

doi:10.13756/j.gtxyj.2018.02.007

光通信系统与网络技术

基于业务感知的绿色动态带宽分配算法

高东学¹, 宋宁希¹, 刘 娜², 夏传鲲³

(1. 国网河南省电力公司, 郑州 450000; 2. 北京智芯微电子科技有限公司, 北京 100192;
3. 国网河南省电力公司鹤壁供电公司, 河南 鹤壁 458030)

摘要:为有效解决时分波分复用无源光网络中光网络单元因采用睡眠技术而导致的业务时延恶化问题,提出一种基于业务感知的绿色动态带宽分配算法。通过结合收发机独立睡眠、混合周期睡眠等节能机制,尽可能地延长收发机睡眠时长,从而有效地降低了光网络单元能耗;通过业务感知,对业务未来短期内的带宽需求进行预测,并根据时延敏感型业务需求动态地调整轮询周期时长,从而保证在业务满足服务质量要求的同时最小化时延敏感型业务时延。仿真结果表明,所提算法在保证业务服务质量的前提下,能有效地降低时分波分复用无源光网络中光网络单元的能耗。

关键词:时分波分复用无源光网络;节能;独立睡眠;时延要求;业务感知

中图分类号: TN915.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2018)02-0020-06

Green Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm based on Traffic-Aware

GAO Dong-xue¹, SONG Ning-xi¹, LIU Na², XIA Chuan-kun³

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China;
2. Beijing Smartchip Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China;
3. State Grid Henan Electric Power Company Hebi Branch, Hebi 458030, China)

Abstract: In order to effectively solve the problem of time delay degradation caused by the sleep technology in the Optical Network Unit (ONU) of Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON), a green dynamic bandwidth allocation algorithm based on traffic-aware is proposed. By combining energy saving mechanisms such as the receivers and transmitters sleep independently and sending sleep control signaling one by one and mixed sleep, the sleep time of transceivers are extended as long as possible, so as to reduce the energy consumption of ONU. In addition, by sensing the traffic, the bandwidth demand of services in the short future can be predicted. Therefore, the polling cycle length are dynamically adjusted according to the bandwidth demand of delay sensitive services, so as to meet the requirement of service quality and minimize the delay of expedited forwarding service at the same time. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively reduce the energy consumption at the ONU in TWDM-PON under the premise of ensuring the quality of service.

Key words: TWDM-PON; energy saving; sleep independently; delay requirement; traffic-aware

0 引 言

降低光网络单元 (Optical Network Unit, ONU) 的能耗对降低整个时分波分复用无源光网络 (Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network, TWDM-PON) 的能耗起着至关重要的作用^[1], 用于降低 TDM-PON 中 ONU 能耗的节能技术均适用于 TWDM-PON^[2]。作为标准化的 ONU 节能技术, ONU 睡眠具有易实现、标准化程度高和节能性能好的特点, 但却不可避免地增加了业务的时延^[3]。如何找到节能性能与时延性能间的平衡点是优化当前节能技术的关键。

ONU 睡眠节能技术对 PON 的节能研究具有指导性作用^[4]。为了精确地控制 ONU 唤醒时刻, 文献[5]将节能技术与离线带宽分配技术结合, 设计

了根据带宽分配信息设置 ONU 睡眠时长的绿色动态带宽分配 (Green Dynamic Bandwidth Allocation, GDBA) 算法。为了进一步优化 GDBA 算法的性能, 文献[6]提出了上行中心调度 (Upstream Centric Scheduling, UCS) 和下行中心调度 (Downstream Centric Scheduling, DCS) 两种节能算法。但以上所提到的 ONU 睡眠技术通常将 ONU 的收发机视为整体进行关闭或开启的操作, 考虑到上下行业务的收发不总是同步进行的, 文献[7]提出收发机独立睡眠的思想, 并将业务分类, 提出优先接收实时业务的基于下行数据包调度 (Energy-Saving scheme that is based on downstream Packet Scheduling, ESPS) 的节能算法, 但由于采用周期内睡眠技术的原因, 需要频繁地唤醒收发机, 会产生额外的开销能耗^[8]。跨周期睡眠技术由于睡眠时长相对较

