

TWDM-PON 中时延约束节能动态波长带宽分配算法

于存谦, 唐明珠, 何荣希

(大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 基于离线调度方式和节点模块化设计思想, 提出一种时延约束节能动态波长带宽分配算法。该算法考虑 OLT 和 ONU 两端协同节能, 在保证分组时延约束条件下, 尽可能减少激活波长数和延长轮询周期长度。同时, 尽量集中 OLT 和 ONU 端上/下行传输时间, 减少其状态转换次数, 延长其处于低功耗状态时间, 并避免信道出现高能耗空隙。仿真结果表明所提算法在保证分组时延约束的前提下, 有利于降低 OLT 端和 ONU 端能耗以及全网总能耗。

关键词: 无源光网络; 时分波分复用; 动态波长带宽分配; 节能; 时延约束

中图分类号: TN929.18

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018160

Energy-efficient dynamic wavelength and bandwidth allocation algorithm with delay constraint for time and wavelength division multiplexed passive optical networks

YU Cunqian, TANG Mingzhu, HE Rongxi

College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: Based on offline scheduling and node modular design, an energy-efficient dynamic wavelength and bandwidth allocation algorithm with the delay constraint (EE-DWBA-DC) was proposed. Optical line terminal (OLT) and optical network units (ONU) were considered to save energy. Under the constraint of packet delay, the number of active wavelengths could be reduced as much as possible and the length of polling cycle was increased. At the same time, the uplink and downlink transmission time of OLT and ONU were concentrated to reduce the state conversion times and extend its low-power duration. In addition, the high energy consumption voids of channels were attempted to be minimized. The simulation results verify that the proposed algorithm can reduce the energy consumption of OLT and ONU and the total energy consumption of the whole network under the premise of guaranteeing packet delay constraints.

Key words: passive optical network, time and wavelength division multiplexing, dynamic wavelength and bandwidth allocation, energy saving, delay constraint

1 引言

用户带宽需求的爆炸式增长导致互联网能耗以每年 15%~20% 的速度激增, 其中接入网的能耗

约占 70%^[1-2], 因此, 接入网的节能问题已成为业界关注的焦点。与其他接入网方式相比, 无源光网络 (PON, passive optical network) 具有容量大、成本低等优势, 目前已得到广泛部署。由于传统时分复

收稿日期: 2018-05-02; 修回日期: 2018-08-16

通信作者: 何荣希, hrx@dlmu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61371091, No.61801074); 大连海事大学“十三五”重点科研基金资助项目 (No.3132016318); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (No.3132017078)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61371091, No.61801074), The 13th Five-Year Key Research Project of Dalian Maritime University (No.3132016318), The Fundamental Research Funds for Central Universities (No.3132017078)

用 PON(TDM-PON, time division multiplexed-PON) 越来越无法满足用户日益增长的带宽需求, 业界启动了下一代 PON (NG-PON, next generation-PON) 的研究和标准化工作。NG-PON 可分为 NG-PON1 和 NG-PON2 2 个阶段, NG-PON2 可解决 NG-PON1 难以满足带宽高速增长的难题, 被视为 PON 的长期演进方案^[3]。时分波分复用 PON (TWDM-PON, time and wavelength division multiplexed-PON) 结合了 TDM-PON 和波分复用 PON (WDM-PON, wavelength division multiplexed-PON) 各自的优势, 已成为 NG-PON2 最具竞争力的解决方案^[4]。

PON 耗能主要集中在光线路终端 (OLT, optical line terminal) 和光网络单元 (ONU, optical network unit) ^[5-8]。OLT 端、ONU 端引入模块化设计, 将其组件分为接收模块、发射模块和基础模块 3 部分^[9-10], 从而可根据网络负载情况动态关闭部分收机模块和发机模块, 可以有效地降低网络能耗。由于 TDM-PON 中所有 ONU 共用同一波长信道接入 OLT, 因此, OLT 一直保持激活状态, 仅 ONU 端可在假寐、休眠和激活等状态之间转换。已有针对 TDM-PON 的节能算法主要以降低 ONU 能耗为目的, OLT 依据 ONU 带宽请求对其合理授权, 以尽量减少其处于激活状态的时间, 从而尽可能延长其休眠或假寐时间^[6-9,11-12]。与 TDM-PON 不同, TWDM-PON 支持多波长传输特性, 通过合适的资源配置策略在 OLT 端可关闭部分空闲波长, 而 ONU 端仍支持休眠、假寐等低功耗状态, 从而可同时提高 OLT 和 ONU 端的能量利用率^[10,13]。

已有文献分别从 OLT、ONU 两方面研究 TWDM-PON 的节能动态波长带宽分配 (DWBA, dynamic wavelength bandwidth allocation) 算法。参考文献[5]提出一种基于上行负载的能量感知波长分配算法 (EWA, energy-aware wavelength assignment), 通过关闭部分 OLT 端的接收机来降低能耗。参考文献[14]提出一种动态波长共享机制, 通过建立虚拟 PON 在低负载 ONU 间共享波长, 同时考虑 ONU 动态重构对网络性能的影响, 给出多目标整数线性规划模型和在线算法。参考文献[15]提出一种 ONU 迁移机制, 将处于激活状态的 ONU 集中到较少几条波长, 关闭其他波长的收机、发机, 从而达到节能目的。针对不同 ONU 负载动态波动情况, 参考文献[16]提出一种 ONU 之间的资源共享机制, OLT 端引入可调谐设备使多个 ONU 共享同一个波

