

波长灵活无源光网络的动态波长和带宽分配算法

衷敬波, 李娜, 何荣希*, 于存谦

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:研究了波长灵活无源光网络(WA-PON)的动态波长和带宽分配问题,提出一种改进的动态波长带宽分配(IDWBA)算法。该算法根据光网络单元的带宽请求灵活授权波长信道,可以减少保护带宽和控制帧开销造成的带宽浪费。仿真结果表明,与已有算法相比,IDWBA算法可以进一步降低全网上行数据包平均时延和丢包率。

关键词:无源光网络;时分波分复用;波长灵活;动态波长和带宽分配

中图分类号:TN929.18 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2018)02-0001-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.02.001

Dynamic wavelength and bandwidth allocation algorithm for wavelength-agile passive optical networks

ZHONG Jingbo, LI Na, HE Rongxi*, YU Cunqian

(College of Information Science and Technology,

Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: In this paper, the issue of dynamic wavelength and bandwidth allocation (DWBA) in wavelength-agile passive optical networks (WA-PON) is investigated. An improved dynamic wavelength and bandwidth allocation (IDWBA) algorithm is proposed. According to the bandwidth requirement of an optical network unit (ONU), IDWBA flexibly assigns appropriate number of wavelength channel to it, which is beneficial to reduce the bandwidth waste caused by the bandwidth guard and the overhead of control frame. The simulation results show that the IDWBA algorithm can further reduce the average delay and packet loss ratio compared with the existing algorithms.

Key words: passive optical network (PON); time and wavelength-division multiplexing (TWDM); wavelength-agile; dynamic wavelength and bandwidth allocation (DWBA)

0 引言

下一代 EPON(NG-EPON)可采用时分复用(TDM)、波分复用(WDM)和混合时分波分复用(TWDM)等结构,其覆盖范围可达100km,每个波长可支持10Gb/s的传输速率^[1~3]。TWDM-PON结合了WDM-PON和TDM-PON二者的优点,可在多个光网络单元(ONU)间共享波长信道,具有很高的带宽容量和带宽利用率,可分为多调度域PON(MSD-PON)、单调度

域PON(SSD-PON)和波长灵活PON(WA-PON)^[4,5]。与MSD-PON和SSD-PON相比,WA-PON能实现波长的灵活分配和共享,可以很好地适应用户突发流量需求,也有利于降低网络运营和维护成本^[4,5]。

在TWDM-PON中,光线路终端(OLT)利用动态波长和带宽分配(DWBA)算法周期性地为ONU分配波长和带宽,每个ONU仅在授权波长和时隙内上传数据,从而避免与其它ONU发生冲突。然而,现有DWBA算法大都针对MSD-PON或SSD-PON设计^[6~8],仅对ONU授权固定数目(一个或全部)波长,不能直接用于WA-PON。目前仅文献[4,5]针对WA-PON提出一种注水动态波长和带宽分配(WF-DWBA)算法。该算法的核心思想是每次为ONU尽可能多授权

收稿日期:2017-08-23。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61371091)资助;大连海事大学“十三五”重点科研项目(3132016318)资助;大连海事大学基本科研业务费青年骨干教师基金项目(3132017078)资助。

作者简介:衷敬波(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为光网络。

***通信作者:**何荣希(E-mail:hrx@dlmu.edu.cn)。

波长(不超过其收发机数),以降低上行数据包时延,同时保证每个波长的传输结束时间尽可能相同。与传统 DWBA 算法相比,WF-DWBA 算法可有效解决用户流量突发性问题,具有更低的上行数据包平均时延和丢包率。

近年来,随着社交网络兴起,接入网用户网络行为差异性明显,导致网络负载具有较大波动性^[8]。如果一味地强调为 ONU 授权更多波长,当网络负载较小时,可能导致某些波长上用于数据传输的带宽很小。但是,对于这些很小的授权带宽,该波长上仍需传输控制帧和预留保护带宽,无疑会增大控制开销比例,导致带宽浪费较为严重。可见,在设计 WA-PON 的 DWBA 算法时,一方面应考虑充分利用波长灵活分配带来的优势,另一方面也应考虑避免授权波长过多可能造成的带宽浪费问题。为此,本文提出一种改进的 DWBA(IDWBA)算法。