收稿日期: 2017-08-10

作者简介: 高东学 (1966—), 男, 河南郑州人。高级工程师, 学士, 主要研究方向为智能变电站、智能输电。

长,不需要频繁地唤醒收发机,从而有效地降低了开销能耗。然而,原有的跨周期睡眠技术却不能很好地保证业务服务质量(Quality of Service, QoS)。为了平衡节能性能和时延性能的矛盾,保证业务满足时延要求的前提下尽可能增加睡眠时长的跨周期睡眠技术成为了研究热点^[9]。文献[10]提出了上行动态带宽分配(Upstream Dynamic Bandwidth Allocation, UDBA)算法,该算法采用跨周期睡眠技术,将业务划分为加速转发(Expedited Forwarding, EF)业务、确保转发(Assured Forwarding, AF)业务和尽力而为(Best Effort, BE)业务,并根据不同业务的QoS要求动态地调整睡眠周期时长,以保证业务满足QoS要求的前提下,通过减小开销能耗,达到进一步降低ONU能耗的目的。

综上所述,ONU睡眠节能技术对节能性能和时延性能的平衡更加符合现实场景中用户的需求。然而,现有研究并未深入分析业务QoS要求差异,也未考虑不同类型业务占比对节能技术的影响。为解决上述问题,本文提出一种基于业务感知的绿色动态带宽分配(Green Dynamic Bandwidth Allocation based on Traffic-Aware, TA-GDBA)算法,其主要思想为:结合ONU独立睡眠、混合周期睡眠以及逐一下发GATE帧等节能机制,建立一种新的ONU独立睡眠模型,根据上下行业务负载状况,独立地关闭或开启收发机,最大限度地降低ONU能耗;根据各类业务的时延要求,动态地调整轮询周期时长和ONU睡眠时长,达到满足各类业务时延要求的前提下,尽可能地提高EF业务的时延性能。

1 ONU独立睡眠能耗模型

独立睡眠,采取接收机和发射机独立地关闭或开启机制,将接收机和发射机看成独立的功能模块。

按能耗水平将ONU能耗划分为收发机能耗和基础能耗^[11]。而考虑到ONU收发机的独立睡眠,则可以将能耗继续细分为发射机能耗、接收机能耗和基础能耗,其中发射机能耗和接收机能耗占ONU总能耗的60%以上^[12]。TA-GDBA通过降低发射机能耗和接收机能耗,从而有效降低ONU能耗。

K个周期内ONU总的能耗以及第*i*个轮询周期的能耗为

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^K E_{\text{cycle}}^i, \quad (1)$$

$$E_{\text{cycle}}^i = E_{\text{tx}}^i + E_{\text{rx}}^i + E_{\text{base}}^i, \quad (2)$$

式中, E_{tx}^i 、 E_{rx}^i 和 E_{base}^i 分别为第*i*个轮询周期ONU总的发射机、接收机和基础能耗。

每个轮询周期总的发射机和接收机能耗取决于ONU总的睡眠时长:

$$E_{\text{tx}}^i = \sum_{n=1}^N (P_{\text{tx},a} \cdot T_{\text{tx},a,n}^i + P_{\text{tx},s} \cdot T_{\text{tx},s,n}^i), \quad (3)$$

$$E_{\text{rx}}^i = \sum_{n=1}^N (P_{\text{rx},a} \cdot T_{\text{rx},a,n}^i + P_{\text{rx},s} \cdot T_{\text{rx},s,n}^i), \quad (4)$$

式中, $P_{\text{tx},a}$ 、 $P_{\text{tx},s}$ 、 $T_{\text{tx},a,n}^i$ 和 $T_{\text{tx},s,n}^i$ 分别为ONU发射机工作状态下的功率、ONU发射机睡眠状态下的功率、第*i*个轮询周期第*n*个ONU的发射机的工作时长和第*i*个轮询周期第*n*个ONU的发射机的睡眠时长,其余参数的意义同理可知。

最后,第*i*个轮询周期的ONU中的基础能耗只与基础功率和第*i*个轮询周期时长有关, $E_{\text{base}}^i = P_{\text{base}} \cdot T_{\text{cycle}}^i$ 。

2 TA-GDBA 算法

为了降低ONU的能耗,TA-GDBA在保证业务满足QoS要求的前提下,通过结合独立睡眠、周期混合睡眠以及离线带宽分配算法中的逐一下发GATE帧等节能机制,有效地降低了ONU能耗。