长, 从而减少激活的波长数和收发机, 降低网络能耗。参考文献[17]提出一种能量有效的 DWBA 算法, 通过在 OLT 端关闭空闲波长和在 ONU 端引入休眠状态, 可以大大降低全网能耗。

以上算法仅考虑如何降低网络能耗, 忽略了保障 ONU 数据分组的时延要求。实际上, 通过关闭空闲波长对应收机模块、发机模块, 虽然可以降低网络能耗。但是, 关闭收机模块、发机模块可能导致 OLT、ONU 不能及时被唤醒以收发数据分组, 反而会增加上/下行数据分组在队列中的缓存时间, 在一定程度上增加数据分组时延, 导致无法很好满足用户的服务质量 (QoS, quality of service) 要求^[11,13]。事实上, 不同用户业务对数据分组时延有不同的要求^[8]。因此, 在研究 TWDM 的节能 DWBA 算法时, 须在地满足数据分组时延约束前提下, 尽可能节能, 而不是仅仅一味强调整节能。参考文献[10]提出一种支持模块化的流量感知节能方案 TESM (traffic-aware energy saving scheme with modularization supporting), 可根据当前网络负载动态开启/关闭 ONU、OLT 的收机模块、发机模块。同时依据下行分组到达时间以及分组队列长度动态调整每个 ONU 的授权顺序, 在节能的同时有助于保证实时业务的时延约束要求。参考文献[18]分析了 ONU 收机、发机的调谐开销和重新配置时间对网络节能效果和分组时延的影响。参考文献[19]将波长优化和睡眠机制引入具有时延约束特性的 TWDM-PON 中, 提出一种离线节能 DWBA 算法 (OFF-DWBA), 并通过仿真验证其有效性。该算法可利用 10 Gbit/s 垂直腔面发射激光器的 ONU (10G-VCSEL-ONU) 的可调节性, 在保证数据分组时延约束条件下减少 ONU 端、OLT 端的能耗。参考文献[20]是参考文献[19]工作的扩充, 详细描述了参考文献[19]的节能框架, 也就是在 OLT 端关闭空闲波长、使空闲 ONU 进入休眠或假寐状态, 并推广到在线调度方式。

上述文献的主要思想都是尽量少激活波长, 而在整个轮询周期内关闭更多 OLT 端收机和发机以达到节能的目的, 却忽略了在激活波长上前后两次数据传输中可能出现的空隙时间对节能效果的影响。实际上, 如果这些空隙时间足够长 (大于 OLT 收机和发机的唤醒时间), 那么这些空隙内也可以关闭收机模块、发机模块。但是, 如果空隙持续时间过短, 以至于处于低功耗状态的 OLT、ONU

需要传输数据时无法及时开启已关闭的收机模块、发机模块,则此空隙内不能使 ONU、OLT 进入低功耗状态,反而会导致能量浪费(本文将这样的空隙称为高能耗空隙)。参考文献[13]针对 OLT 的节能提出一种基于在线调度的 EO-NoVM (employing number-of-voids minimization) 算法,该算法不以减少激活波长数为目的,而是通过 ONU 内和 ONU 间聚合机制来减少信道空隙的产生,从而降低能量消耗。但是,该算法忽略了减少激活波长数对 OLT 节能效果的益处,而是使用全部波长进行授权,而且该算法仅从 OLT 角度考虑节能,并未涉及 ONU 的节能问题。实际上,ONU 和 OLT 的节能机制是互相影响的,如果仅强调 OLT 的能耗最小化,可能导致 ONU 处于低功耗的时间减少;反之,如果仅追求 ONU 能耗最小化,OLT 节能效果未必最佳。因此,应从 ONU 和 OLT 两端协同角度来联合考虑节能策略,以保证全网总能耗最低。另外,离线调度方式中 OLT 收到所有 ONU 的 report 帧后才对其授权,与在线调度方式相比,尽管会引入一定时延开销,但是,它可以根据所有 ONU 的带宽需求、时延约束情况来确定激活波长数和各个 ONU 上行数据传送开始时间以及传输窗口大小,从而可利用离线调度的统计复用性合理设定 OLT、ONU 端收机和发机的关闭/开启时间,有利于进一步提高全网节能效率。

综上,本文基于离线调度方式以及节点模块化设计,联合考虑 OLT 和 ONU 两端协同节能,提出一种基于时延约束的节能动态波长带宽分配算法 (EE-DWBA-DC, energy-efficient dynamic wavelength and bandwidth allocation algorithm with delay constraint)。该算法中,OLT 依据每个轮询周期内 ONU 的带宽请求以及数据分组时延约束情况,动态调整激活波长数和轮询周期长度,使每个周期内需激活波长数最少和轮询周期长度最大,并动态开启/关闭 ONU、OLT 的收机模块、发机模块以节能;同时还通过合理授权每个 ONU 的波长信道及传输窗口,尽量集中 OLT、ONU 上/下行工作时间,以减少节点状态转换所需额外能耗。另外,尽可能延长 ONU、OLT 处于低功耗状态的时间,同时尽量减少出现高能耗空隙导致的能量浪费。仿真结果表明:所提算法在满足用户 QoS 要求(时延约束)前提下,有利于降低 OLT 和 ONU 端能耗以及全网总能耗。