1 算法分析

WF-DWBA 算法^[4,5]未考虑如何合理控制 ONU 授权波长数,以避免增加控制开销比例。其实,每个 ONU 授权波长数越多,所需保护带宽和控制帧开销相应增加。尤其是当用户流量需求具有突发性时,对带宽请求较小的 ONU,仍然按其最大可用波长数授权,极有可能导致某些波长上用于上传数据的带宽甚至小于预留的保护带宽和控制帧开销,造成极大带宽浪费。

IDWBA 算法根据当前信道占用情况和 ONU 带宽请求合理分配授权波长数,尽可能提前每个波长信道的传输结束时间,同时减少保护带宽和控制帧开销带来的带宽浪费。虽然从单个 ONU 来看,该算法的传输时延可能会略有增加,但是从全网整体来看,由于其避免了不必要的带宽浪费,因而可以进一步降低数据包时延。图 1 是总波长数为 5、每个 ONU 最多可用 4 个波长情况下,WF-DWBA^[4,5]和 IDWBA 两种算法的比较。

图 1(a)为某时刻各波长使用情况, λ_1 最早上传时间为 t_0 ,其余波长最上传时间为 t_1 。针对后续到达的 3 个 ONU 带宽请求,WF-DWBA 和 IDWBA 的授权策略如图 1(b)~(g)所示。图 1(b)、图 1(c)和图 1(d)中,WF-DWBA 算法为 ONU1、ONU2 和 ONU3 都分配 4 个波长;图 1(e)、图 1(f)和图 1(g)中 IDWBA 为 ONU1、ONU2 和 ONU3 分配波长数分别为 1、2、2。从图 1 中可以看出,对于带宽请求较小的 ONU₁、ONU₂ 和 ONU₃,WF-DWBA 算法仍为其分配最大可用波长

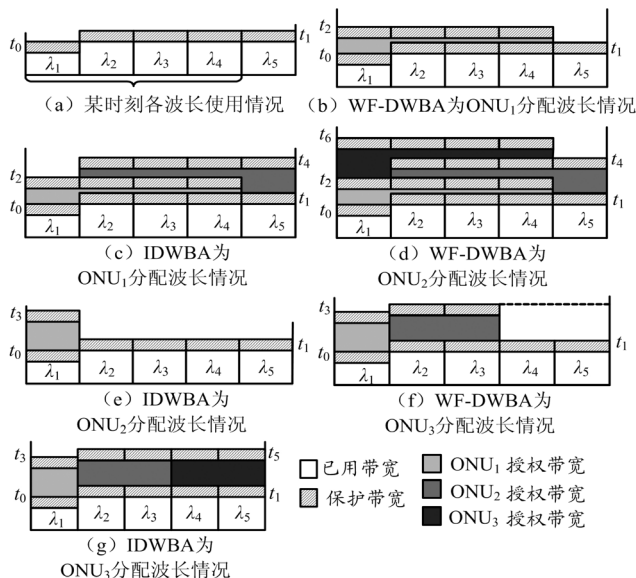


图 1 WF-DWBA 算法^[4,5]和 IDWBA 算法比较

数用于上行传输,这无疑增加了保护带宽与控制帧的开销,造成了带宽浪费。与之对应,IDWBA 算法灵活地授权波长信道,可以有效避免不合理分配带来的带宽浪费。为 3 个 ONU 授权后,WF-DWBA 算法 λ_5 最早上传时间为 t_4 ,其余波长最上传时间为 t_6 ;而 IDWBA 算法 λ_1 最早上传时间为 t_3 ,其余波长最上传时间为 t_5 。由此可以看出,与 WF-DWBA 算法相比,IDWBA 算法可节约带宽($t_4+4\times t_6-t_3-4\times t_5$),单位为时隙长度,而且其上行数据包时延除 ONU₁ 外,ONU₂ 和 ONU₃ 都低于 WF-DWBA 算法。