2.1 时隙分配

TA-GDBA对需要收发EF业务或即将超出时延要求的AF和BE业务的ONU执行周期内睡眠;对暂不需要收发EF业务或即将超出时延要求的AF和BE业务的ONU执行跨周期睡眠。然后动态地调整轮询周期及睡眠周期时长,按需求进行带宽分配,以此在保证业务满足QoS要求的前提下尽可能地降低ONU能耗,并提高EF业务时延性能。

对于任意ONU,先确定是否需要在轮询周期内收发业务,若需要,则周期内睡眠,否则跨周期睡眠。轮询周期时长取决于需要收发业务的总传输窗口:

$$T_{\text{cycle}}^i = \sum_{n=1}^N W_{\text{cycle},n}^i, \quad (5)$$

对应的限制传输窗口的上下行传输窗口为

$$W_{\text{DB},d,n}^i = T_{\text{DBA}} + \frac{L_G + \text{DB}_{d,n}^i}{R}, \quad (6)$$

$$W_{\text{UB},u,n}^i = T_{\text{DBA}} + \text{RTT}_n + T_{\text{ov}} + \frac{L_G + L_R + \text{UB}_{u,n}^i}{R}, \quad (7)$$

式中, T_{DBA} 为动态带宽分配算法计算时长; L_G/L_R 为GATE/REPORT帧长; $\text{UB}_{u,n}^i/\text{DB}_{d,n}^i$ 为第*i*个轮

询周期第 n 个 ONU 上 / 下行业务实际分配到的带宽; R 为链路速率; T_{ov} 为唤醒开销时长; RTT_n 为第 n 个 ONU 往返时延。

暂不收发业务的 ONU 则执行跨周期睡眠, 以此降低开销能耗。睡眠周期时长为

$$T_{\text{sleep},n} = \begin{cases} 2^{i-1} T_{\text{pd}}, & \text{if } 2^{i-1} T_{\text{pd}} < 5 \text{ ms} \\ 5 \text{ ms}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (8)$$

式中, T_{pd} 为即将到来的轮询周期时长的预测值, 决定睡眠周期时长的增长速率。为了增长平滑, 通过变量因子 α 预测下个轮询周期时长^[13]:

$$\alpha = \sum_{i=1}^9 \frac{(T_{\text{cycle}}^{i+1} - T_{\text{cycle}}^i)}{9}, \quad (9)$$

则 $T_{\text{pd}} = (\alpha + 1) T_{\text{cycle}}^i$ 。

2.2 绿色动态带宽分配

TA-GDBA 提出混合周期睡眠, 要求跨周期睡眠的 ONU 待收发业务仍需在轮询周期内收发, 故在为周期内睡眠的 ONU 分配带宽的同时, 也要为跨周期睡眠即将结束的 ONU 业务分配带宽。而是否为跨周期睡眠的 ONU 分配带宽需要根据以下标准判断:

(1) 若考虑了当前需要收发业务带宽, 而该轮询周期结束仍不会超出业务时延要求的跨周期睡眠 ONU, 暂不需要分配带宽;

(2) 若考虑了当前需要收发业务带宽, 而该轮询周期结束将会超出业务时延要求的跨周期睡眠 ONU, 需要分配带宽。

接下来进行带宽分配。由于能够分配到的带宽受限于轮询周期理论上能够提供的传输窗口, 因此首先确定当前轮询周期理论传输窗口:

$$T_{\text{th}}^i = \sum_{n=1}^N W_{\text{th},n}^i, \quad (10)$$

对应的传输窗口受限于上下行传输窗口:

$$W_{\text{d},n}^i = T_{\text{DBA}} + \frac{L_G + B_{\text{d},n}^i}{R}, \quad (11)$$

$$W_{\text{u},n}^i = T_{\text{DBA}} + RTT_n + T_{\text{ov}} + \frac{L_G + L_R + B_{\text{u},n}^i}{R}. \quad (12)$$