2 问题分析

TWDM-PON 中 OLT 与 ONU 之间采用多点控制协议 (MPCP, multi point control protocol) 进行信息交互^[21],由于 ONU 与 OLT 之间往返时延的存在及所采用授权策略的不同,往往导致产生信道空隙。信道空隙内并无数据传输,ONU、OLT 可关闭相应收机模块、发机模块进入低功耗状态以节能。但是,高能耗空隙内并不能使 ONU、OLT 进入低功耗状态,从而导致能量浪费。因此,每个轮询周期内信道上存在的高能耗空隙越多,全网能量利用率越低。另一方面,由于唤醒处于低功耗状态的 ONU、OLT 需额外耗能,因此,也应尽量减少 ONU、OLT 的状态转换次数。可见,节能 DWBA 算法的首要目标就是要根据每个轮询周期内波长信道占用情况、ONU 带宽需求以及数据分组时延限制条件,通过合理分配波长和上传窗口,尽量避免产生高能耗空隙,同时也尽可能使 ONU 和 OLT 处于激活状态的时间集中,以减少状态转换的开销。另外,尽管在较长的空隙内关闭 ONU、OLT 收机模块、发机模块有助于节能,但是会导致 ONU 内数据分组平均时延增加,无法很好保障用户的服务质量要求。因此,有效的节能 DWBA 策略除了要考虑如何减少网络能耗外,同时还必须满足用户的时延约束要求。

在离线调度方式中,每一个轮询周期内 OLT 收到所有 ONU 的 report 帧才开始授权,从而可利用离线调度的统计复用性合理确定激活波长数、数据传输开始时间和传输窗口大小,以及 OLT、ONU 中收机模块、发机模块的关闭/开启时间,有利于进一步提高全网节能效率。但是,已有离线节能 DWBA 算法^[10,19-20]要么仅考虑 OLT 节能,要么分别考虑 OLT、ONU 节能,而忽略了二者协同考虑对全网节能效果的影响。在这些算法中,OLT 始终记录每条波长信道的使用情况,在每个轮询周期内顺序授权所有 ONU,主要通过减少激活波长数来降低 OLT 端能耗。而且 OLT 端的收机、发机一旦开启,在整个轮询周期内将一直保持激活状态,即使在无数据传输的信道空隙内,收机、发机也一直保持激活,无疑会产生不必要的能量浪费,如图 1(a) 所示。图中表示 4 个轮询周期中 OLT 在波长 λ_1 和 λ_2 对 ONU₁ 和 ONU₂ 进行资源调度的情况。在每个轮询周期内,OLT 根据每个 ONU 的 report 帧到达时间、带宽请求以及分组时延约束条件,激活所需波

长对应的收机、发机，而关闭其余波长对应收机、发机。由于收机、发机一旦开启，在整个轮询周期将不再关闭。因此，在 λ_1 信道上即使空隙 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 中并无数据传输，也未关闭相应收机、发机因此造成能量浪费。另外，在已有算法中，ONU 仅支持活跃状态（收机、发机均开启）、假寐状态（发射机关闭、接收机开启）和睡眠状态（收机、发机均关闭），而未引入传输状态（发射机开启、接收机关闭）^[6]。因此，即使 ONU 下行数据先于上行数据传输结束时，接收机也要等待发射机传送数据结束后才能同时关闭。在这段等待时间内即使无数据传输接收机也保持开启，从而导致不必要的能量浪费，如图 1(a) 中 ONU₁ 在轮询周期 2 和轮询周期 3 的空白区域 V_5 和 V_6 所示。实际上，ONU 在接收数据结束后可以立刻关闭接收机，实现降低其能耗的目的。

EE-DWBA-DC 算法从两方面考虑降低网络总能耗：一是减少激活波长数，从而减少开启的收机、

发机个数；二是对 OLT 和 ONU 协同调度，通过合理授权波长信道、传输窗口位置和大小，尽可能减少 OLT、ONU 的状态转换次数和高能耗空隙的产生。当波长信道上无数据传输的时长超过将 OLT 从低功耗状态唤醒所需时钟恢复与同步等时间开销时，可关闭 OLT 端的收机模块、发机模块，使其进入低功耗状态以减少能耗。同时，在 ONU 端支持活跃、假寐和休眠状态基础上引入传输状态^[6]，使其接收完下行数据后立即关闭接收机以提高节能效率。采用离线调度的 EE-DWBA-DC 算法如图 1(b) 所示，OLT 收到全部 ONU 的 report 帧后，依据 ONU 带宽需求和数据分组时延约束条件，计算出下一轮询周期所需激活波长数以及各个 ONU_{*i*} 的最早和最晚开始上传时间 $t_{i,j}$ 和 $t'_{i,j}$ ，然后为 ONU_{*i*} 选择合适的波长信道来调整其上传时间，以减少高能耗空隙的产生和 OLT、ONU 的状态转换次数，并延长其处于低功耗状态的时间，以达到全网综合节能效果最佳。