2 算法描述

IDWBA 算法在保证每个波长上授权数据传输带宽不低于保护带宽和控制帧开销的前提下,采用在线调度方式为 ONU 授权合适数量的波长信道和时隙,以减少不必要的带宽浪费,同时尽量减少各个波长上数据传输结束时间的差异性。在描述算法前,引入以下符号: N :ONU 数,ONU 顺序编号为 $1,2,3,\dots,N$ 。 W :全部波长集合,波长数为 $|W|$ 。 $W_{\max}$:每个 ONU 可使用最大波长数($W_{\max} \leq |W|$),由 ONU 配备接收机数决定。 t_i :ONU _{i} 的 Report 帧到达 OLT 的时间。 R_i 、 G_i :ONU _{i} 的请求带宽和授权带宽(用时隙长度表示)。本文采用按需授权,即 $G_i=R_i$ 。 RTT_i :ONU _{i} 的环路时延。 T_{guard} :相邻两次上行数据传输间的保护带宽。 T_R 、 T_G :Report 帧和 Gate 帧的传输时间。 H_w :波长 λ_w 传输结束时间。 A_i :ONU _{i} 被授权的波长集合,包含波长数为 $|A_i|$ 。 $T_{i,w}$:ONU _{i} 在波长 λ_w 的授权带宽。 $S_{i,w}$:ONU _{i} 在波长 λ_w 上最上传时间,其值为:

$$S_{i,w} = \max\{H_w + T_{\text{guard}}, t_i + RTT_i + T_G\}, \forall \lambda_w \in W \quad (1)$$

$F_{i,w}$: ONU_i 在波长 λ_w 上的传输结束时间,则有:

$$F_{i,w} = S_{i,w} + T_{i,w} \quad (2)$$

IDWBA 算法伪代码如图 2 所示。

OLT 在某一时刻 t_i 收到 ONU_i 的 Report 帧后,首先根据式(1)计算各个波长上 ONU_i 可以上传数据的最早开始时间 $S_{i,w}, w=1,2,\dots,|W|$; 然后根据 $S_{i,w}$ 从小对大对波长排序,存入集合 $W=\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|W|}\}$ (第 1 行)。由于每个 ONU 最多可使用 $W_{\max}$ 个波长,因此 IDWBA 算法在保证每个波长所授权带宽不低于保护带宽和控制帧开销前提下,持续为 ONU_i 增加波长和可用时隙,直到其授权带宽等于请求带宽 R_i 或分配波长数等于 $W_{\max}$ (3~11 行)。具体而言:首先判断在 $S_{i,|W|} - S_{i,1}$ 的时间内能否满足 ONU_i 带宽需求,即判断 $S_{i,|W|} - S_{i,1} \geq R_i$ 是否成立,如果成立,则可在波长 λ_1 完成数据上传;否则,考虑是否需要增加一个波长(即分配两个波长)上传数据。为了避免分配过多波长可能导致的保护带宽和控制帧开销增加,如果新增一个传输波长会导致其数据传输窗口小于保护带宽和上传 Report 帧开销之和,即满足:

$$0 < [R_i - (S_{i,2} - S_{i,1})] / 2 < T_{\text{guard}} + T_R \quad (3)$$

由于此时保护带宽和 Report 帧占用带宽资源超出新增传输波长的数据传输窗口尺寸,导致控制开销比例过大,因此不增加该波长。如果式(3)不成立,则新增波长 λ_2 用于上传数据。重复上述过程,判断是否需要继续增加波长,直到授权波长数达到 $W_{\max}$ 或 ONU_i 的授权带宽满足其请求带宽。

第 12~14 行得出 ONU_i 的授权波长集合 A_i , 15~20 行完成 ONU_i 授权波长集合 A_i 中每个波长的授权带宽计算,同时更新每个波长的传输结束时间。当下一个 ONU 的 Report 帧到达 OLT 端,重复上述过程。

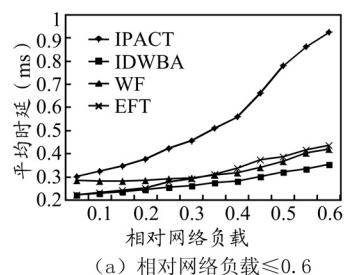
3 仿真及结果分析

本节利用 OPNET 仿真平台对 IDWBA 算法进行仿真分析,并与 WF-DWBA 算法^[4,5]、针对 MSD-PON 的 EFT 算法^[7]和针对 SSD-PON 的修改 IPACT 算法^[8]进行比较(分别用 IDWBA、WF、EFT 和 IPACT 表示)。仿真环境按照文献[5]设置,网络拓扑包括 1 个 OLT、1 个分光器和 128 个 ONU,ONU 与 OLT 之间的距离在 0.5~20km 范围内随机分布,上行数据流量服从 H 参数为 0.8 的 Pareto 分布,数据包长度在 64~1518bytes 内均匀分布。仿真中, $|W|=8, W_{\max}=2, T_{\text{guard}}=1\mu\text{s}$, 每个波长信道的上行传输速率 $R=10\text{Gb/s}$ 。仿真性能指标包括上行数据包平均时延和丢包率。