理论传输窗口可能存在两种情况: 当 $T_{\text{th}}^i < 2 \text{ ms}$ 时, 各 ONU 均分配到需要的带宽; 当 $T_{\text{th}}^i \geq 2 \text{ ms}$ 时, 带宽分配此时受限于最大轮询周期, 应优先考虑即将超出时延要求的 EF、AF 和 BE 业务的带宽分配。

求得即将超出时延要求的 EF、AF 和 BE 业务分配到的带宽后, 统计其传输窗口:

$$T_{\text{ex}}^i = \sum_{n=1}^N W_{\text{ex},n}^i, \quad (13)$$

对应的传输窗口受限于上下行传输窗口:

$$W_{\text{d},\text{ex},n}^i = T_{\text{DBA}} + \frac{L_G + DB_{\text{d},\text{ex},n}^i}{R}, \quad (14)$$

$$W_{\text{u},\text{ex},n}^i = T_{\text{DBA}} + RTT_n + T_{\text{ov}} + \frac{L_G + L_R + UB_{\text{u},\text{ex},n}^i}{R}. \quad (15)$$

为了保证 EF 业务时延性能, 将剩余的传输时隙公平地分配给需要收发 EF 业务的 ONU, 首先需要确定各 ONU 能够分配到的 EF 业务保证带宽:

$$B_{\text{EF},g}^i = \frac{B_{\text{max}}^i - T_{\text{ex},n}^i \cdot R}{k_{\text{ex}}^i}, \quad (16)$$

式中, B_{max}^i 为第 i 个轮询周期理论需要的最大传输带宽, $B_{\text{max}}^i = 2 \text{ ms} \times R$; k_{ex}^i 为当前轮询周期需要收发业务的 ONU 数目。

然后为各 ONU 的 EF 业务分配带宽, 需要判断 ONU 传输窗口受限于上行方向还是下行方向:

$$\delta_{\text{u},n}^i = \begin{cases} 0, & W_{\text{u},\text{ex},n}^i < W_{\text{d},\text{ex},n}^i \\ 1, & W_{\text{u},\text{ex},n}^i \geq W_{\text{d},\text{ex},n}^i \end{cases}, \quad (17)$$

$$\delta_{\text{d},n}^i = \begin{cases} 0, & W_{\text{d},\text{ex},n}^i < W_{\text{u},\text{ex},n}^i \\ 1, & W_{\text{d},\text{ex},n}^i \geq W_{\text{u},\text{ex},n}^i \end{cases}, \quad (18)$$

式中, $W_{\text{d},\text{ex},n}^i$ 、 $W_{\text{u},\text{ex},n}^i$ 分别为第 i 个轮询周期第 n 个 ONU 上 / 下行即将超出时延要求业务的传输窗口。

(1) 若 $\delta_{\text{u},n}^i = 1$, 则说明 ONU _{n} 传输窗口受限于上行方向, 为 ONU _{n} 的 EF 业务分配带宽。

若 EF 业务负载较轻, 则该 ONU 的 EF 业务能分配到的带宽为

$$UB_{\text{u},\text{EF},n}^i = B_{\text{u},\text{EF},n}^i, \quad \text{if } B_{\text{u},\text{EF},n}^i \leq B_{\text{EF},g}^i; \quad (19)$$

若 EF 业务负载较重, 则该 ONU 的 EF 业务除了能够获得 EF 业务保证带宽以外, 还可以分配到 EF 业务负载较轻的 ONU 剩余的带宽。统计上下行剩余带宽, 对于上行方向:

$$B_{\text{u},\text{EF},\text{re}}^i = \sum_{i=1} (B_{\text{EF},g}^i - B_{\text{u},\text{EF},n}^i), \quad n \in \{B_{\text{u},\text{EF},n}^i \leq B_{\text{EF},g}^i\}; \quad (20)$$

对于下行方向:

$$B_{\text{d},\text{EF},\text{re}}^i = \sum_{i=1} (B_{\text{EF},g}^i - B_{\text{d},\text{EF},n}^i), \quad n \in \{B_{\text{d},\text{EF},n}^i \leq B_{\text{EF},g}^i\}; \quad (21)$$

则总的剩余带宽为

$$B_{\text{EF},\text{re}}^i = B_{\text{u},\text{EF},\text{re}}^i + B_{\text{d},\text{EF},\text{re}}^i. \quad (22)$$