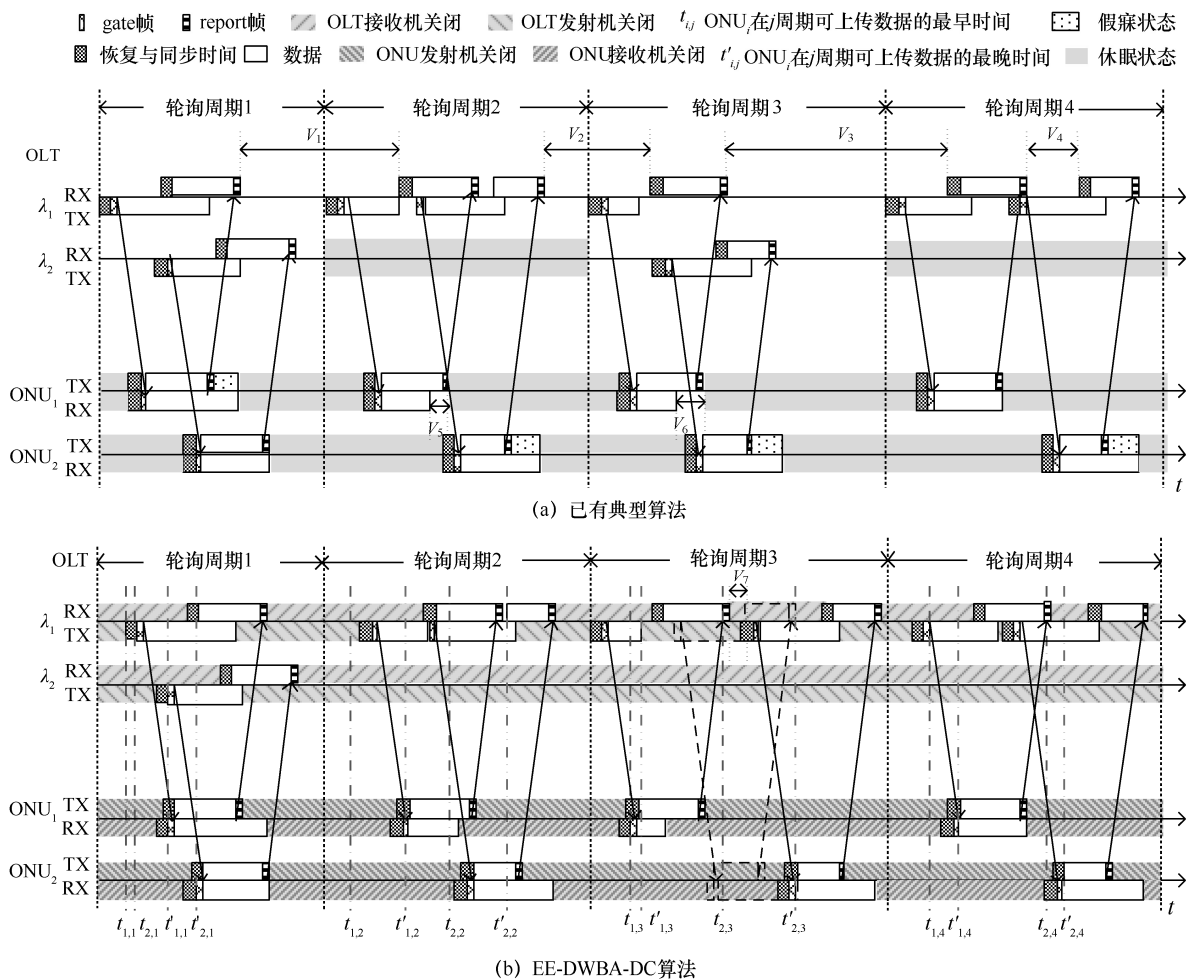


图 1 不同算法动态波长和带宽分配方式比较

图 1(b)所示的轮询周期 1 中, 由于 ONU₂ 的最晚上传时间 $t'_{2,1}$ 小于 ONU₁ 在 λ_1 上的最晚上传结束时间, 因此, 需要新激活波长 λ_2 进行传输。而在轮询周期 2, 由于 ONU₁ 的上传结束时间介于 ONU₂ 的最早上传时间 $t_{2,2}$ 和最晚上传时间 $t'_{2,2}$ 之间, 因此, ONU₁ 和 ONU₂ 可利用同一波长传输数据, 可减少激活波长数。在轮询周期 3, ONU₂ 最晚上传时间 $t_{2,3}$ 大于 ONU₁ 在 λ_1 的上传结束时间, 如果按照已有典型算法进行调度 (图中虚线所示), 会导致两次上行数据传输间的空隙较短, 产生高能耗空隙 (图中 V_7), 因此, 所提算法将延后 ONU₂ 的上传开始时间以增大空隙长度, 使其足以满足 OLT 收、发机状态转换所需时间开销, 从而可以关闭相应收机、发机, 增加其处于低功耗状态时间, 可进一步提高节能效率。在轮询周期 4, 由于 ONU₂ 最晚上传时间 $t_{2,4}$ 在 ONU₁ 的上传结束时间之后, 并且超出 OLT 收机状态、发机状态的转换时间, 所提算法使 ONU₂ 在其最晚上传时间开始传输数据, 既可以关闭 OLT 收机、发机进入低功耗状态, 同时又可以降低 ONU₂ 的数据包时延, 满足其 QoS 要求。

比较图 1(a)和图 1(b)可以看出: 与已有典型算法相比, 本文所提算法在传输中始终保持激活波长数最少, 如在轮询周期 2、轮询周期 3 和轮询周期 4 中均只激活一条波长, 而且 OLT、ONU 端处于低功耗状态的时间均有所增加, 图 1(b)中从轮询周期 2 开始, OLT 端 λ_2 对应收机、发机均保持关闭状态。与此同时, 通过合理调整 ONU 传输开始时间, 也有利于减少出现高耗能空隙 (如 V_7) 和状态转换所需开销, 使全网的节能效果得到提升。

3 算法描述

EE-DWBA-DC 算法基于离线调度方式, OLT 和 ONU 端采用模块化设计, 可分为接收模块、发射模块和基础模块 3 部分^[9-10]。当信道空闲时长大于激活 ONU、OLT 所需时钟恢复和同步等时长时, 可关闭相应收机模块、发机模块进行节能。每个轮询周期内 OLT 收到全部 ONU 的 report 帧后, 依据当前波长占用情况以及 ONU 的带宽请求和数据分组的时延约束要求, 计算出每个 ONU 数据分组的的最早上传时间和最晚上传时间, 并综合考虑 OLT 和 ONU 两端的节能效率, 为 ONU 合理分配可用波长、