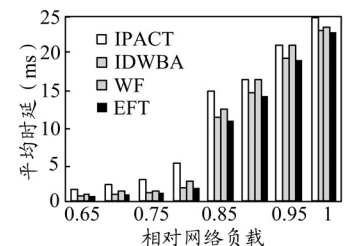
图 3(a)和(b)给出 4 种算法全网上行数据包时延随相对网络负载(网络中每秒产生数据包总比特数与 $|W|R$ 的比值)的变化情况(ONU 缓存 10MB)。可以看出,4 种算法的上行数据包时延都随网络负载增加而增加,而 IDWBA 的时延性能始终优于 WF-DWBA 和 IPACT 算法。在相对网络负载小于 0.8 时, IDWBA 的平均时延低于 EFT (尤其是相对网络负载小于 0.65 时,二者差距较为明显)。随着网络负载继续增加, EFT 的平均时延逐渐低于 IDWBA,但二者差距不明显。这是因为 IPACT 算法始终为每个 ONU 授权全部波长,

算法: IDWBA 算法	9. $k \leftarrow k+1$
输入: t_i 时刻波长和带宽授权情况以及 ONU _i 的带宽请求 R_i	10. end if
输出: ONU _i 授权的波长信道和带宽资源	11. end while
1. OLT 依据式(1)计算 ONU _i 在各个波长上可以上传数据的最早开始时间 $S_{i,w}$, 并按其由早到晚对波长信道排序	12. if FLAG=0 then
2. 初始化 FLAG=0, $A_i=\text{NULL}$, $k=1$	13. $A_i \leftarrow A_i \cup \{\lambda_{W_{\max}}\}$
3. while $k < W_{\max}$ and FLAG=0 do	14. end if //得出 ONU _i 可用波长集合 A_i
4. if $\sum_{j=1}^k (S_{i, W } - S_{i,j}) \geq R_i$ or	15. for $k=1: A_i $ do
$[R_i - \sum_{j=1}^k (S_{i,j+1} - S_{i,j})] / (k+1) \leq (T_{\text{guard}} + T_R)$ then	16. $T_{ik} \leftarrow S_{i, A_i } - S_{ik} + [R_i + T_R - \sum_{j=1}^{ A_i } (S_{i, A_i } - S_{i,j})] / A_i $
5. FLAG $\leftarrow 1$	17. $F_{ik} \leftarrow S_{ik} + T_{ik}$ //计算 ONU _i 在 λ_i 的传输结束时间
6. $A_i \leftarrow A_i \cup \{\lambda_k\}$	18. $H_k \leftarrow F_{ik}$ //更新 λ_i 的传输结束时间 H_k
7. else	19. $k \leftarrow k+1$
8. $A_i \leftarrow A_i \cup \{\lambda_k\}$	20. end for

图 2 IDWBA 算法伪代码



(a) 相对网络负载 ≤ 0.6



(b) 相对网络负载 ≥ 0.65

图 3 上行数据包
平均时延性能比较

导致保护带宽和控制帧开销所占比重较大,带宽浪费较为严重。EFT算法对每个ONU仅授权1个波长,虽可避免使用过多波长可能导致保护带宽和控制帧开销较大问题,但是无法满足有突发流量需求的ONU,也可能导致其时延较大。由于WF-DWBA算法尽可能增加每个ONU的授权波长数(并不是全部波长),有利于减少单次传输时延,但却忽略了为低负载ONU分配过多波长可能导致保护带宽和控制帧开销所占比重较大,会造成上行带宽浪费严重的问题。而IDWBA算法考虑用户带宽需求的突发性,根据ONU带宽请求和波长使用情况合理授权波长数,既考虑如何减少ONU的传输时延,同时又尽可能避免过多增加授权波长带来的保护带宽和控制帧开销增加问题,因此其时延性能更优。