对于传输窗口受限于上行方向的 EF 业务负载较重的 ONU, 其 EF 业务能够分配到的额外带宽为

$$\bar{B}_{u,EF, re, n}^i = \frac{B_{u,EF, n}^i - B_{EF, g}^i}{\sum_{i=1} (B_{u,EF, n}^i - B_{EF, g}^i)} \cdot B_{EF, re}^i, \quad (23)$$

$$i \in \{B_{u,EF, n}^i > B_{EF, g}^i\},$$

则其 EF 业务能够分配到的带宽为

$$UB_{u,EF, n}^i = \bar{B}_{u,EF, re, n}^i + B_{EF, g}^i, \quad \text{if } B_{u,EF, n}^i > B_{EF, g}^i. \quad (24)$$

而对于该传输窗口受限于上行方向的 ONU 而言,其下行方向的 EF 业务能够获得的带宽需保证不影响传输窗口:

$$DB_{d,EF, n}^i = \begin{cases} B_{d,EF, n}^i, & \text{if } W_{DB_{d,ex, n}^i + B_{d,EF, n}^i} < W_{UB_{u,ex, n}^i + UB_{u,EF, n}^i} \\ (W_{UB_{u,ex, n}^i + UB_{u,EF, n}^i} - W_{DB_{d,ex, n}^i}) \cdot R, & \text{if } W_{DB_{d,ex, n}^i + B_{d,EF, n}^i} \geq W_{UB_{u,ex, n}^i + UB_{u,EF, n}^i} \end{cases}. \quad (25)$$

(2) 若 $\delta_{d,n}^i = 1$, 则说明 ONU_n 传输窗口受限于下行方向,为 ONU_n EF 业务分配带宽。

若 EF 业务负载较轻,则该 ONU 的 EF 业务能分配到的带宽为

$$DB_{d,EF, n}^i = B_{d,EF, n}^i, \quad \text{if } B_{d,EF, n}^i \leq B_{EF, g}^i; \quad (26)$$

若 EF 业务负载较重,其能够分配到的额外带宽为

$$\bar{B}_{d,EF, re, n}^i = \frac{B_{d,EF, n}^i - B_{EF, g}^i}{\sum_{i=1} (B_{d,EF, n}^i - B_{EF, g}^i)} \cdot B_{EF, re}^i, \quad (27)$$

$$i \in \{B_{d,EF, n}^i > B_{EF, g}^i\},$$

则其 EF 业务能够分配到的带宽为

$$UB_{d,EF, n}^i = \bar{B}_{d,EF, re, n}^i + B_{EF, g}^i, \quad \text{if } B_{d,EF, n}^i > B_{EF, g}^i. \quad (28)$$

而对于该传输窗口受限于下行方向的 ONU 而言,其上行方向的 EF 业务能够获得的带宽需保证不影响传输窗口:

$$UB_{u,EF, n}^i = \begin{cases} B_{u,EF, n}^i, & \text{if } W_{UB_{u,ex, n}^i + B_{u,EF, n}^i} < W_{DB_{d,ex, n}^i + DB_{d,EF, n}^i} \\ (W_{DB_{d,ex, n}^i + DB_{d,EF, n}^i} - W_{UB_{u,ex, n}^i}) \cdot R, & \text{if } W_{UB_{u,ex, n}^i + B_{u,EF, n}^i} \geq W_{DB_{d,ex, n}^i + DB_{d,EF, n}^i} \end{cases}. \quad (29)$$

2.3 ONU 唤醒及睡眠时刻的计算

上下行带宽分配完成后,光线路终端(Optical Line Terminal, OLT)需要计算出各 ONU 睡眠和唤醒时刻,并通知 ONU 收发业务。为了降低 ONU 业务时延,在收发业务前,需要为 ONU 轮询顺序进行排序,此时需要考虑物理距离和 ONU 优先级两方面因素。由此可以得到轮询周期 ONU 的轮询顺序,并为之按序编号: $ONU_1 \rightarrow \dots \rightarrow ONU_n \rightarrow \dots \rightarrow$