上/下行数据传输开始时间以及传输窗口大小。在减少激活波长数的同时, 尽可能避免产生高能耗空隙, 减少 ONU、OLT 的状态转换次数, 从而降低全网能耗。

具体描述所提算法之前, 引入以下符号。

N : ONU 总数, ONU 编号为 $0, 1, \dots, i, \dots, N-1$ 。

W : 最多可用波长数, 波长编号为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_w, \dots, \lambda_W$ 。

$W_{ac,j}$: 轮询周期 j 需要使用的波长数。

E_j^{OLT} 、 E_j^{ONU} 和 E_j : 轮询周期 j 中 OLT 端能耗、ONU 端能耗和全网总能耗, 单位为 J。

P_{tx}^{OLT} 、 P_{rx}^{OLT} 和 P_{base}^{OLT} : OLT 端发射机、接收机和基础模块激活时所需能耗, 单位为 W 。

$T_{w,j}^{OLT}$ 、 $T'_{w,j}^{OLT}$: 轮询周期 j 中 OLT 端对应波长信道 λ_w 的发射机、接收机的激活时长。

P_{tx}^{ONU} 、 P_{rx}^{ONU} 和 P_{base}^{ONU} : ONU 端发射机、接收机和基础模块激活时所需能耗, 单位为 W 。

$T_{w,i,j}^{ONU}$ 、 $T'_{w,i,j}^{ONU}$: 轮询周期 j 中 ONU _{i} 对应波长信道 λ_w 的发射机、接收机的激活时长。

P_{tune}^{OLT} 、 P_{tune}^{ONU} : OLT、ONU 端收机模块、发机模块从关闭状态到激活状态所需能耗, 单位 W 。

C_j^{OLT} 、 C_j^{ONU} : 轮询周期 j 中 OLT 和 ONU 端收机、发机从关闭到激活状态的转换次数。

T_{ov} : OLT、ONU 从低功耗状态到激活状态转换所需时间。

$d_{i,l,j}^{up}$: 轮询周期 j 中 ONU _{i} 第 l 个上行数据分组时延。

$D_{cons_up,i,j}$: 轮询周期 j 中 ONU _{i} 上行数据分组允许的最大时延。

$D_{avg_up,i,j}$: 轮询周期 j 中 ONU _{i} 上行数据分组平均时延。

$X_{i,w}^j$: 轮询周期 j 中判断 ONU _{i} 是否在 λ_w 上传数据分组, 若上传数据分组, 其值为 1, 反之, 其值为 0。

RTT_i : ONU _{i} 的环路时延。

$T_{poll,j}$: 轮询周期 j 的长度。

BW_j : 轮询周期 j 所有 ONU 上行数据分组的总带宽请求。

$BW_{max,j}$: 轮询周期 j 中所有 ONU 的最大允许带宽。

T_g : 相邻 2 个发送时隙之间的保护间隔长度。

$t_{i,j}$ 、 $t'_{i,j}$: 轮询周期 j 中 ONU _{i} 的最早上传开始时

间和最晚上传开始时间。

$T_{w,i,j}$: 轮询周期 j 中为 ONU_i 授权时 λ_w 上的最早可用时间。

$T'_{w,i,j}$: 轮询周期 j 中 λ_w 可用于 ONU_i 上传数据的最早开始时间。

$T_{w,j}$: 轮询周期 j 中 λ_w 上所有授权 ONU 传输结束的时间。

R : 波长信道的传输速率。

$R_{i,j}$: 轮询周期 j 中 ONU_i 的上行带宽请求。

$T_{gate,i,j}$: 轮询周期 j 中 OLT 向 ONU_i 发送 $gate$ 帧的时间。

$T_{us,i,j,w}^{data}$: 轮询周期 j 中 ONU_i 在波长 λ_w 上实际上传数据分组的时间。

OLT 、 ONU 端在轮询周期 j 中的能耗与收机状态、发机状态、激活时长以及状态转换次数有关, 可按式 (1) 和式 (2) 计算。

$$E_j^{OLT} = \sum_{w=1}^W (P_{tx}^{OLT} \times T_{w,j}^{OLT} + P_{rx}^{OLT} \times T'_{w,j}^{OLT}) + P_{tune}^{OLT} \times T_{ov} \times C_j^{OLT} + P_{base}^{OLT} \times T_{poll,j} \quad (1)$$

$$E_j^{ONU} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{w=1}^W (P_{tx}^{ONU} \times T_{w,i,j}^{ONU} + P_{rx}^{ONU} \times T'_{w,i,j}^{ONU}) \times X_{i,w}^j + P_{tune}^{ONU} \times T_{ov} \times C_j^{ONU} + P_{base}^{ONU} \times T_{poll,j} \quad (2)$$

从而可求出轮询周期 j 全网总能耗为

$$E_j = E_j^{OLT} + E_j^{ONU} \quad (3)$$

EE-DWBA-DC 算法目的是最小化每个轮询周期内网络总能耗, 即

$$\min E_j = \min (E_j^{OLT} + E_j^{ONU}) \quad (4)$$

同时该算法还需要满足以下约束条件

$$d_{l,i,j}^{up} \leq D_{cons_up,i,j} \quad (5)$$

$$0 < W_{ac,j} \leq W \quad (6)$$

$$\sum_{w=1}^W X_{i,w}^j = 1 \quad (7)$$

式 (5) 保证轮询周期 j 中 ONU_i 的任意一个数据分组的时延都满足 ONU_i 的时延约束条件; 式 (6) 保证每个轮询周期激活波长数不超过波长总数; 式

