业务服务质量, 是具有实际意义的.

图 10 表示波长数  $M = 8$  时, HRSA-TD 与 EFT-VF 及 DWPBA-TCH 的上行信道利用率随负载变化的情况. 可见, 所有算法的信道利用率随负载的增加而增大, 达到最大值后趋于稳定. 而 HRSA-TD 较对比算法改善效果明显, 这是因为 HRSA-TD 基于往返时延对 ONU 进行分组调度, 有效避免波长空隙的产生, 并实时调整波长数, 实现资源共享; 采用混合调度机制, 对波长空隙进一步利用, 并进行剩余带宽分配保证信道得到最大化利用. 而 EFT-VF 在负载较小时, 能够充分利用波长空隙, 其信道利用率高于 DWPBA-TCH; 但负载较大时, OLT 不能统计所有 ONU 的请求, 使得重负载 ONU 会长时间占用波长信道, 导致资源分配不合理以至于信道利用率不高. 而 DWPBA-TCH 低信道利用率主要是未考虑信息交互过程中的波长空隙; 同时, 每种业务都独立传输会增加保护时隙, 造成带宽浪费严重.

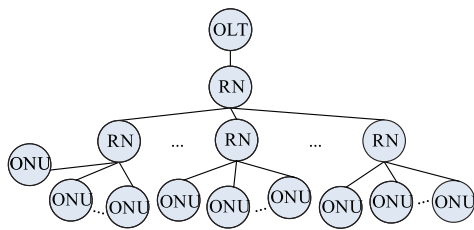


图5 仿真网络拓扑图

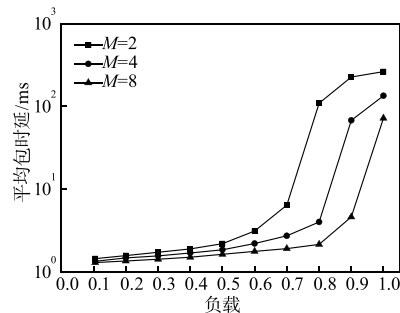


图6 不同波长数的平均包时延

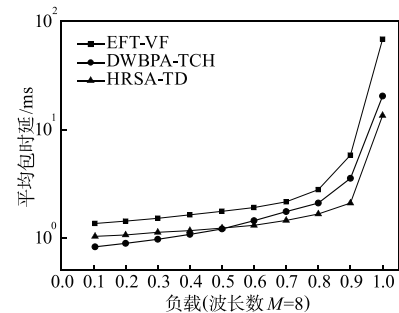


图7 EF业务平均包时延

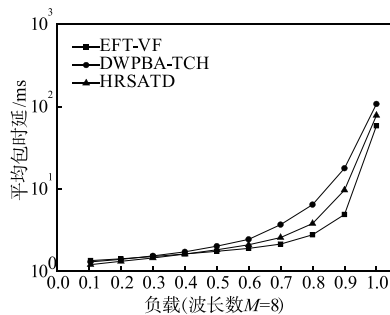


图8 AF业务平均包时延

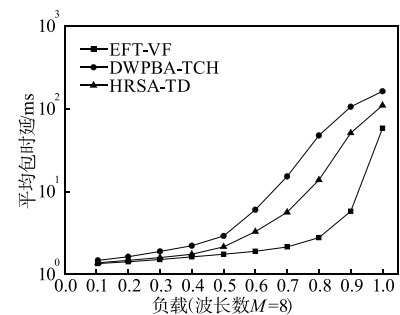


图9 BE业务平均包时延

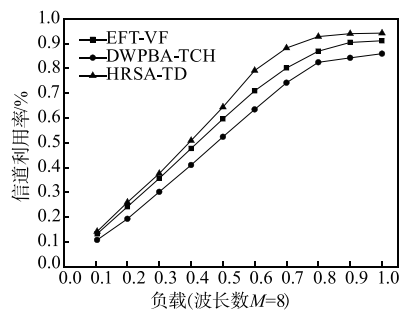


图10 上行信道利用率

## 5 总结

TWDM-PON 通过增加接入距离和扩大覆盖范围, 使更多的用户得以接入, 并有效减少运营商网络部署的建设成本. 然而, 接入距离的增加会增大信息交互的往返时延, 严重恶化网络性能; 同时, 业务的多样化使其对 QoS 的需求也不同. 因而, 如何高效地进行资源调度, 提高信道利用率的同时又保证不同业务的服务质量, 是目前亟需解决的问题. 本文提出带有业务区分的

混合资源调度算法, 该算法基于 ONU 的往返时延进行分组调度, 并根据网络负载, 动态调整各 ONU 组的波长数, 实现资源共享. 在分组调度的基础上, 动态划分业务子周期, 对不同优先级业务进行区分服务. 采用混合调度机制, 在线弥补波长空隙对传输性能的影响, 并基于离线方式实现资源的高效调度. 仿真结果表明, 在长距离广覆盖的 TWDM-PON 中, HRSA-TD 算法保证 EF 业务低时延性能, 同时提高了信道利用率.