ONU_N , 随后 OLT 根据 ONU 分配到的带宽和轮询顺序为 ONU 计算睡眠和唤醒时刻。

(1) 下行方向

t_1 为轮询周期下行方向起始时刻, t_2 为轮询周期第一个 GATE 帧的发送时刻, t_4 为 ONU₂ 接收机唤醒接收 GATE 帧的时刻,其值取决于 ONU₁ 的传输窗口:

$$t_4 = t_1 + T_{DBA} + RTT_k + T_{ov} + \frac{L_G + L_R + UB_{u,1}^i}{R}, \quad (30)$$

一般可以由下式计算得到:

$$t_4 = t_1 + \sum_{n=1}^{k-1} (W_{UB_{u,n}^i} \cdot \delta_{u,n}^i + W_{DB_{d,n}^i} \cdot \delta_{d,n}^i). \quad (31)$$

t_6 为 ONU₂ 接收机进入睡眠时刻,其值取决于该 ONU 接收机唤醒时刻、下行业务带宽以及往返时延,一般可由下式计算得到:

$$t_6 = t_4 + T_{ov} + \frac{L_G}{R} + DB_{d,k}^i. \quad (32)$$

(2) 上行方向

t_3 为轮询周期上行方向起始时刻,一般从第一个 ONU 开始接收 GATE 帧开始, t_5 为 ONU₂ 发射机唤醒发送业务的时刻,其值取决于该 ONU 接收机唤醒时刻,可由下式计算得到:

$$t_5 = t_4 + T_{ov} + \frac{L_G}{R}. \quad (33)$$

t_7 为 ONU₂ 发射机进入睡眠时刻,其值取决于该 ONU 发射机唤醒时刻以及上行业务带宽,一般可由下式计算得到:

$$t_7 = t_5 + T_{ov} + UB_{u,k}^i + \frac{L_R}{R}. \quad (34)$$

3 仿真结果及性能分析

通过仿真,对比分析了 TA-GDBA 与 DCS^[6]、ESPS^[7] 和 UDBA^[10] 几种算法的能耗百分比和平均包时延,并对 TA-GDBA 的节能性能和时延性能进行分析,指出 TA-GDBA 的技术优势和适用场景。

3.1 仿真环境

基于典型的树形 TWDM-PON 结构进行仿真。其中总的 ONU 数目 $M=32$, 波长数 $L=8$, 各 ONU 到 OLT 的最大物理距离为 40 km。EF、AF 和 BE 业务占比分别为 30%、35% 和 35%, 并服从泊松分布, 单个数据包大小服从 64~1 518 bytes 的均匀分布^[15]。最大轮询周期为 2 ms, 保护时隙为 2 μs ^[16], 算法以及 DBA 计算时长为 10 μs ^[10], 唤醒开销时长

为 $125\ \mu\text{s}^{[8]}$, 波长转换时间为 $10\ \mu\text{s}^{[15]}$ 。功耗参数如表 1 所示。

表 1 功耗参数

参 数	数 值
$P_{\text{Tx},a} / \text{W}$	$1.63^{[14,17]}$
$P_{\text{Rx},a} / \text{W}$	$1.55^{[14,17]}$
$P_{\text{Tx},s} / \text{W}$	0.15
$P_{\text{Rx},s} / \text{W}$	0.15
$P_{\text{base}} / \text{W}$	$0.7^{[14]}$

3.2 仿真结果分析

图 1 所示为 4 种算法的节能性能对比图。由图可知,随着负载的增大,4 种算法的能耗逐渐增加,当负载达到 $1.0(10^4\text{ 数据包/s/ONU})$ 时,能耗百分比基本达到 100%。负载较低时,DCS 节能性能最差,这是由于 DCS 没有采用独立睡眠机制,使得收发机睡眠时长减少。当负载到达 $0.9(10^4\text{ 数据包/s/ONU})$ 时,4 种算法的轮询周期达到最大值 2 ms。统一下发 GATE 帧的 ESPS 由于在轮询周期内 ONU 需要唤醒两次,开销能耗较大,因此其节能性能最差。其余算法由于睡眠时长逐渐减少,独立睡眠和跨周期睡眠等节能机制对能耗的主导作用降低,节能性能逐渐趋于一致。