(7) 保证每个轮询周期内每个 ONU 只能在一个波长上传数据分组。

EE-DWBA-DC 算法具体描述如下。

在轮询周期 ($j-1$) 中, OLT 收到所有 ONU 的 $report$ 帧后, 依据当前波长占用情况、 ONU 带宽请求以及数据分组时延要求计算出轮询周期 j 中需激活波长数、向每个 ONU 发送 $gate$ 帧的时间以及每个 ONU 授权的可用波长信道和传输窗口。该算法主要包括波长信道选择和传输窗口分配 2 个模块。

3.1 波长信道选择

OLT 授权 ONU 波长信道和传输窗口后, ONU 通过 $gate$ 帧获取授权信息, 在分配的波长和时隙内上传数据分组, 传输结束后可按授权信息关闭对应收机、发机以实现节能。对于离线调度而言, 到达 ONU 中每个数据分组最多等待一个轮询周期就可上传。根据参考文献[19]中计算轮询周期内数据分组平均时延公式, 可得出轮询周期 j 中 ONU_i 每个数据分组的平均时延为

$$D_{avg_up,i,j} \approx \frac{T_{poll,j}}{2} + T_{poll,j} + RTT_i \quad (8)$$

由式 (5) 可得

$$D_{avg_up,i,j} \leq D_{cons_up,i,j} \quad (9)$$

从而可得出

$$T_{poll,j} \leq \frac{2 \times (D_{cons_up,i,j} - RTT_i)}{3} \quad (10)$$

轮询周期长度 $T_{poll,j}$ 越大, 数据分组到达 ONU 后需等待上传的时间越长, 导致其数据分组平均时延增加。但是, 随着 $T_{poll,j}$ 增大, 每个 ONU 潜在的休眠时间增加, 更有利于节能。因此, EE-DWBA-DC 算法将在满足每个 ONU 中数据分组时延约束条件下, 尽可能延长每个轮询周期的长度。

OLT 端的能耗与激活波长数有关, 激活波长数越少, 可以关闭越多收机模块、发机模块, 有助于提升节能效果。与已有算法类似, EE-DWBA-DC 算法也是通过尽可能减少激活波长数达到节能的目的。在轮询周期 ($j-1$) 中, OLT 收到所有 ONU 的 $report$ 帧后, 可求出轮询周期 j 中 ONU 的总带宽需求为

$$BW_j = \sum_{i=0}^{N-1} R_{i,j} \quad (11)$$

同时可求出在长度为 $T_{poll,j}$ 的轮询周期 j 中使用 $W_{ac,j}$ 条波长最多能提供的总带宽为

$$BW_{max,j} = (W_{ac,j} \times T_{poll,j} - N \times T_g - T_{proj}) \times R \quad (12)$$

其中, $T_{\text{pro},j}$ 为轮询周期 j 中激活波长所需时间开销。当 $W_{\text{ac},j}$ 条波长信道都需激活时其值最大, 即

$$T_{\text{pro},j} \leq T_{\text{ov}} \times W_{\text{ac},j} \quad (13)$$

为了满足数据分组的时延约束条件, 则应满足

$$BW_{\text{max},j} \geq BW_j \quad (14)$$

由计算式(11)~式(14)可求出需使用最少波长数为

$$W_{\text{ac},j} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} R_{i,j} + N \times T_g \times R}{(T_{\text{poll},j} - T_{\text{ov}}) \times R} \quad (15)$$

在轮询周期 $(j-1)$, OLT 收到所有 ONU 的 report 帧后, 依据式 (15) 可计算出轮询周期 j 至少需使用波长数 $W_{\text{ac},j}$ 。

EE-DWBA-DC 算法除了尽量减少每个轮询周期内占用波长数以关闭更多波长信道, 同时还尽可能减少激活新波长。因此, 依据式 (16) 判断轮询周期 $(j-1)$ 结束时波长是否处于激活状态, 将轮询周期 $j-1$ 结束时未关闭的波长放入集合 Q_{j-1} 中。

$$Q_{j-1} = \left\{ \lambda_w \mid \sum_{k=1}^{j-1} T_{\text{poll},k} - T_{w,j-1} < T_{\text{ov}} \right\} \quad (16)$$

为了减少收机状态、发机状态改变次数, 轮询周期 j 总是优先选择 Q_{j-1} 中的波长信道为 ONU 授权。如果 Q_{j-1} 中的波长数 $|Q_{j-1}| \geq W_{\text{ac},j}$, 则将 Q_{j-1} 中波长按照可用时间由晚到早排序, 选择前面 $W_{\text{ac},j}$ 个波长为 ONU 授权, 其余 $(|Q_{j-1}| - W_{\text{ac},j})$ 个波长在接收完 ONU 的 report 帧后则关闭接收机以实现节能。否则, 表示当前激活波长数不满足周期 j 的数据传输需求, 需要按照波长序号由小到大依次新激活 $(W_{\text{ac},j} - |Q_{j-1}|)$ 个波长。随后, 更新轮询周期 j 的可用波长集 Q_j , 此时该集合包含 $W_{\text{ac},j}$ 个波长。