图4对比了不同相对网络负载下4种算法的丢包率性能(ONU缓存10MB),从中可以看出,随着网络负载的增加,4种算法的丢包率相应增加。总体而言,

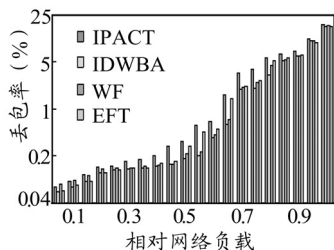


图4 丢包率性能比较

IPACT的丢包率最高,IDWBA算法的丢包率始终低于WF-DWBA算法。当网络负载较轻时,IDWBA算法的丢包率优于EFT,但随着负载逐渐增加,二者差距越来越不明显。这是因为IPACT带宽浪费过大,EFT可能无法满足用户突发流量需求而造成丢包率增加,WF-DWBA和IDWBA通过为ONU增加授权波长来满足突发流量需求,因此其上行数据丢包率优于其它算法。但是,与WF-DWBA相比,IDWBA在尽可能降低每个ONU传输时延前提下,进一步避免带宽浪费,因而其丢包率低于WF-DWBA。

为了进一步研究ONU缓存大小对WA-PON性能的影响,在相对网络负载0.85时改变ONU缓存大小(从5MB增加到50MB),我们对WF-DWBA和IDWBA算法的上行数据包平均时延和丢包率性能进行比较,如图5所示。由图5可知,二者的上行数据包平均时延随ONU缓存增加而增加,而丢包率略有减少。但是,不管缓存如何变化,IDWBA算法性能都优于WF-DWBA算法。这是因为ONU缓存增大,数据包在队列中排队等待发送的机会增加,有利于减少因缓存溢出而丢包的概率。另外,IDWBA算法既考虑为ONU授权合适波长数,同时又尽力减少保护带宽和控制帧开销的影响,因此其丢包率性能更优。

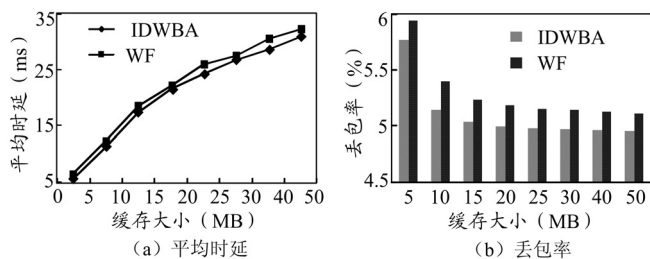


图5 ONU缓存大小对平均时延和丢包率的影响

4 结束语

以上我们研究了WA-PON的DWBA问题,提出了一种IDWBA算法,此算法针对ONU带宽需求的突发性,利用WA-PON波长灵活分配的优势为ONU授权尽可能多的波长,同时还尽可能避免为低负载ONU授权过多波长使某些波长上数据传输窗口过小,导致保护带宽和控制开销所占比重过大而造成的带宽资源浪费问题。仿真结果表明,IDWBA算法有利于降低全网上行数据包的平均时延和丢包率,可有效改善网络性能。

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.
- [2] NESSET D. PON roadmap [J]. J. Opt. Commun. Netw., 2017, 9(1): A71-A76.
- [3] IEEE 802.3 ethernet working group. IEEE 802.3 industry connections feasibility assessment for next generation of EPON [EB/OL]. http://www.ieee802.org/3/ad_hoc/ngepon/ng_epon_report.pdf, 2017-08-10.
- [4] WANG L, WANG X, MUKHERJEE B, et al. On the performance of Hybrid-PON scheduling strategies for NG-EPON[C]// International Conference on Optical Network Design and Modeling. May 9-12, 2016, Cartagena, Spain. Piscataway, NJ, IEEE: 2016:1-5.
- [5] WANG L, WANG X, TORNATORE M, et al. Dynamic bandwidth and wavelength allocation scheme for next-generation havelength-agile EPON [J]. J. Opt. Commun. Netw., 2017, 9(3): B33-B42.
- [6] MAHLOO M, CHEN J, WOSINSKA L, et al. Toward reliable hybrid WDM/TDM passive optical networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): S14-S23.
- [7] KANONAKIS K, TOMKOS I. Improving the efficiency of online upstream scheduling and wavelength assignment in hybrid WDM/TDMA EPON networks [J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2010, 28(6): 838-848.
- [8] KRAMER G, MUKHERJEE B, PESAVENTO G. IPACT a dynamic protocol for an ethernet PON (EPON) [J]. IEEE Commun. Mag., 2002, 40(2): 74-80.
- [9] SHI L, LEE S, SONG H, et al. Energy-efficient long-reach passive optical network: a network planning approach based on user behaviors [J]. IEEE Systems Journal, 2010, 4(4): 449-457.