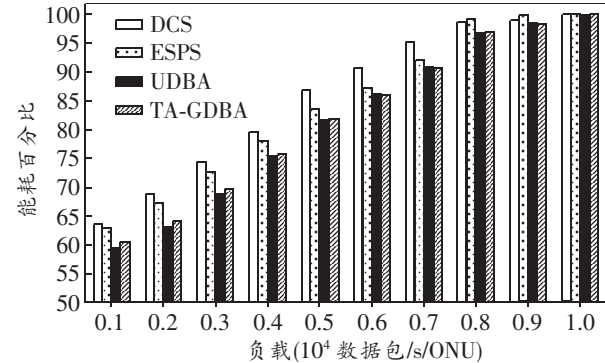


图 1 4 种算法的节能性能对比

图 2 所示为在不同 EF 业务占比的网络场景中 TA-GDBA 与 UDBA 的节能性能对比图。由图可知,对于 TA-GDBA 来说,当负载相对较低时,EF 业务占比越低节能性能越好。这是由于 EF 业务占比越低意味着睡眠周期时长较长,开销能耗可以进一步降低。图 3 所示为 4 种算法的时延性能对比图。由图可知,在低负载情况下,4 种算法的各类业务时延基本满足时延要求。但随着负载持续增大,4 种算法的业务时延在负载达到 $0.8(10^4\text{ 数据包/s/ONU})$ 左右时开始陡增。这是由于系统负载饱和,而其传输能力有限,以致不能及时收发业务,导致业务时延急剧上升。

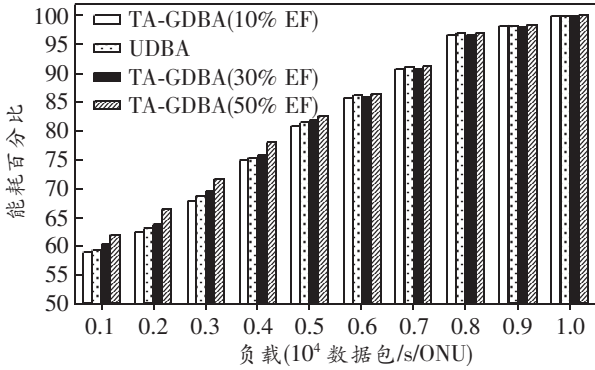


图 2 不同 EF 业务占比的 TA-GDBA 和 UDBA 算法的节能性能对比

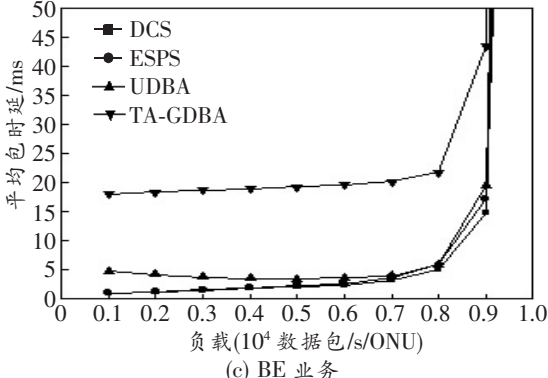
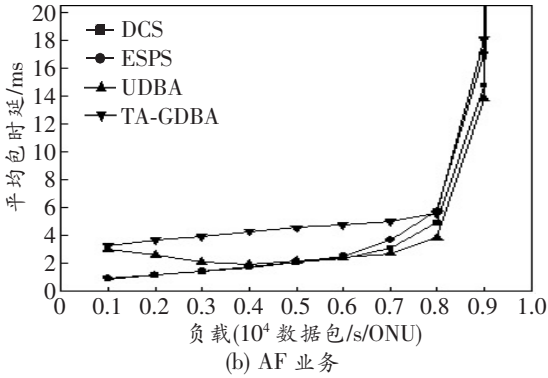
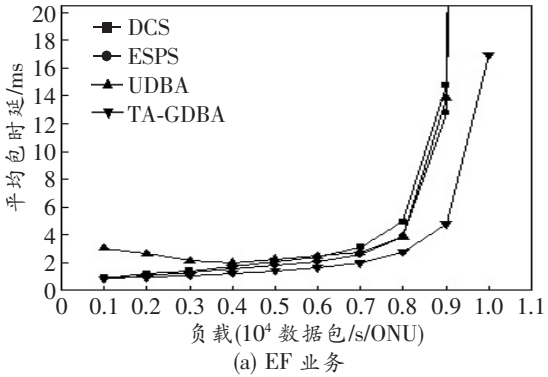