3.2 传输窗口分配

OLT 在可用波长集合 Q_j 为 ONU 授权传输窗口。首先计算轮询周期 j 中满足数据分组时延约束的 ONU _{i} 最早上传时间 $t_{i,j}$ 和最晚上上传时间 $t'_{i,j}$ 的计算方式分别为式(17)和式(18)。

$$t_{i,j} = T_{\text{gate},i,j} + \frac{RTT_i}{2} \quad (17)$$

$$t'_{i,j} = D_{\text{cons,up},i,j} - \frac{RTT_i}{2} - \frac{R_{i,j}}{R} \quad (18)$$

其次, 计算集合 Q_j 内波长 λ_w 可用于 ONU _{i} 上传数据的最早开始时间为

$$T'_{w,i,j} = T_{w,i,j} + Y_w^j \times T_{\text{ov}} + T_g \quad (19)$$

其中, Y_w^j 表示轮询周期 j 中 λ_w 是否为新激活波长, 如果是, 其值为 1, 否则, 其值为 0。为了保证 ONU _{i} 的数据分组时延约束限制, 必须保证其所选波长信道可用于上传数据分组的最早开始时间不晚于 $t'_{i,j}$ 。对集合 Q_j 内的波长按式(20)和式(21)分为 2 类, 分别放入集合 P_j 和 P'_j 。

$$P_j = \{ \lambda_w \mid t_{i,j} < T'_{w,i,j} < t'_{i,j}, \lambda_w \in Q_j \} \quad (20)$$

$$P'_j = \{ \lambda_w \mid T'_{w,i,j} < t_{i,j}, \lambda_w \in Q_j \} \quad (21)$$

OLT 在 Q_j 为 ONU _{i} 分配波长进行数据传输时, 有且仅有以下 2 种情况。

1) 当 $P_j \neq \emptyset$ 时, 即 Q_j 中存在波长, 其可用于 ONU _{i} 传输最早时间介于 ONU _{i} 最早和最晚上传时间之间, 则从中选择可最早上传数据分组的波长 λ_w 为 ONU _{i} 授权, 在 OLT 端可减少一次收机、发机关闭和开启的转换开销, 同时还可减少信道空闲导致的带宽浪费。可求出这种情况下 ONU _{i} 开始上传时间为

$$T_{\text{us},i,j,w}^{\text{data}} = T'_{w,i,j}, \lambda_w \in P_j \quad (22)$$

2) 当 $P_j = \emptyset$ 时, $P'_j \neq \emptyset$, 即 Q_j 中所有波长均满足式(21)。此时由于 ONU _{i} 的最早上传时间在所有波长可开始上传时间之后, 每条波长上都产生一个空隙。如果将 ONU _{i} 的上传数据时间延后, 以保证空隙长度超过接收机状态转换所需时间, 从而可在空隙内关闭 OLT 的接收机以实现节能。而且, ONU _{i} 上传数据的时间越晚, OLT 和 ONU _{i} 潜在地处于低功耗状态的时间越长。考虑到伴随一次状态转换, 需要额外消耗能量 E_{tune} 。因此, 在判断是否使空隙进入低功耗状态时, 还需在进入低功耗状态所节省能量与状态转换所消耗能量之间进行权衡。只有当节约能耗高于转换消耗能耗时才进入低功耗状态。具体而言, 从 P'_j 中依次选取波长 λ_w , 计算其上 ONU _{i} 延后数据上传时, 使 OLT 和 ONU 进入低功耗状态时可节约能耗为

$$\Delta E_{\text{OLT},w} = (T_{\text{us},i,j,w}^{\text{data}} - T_{w,i,j} - Y_w^j \times T_{\text{ov}}) \times (P_{\text{tx}}^{\text{OLT}} + P_{\text{rx}}^{\text{OLT}}) \quad (23)$$

$$\Delta E_{\text{ONU},w} = (T_{\text{us},i,j,w}^{\text{data}} - T_{w,i,j} - Y_w^j \times T_{\text{ov}}) \times (P_{\text{tx}}^{\text{ONU}} + P_{\text{rx}}^{\text{ONU}}) \quad (24)$$

如果使 OLT 进入低功耗状态而重新激活它需消耗能为

$$E_{\text{tune}} = P_{\text{tune}}^{\text{OLT}} \times T_{\text{ov}} \quad (25)$$

因此, 可求出节约能耗与状态转换能耗差值为

$$\Delta E_w = \Delta E_{\text{OLT},w} + \Delta E_{\text{ONU},w} - E_{\text{tune}} \quad (26)$$

当存在波长 $\lambda_w \in P'_j$ 满足 $\Delta E_w \geq 0$ 时, ONU_{*i*} 选择 $\max(T_{\text{us},i,j,w}^{\text{data}} - T'_{w,i,j})$ 所在波长 λ_w 进行传输, 从而可求出 ONU_{*i*} 开始上传时间为

$$T_{\text{us},i,j,w}^{\text{data}} = t'_{i,j} \quad (27)$$

否则, 所有波长 $\lambda_w \in P'_j$ 都满足 $\Delta E_w < 0$, ONU_{*i*} 选择 $\min(T_{\text{us},i,j,w}^{\text{data}} - T'_{w,i,j})$ 所在波长 λ_w 进行传输, 从而可求出 ONU_{*i*} 开始上传时间为

$$T_{\text{us},i,j,w}^{\text{data}} = t_{i,j} \quad (28)$$

OLT 向 ONU 发送 gate 帧授权波长信道和传输窗口后立即发送下行数据, ONU 端收到 gate 帧后依据授权时间开启发射机进行数据传输, 当数据传输完毕后, OLT、ONU 关闭相应收机模块、发机模块, 进入下一轮询周期。算法流程如图 2 所示。