## 参考文献

- [1] 姚琳元,宋飞,张宏科. 无源光网络标准发展及关键技术研究[J]. 电子学报,2015,43(3): 557-567.  
Yao Linyuan, Song Fei, Zhang Hongke. Development of standards and research on key technology in passive optical network[J]. Acta Electronica Sinica,2015,43(3): 557-567. (in Chinese)
- [2] Liu X, Rouskas G N, He F, et al. Multipoint control protocol with look-ahead for wavelength division multiplexed ethernet passive optical network [J]. Journal of Optical Communications and Networking,2014,6(2): 104-113.
- [3] Mercian A, McGarry M P, Reisslein M. Offline and online multi-thread polling in long-reach PONs: A critical evaluation[J]. Journal of Lightwave Technology,2013,31(12): 2018-2028.
- [4] Razmkhah A, Rahbar A G. NFS: A new DBA to alleviate channel idle time in heterogeneous WDM-EPONs[A]. International Symposium on Telecommunications (IST 2010) [C]. Tehran: IEEE Press,2010. 138-142.
- [5] Kanonakis K, Tomkos 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.
- [6] 汪学舜,余少华,戴锦友. 新颖的 WDM-EPON 动态带宽调度算法[J]. 通信学报,2012,33(2): 69-75.  
Wang Xueshun, Yu Shaohua, Dai Jinyou. Novel algorithm for dynamic bandwidth scheduling in WDM EPON [J]. Journal on Communications,2012,33(2): 69-75. (in Chinese)
- [7] Dhaini A R, Assi C M, Maier M, et al. Dynamic wavelength and bandwidth allocation in hybrid TDM/WDM EPON networks [J]. Journal of Lightwave Technology,2007,25(1): 277-286.
- [8] Shuai Q, Ansari N. Scheduling hybrid WDM/TDM EPONs with heterogeneous propagation delays[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC 2014) [C]. Sydney: IEEE Press,2014. 3877-3882.
- [9] De Andrade M, Buttaroni A, Tornatore M, et al. Optimization of long-reach TDM/WDM passive optical networks[J]. Optical Switching and Networking,2015,16(C): 36-45.
- [10] McGarry M P, Reisslein M, Colbourn C J, et al. Just-in-time scheduling for multichannel EPONs [J]. Journal of Lightwave Technology,2008,26(10): 1204-1216.
- [11] Basu S, Das G. Scheduling hybrid WDM/TDM ethernet passive optical networks using modified stable matching algorithm[J]. Journal of Lightwave Technology,2014,32(15): 2613-2622.
- [12] Radivojevic M R, Matavulj P S. Highly flexible and efficient model for QoS provisioning in WDM EPON [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking,2013,5(8): 921-931.
- [13] Qin Y, Xue D, Zhao L, et al. A novel approach for supporting deterministic quality-of-service in WDM EPON networks[J]. Optical Switching and Networking,2013,10(4): 378-392.
- [14] Kiaei M, Fouli K, Scheutzw M, et al. Low-latency polling schemes for long-reach passive optical networks[J]. IEEE Transactions on Communications,2013,61(7): 2936-2945.
- [15] Zhang L, Liu Y, Guo L, et al. Energy-saving scheme based on downstream packet scheduling in ethernet passive optical networks [J]. Optical Fiber Technology,2013,19(2): 169-178.
- [16] 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,2016,36(7): 71-79.  
Xiong Yu, Tang Jianbo, Zhang Hong, et al. User-behavior aware dynamic resource allocation strategy in TWDM-PON [J]. Acta Electronica Sinica,2016,36(7): 71-79. (in Chinese)
- [17] Hossen M, Hanawa M. Multi-OLT and multi-wavelength PON-based open access network for improving the throughput and quality of services [J]. Optical Switching and Networking,2015,15(C): 148-159.
- [18] Lee J Y, Hwang I, Nikoukar A A, et al. Comprehensive performance assessment of bipartition upstream bandwidth assignment schemes in GPON [J]. Journal of Optical Communications and Networking,2013,5(11): 1285-1295.

## 作者简介



熊余男,1982年生于四川资中.重庆邮电大学副研究员.研究方向为下一代无源光网络的服务质量控制和绿色节能技术、全光网络的故障管理技术.

E-mail: xiongyu@cqupt.edu.cn



蒋婧女,1988年生于重庆渝中区.重庆邮电大学硕士生,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.

E-mail: jiangjing0405@126.com

张振振男,1988年生于河南商丘,重庆邮电大学研究生.研究方向为下一代无源光网络资源分配算法研究.

E-mail: 18908358986@163.com