图 3 不同算法的平均包时延对比

总的来说,TA-GDBA 在基本保证 AF 和 BE 业务时延要求的前提下,牺牲 AF 和 BE 业务的时延性能,换取 EF 业务的时延性能的提升,是 TA-GD-

BA 相较于 DCS、ESPS 以及 UDBA 的创新所在。

4 结束语

本文提出了 TA-GDBA 算法,使得在保证 EF 业务时延性能优越以及 AF 和 BE 业务满足其时延要求的前提下,尽可能延长 ONU 睡眠时长,从而有效地降低了 ONU 的能耗。而在时延方面,尽可能减小 EF 业务时延,并保证 AF 和 BE 业务在超出时延要求前发送,可以在有效地降低 ONU 能耗的同时,满足业务 QoS 的要求。

参考文献:

- [1] Luo Yuanqiu, Zhou Xiaoping, Effenberger F J, et al. Time-and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2) [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 587—593.
- [2] Wu D P, He J, Wang H G, et al. A Hierarchical Packet Forwarding Mechanism for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Communication Magazine, 2015, 53(8): 92—98.
- [3] Kani J. Power Saving Techniques and Mechanisms for Optical Access Networks Systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 563—570.
- [4] Wu D P, Zhang P N, Wang H G, et al. Node Service Ability Aware Packet Forwarding Mechanism in Intermittently Connected Wireless Networks [J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2016, 15(12): 8169—8181.
- [5] Dhaini A R, Ho P H, Shen Gangxiang. Toward Green Next-Generation Passive Optical Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(11): 94—101.
- [6] Yan Ying, Dittmann L. Energy Efficiency in Ethernet Passive Optical Networks (EPONs): Protocol Design and Performance Evaluation [J]. Journal of Communications, 2011, 6(3): 249—261.
- [7] Zhang Lincong, Liu Yejun, Guo Lei, et al. Energy-Saving Scheme based on Downstream Packet Scheduling in Ethernet Passive Optical Networks [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(2): 169—178.
- [8] Wong S W, Valcarenghi L, Yen S H, et al. Sleep Mode for Energy Saving PONs: Advantages and Drawbacks [C]// 2009 IEEE GLOBECOM Workshops. Honolulu: IEEE, 2009: 1—6.
- [9] Ahmed M, Ahmad I, Habibi D. Green Wireless-Optical Broadband Access Network: Energy and Quality-of-Service Considerations [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(7): 669—680.
- [10] Nikoukar A A, Hwang I S, Liem A T, et al. QoS-Aware Energy-Efficient Mechanism for Sleeping Mode ONUs in Enhanced EPON [J]. Photonic Network Communications, 2015, 30(1): 59—70.
- [11] Zhang Jingjing, Ansari N. Toward Energy-Efficient 1 G-EPON and 10 G-EPON with Sleep-Aware MAC Control and Scheduling [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(2): s33—s38.
- [12] Valcarenghi L, Van D P, Castoldi P. How to Save Energy in Passive Optical Networks [C]// IEEE 2011 13th ICTON. Stockholm: IEEE, 2011: 1—5.
- [13] Nikoukar A A, Hwang I S, Wang C J, et al. A SIEPON Based Transmitter Sleep Mode Energy-Efficient Mechanism in EPON [J]. Optical Fiber Technology, 2015, 23(2): 78—89.
- [14] Skubic B, Hood D. Evaluation of ONU Power Saving Modes for Gigabit-Capable Passive Optical Networks [J]. IEEE Network, 2011, 25(2): 20—24.
- [15] Dixit A, Lannoo B, Colle D, et al. Dynamic Bandwidth Allocation with Optimal Wavelength Switching in TWDM-PONs [C]// 15th ICTON 2013. Cartagena: IEEE Press, 2013: 1—4.
- [16] Garfias P, Andrade M D, Tornatore M, et al. Energy-Saving Mechanism in WDM/TDM-PON based on Upstream Network Traffic [J]. Photonics, 2014, 1(3): 235—250.
- [17] Valcarenghi L, Van D P, Raponi P G, et al. Energy Efficiency in Passive Optical Networks: Where, When, and How? [J]. IEEE Network, 2012, 26(6): 61—68.