4 仿真及数据分析

本节利用 OPNET 14.5 仿真软件搭建 TWDM-PON 仿真平台, 对 EE-DWBA-DC 算法进行评测, 并与 TESM^[10]、EWA^[5]和 OFF-DWBA^[19-20]3 种离线调度节能算法进行对比。由于 EWA 算法^[5]并未考虑 ONU 端节能, 为了更客观地对比几种算法的节能效果, 仿真时 EWA 算法加入了 ONU 端的节能机制。仿真性能指标包括 OLT 节能率、ONU 节能率、全网总节能率以及上行分组平均时延。

OLT 节能率、ONU 节能率定义为仿真时间内所有轮询周期 *j* 中不同节能算法在 OLT 端或 ONU 端节约能耗与不采用节能算法时所有 OLT 模块或 ONU 模块始终处于激活状态的能耗之比, 如式(29)和式(30)所示。全网总节能率指所有轮询周期 *j* 中不同节能算法在 ONU 端和 OLT 端节约总能耗与不采用节能算法时全网总能耗之比, 如式(31)所示。

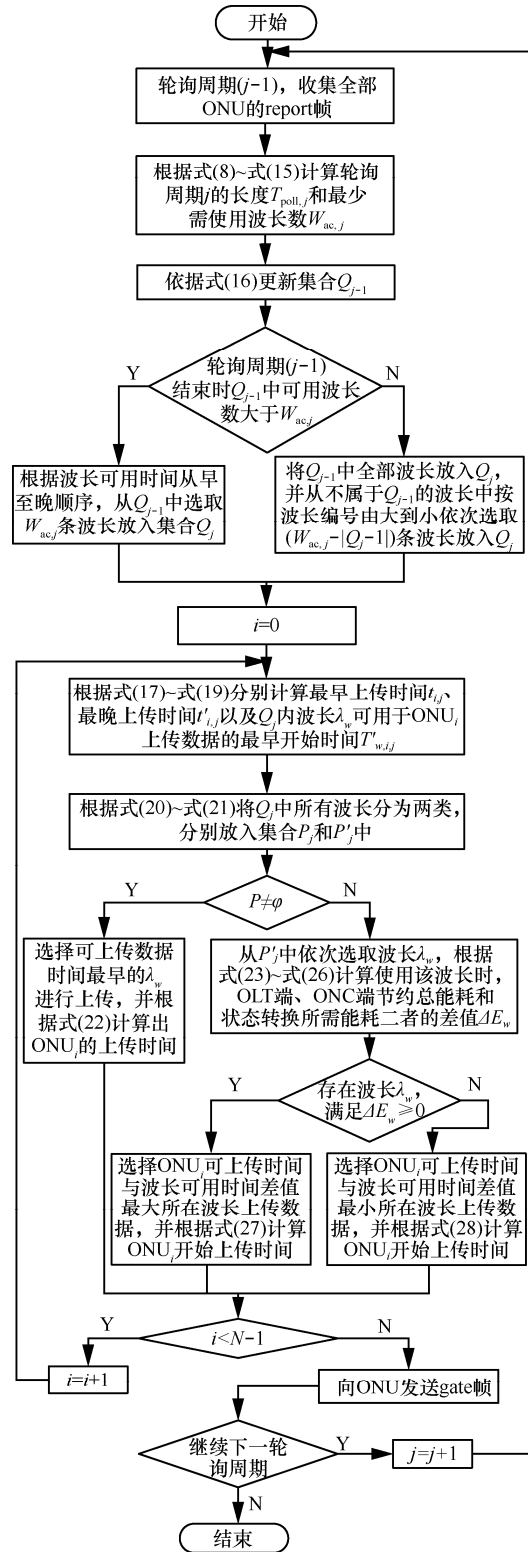


图2 EE-DWBA-DC 算法流程

$$\eta_{\text{OLT}} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{w=1}^W (P_{\text{tx}}^{\text{OLT}} \times T_{w,j}^{\text{OLT}} + P_{\text{tx}}^{\text{OLT}} \times T'_{w,j}^{\text{OLT}} + P_{\text{tune}}^{\text{OLT}} \times T_{\text{ov}} \times C_j^{\text{OLT}}) + \sum_{j=1}^J P_{\text{base}}^{\text{OLT}} \times T_{\text{POLL},j}}{\sum_{j=1}^J [P_{\text{base}}^{\text{OLT}} \times T_{\text{poll},j} + (P_{\text{tx}}^{\text{OLT}} + P_{\text{rx}}^{\text{OLT}}) \times T_{\text{poll},j} \times W]} \quad (29)$$

$$\eta_{\text{ONU}} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=0}^{N-1} (P_{\text{tx}}^{\text{ONU}} \times T_{w,i,j}^{\text{ONU}} + P_{\text{rx}}^{\text{ONU}} \times T_{w,i,j}^{\text{ONU}} + P_{\text{base}}^{\text{ONU}} \times T_{\text{POLL},j} + P_{\text{tune}}^{\text{ONU}} \times T_{\text{ov}})}{N \times \sum_{j=1}^J (P_{\text{tx}}^{\text{ONU}} + P_{\text{rx}}^{\text{ONU}} + P_{\text{base}}^{\text{ONU}}) \times T_{\text{POLL},j}} \quad (30)$$

$$\eta_E = 1 - \frac{\sum_{j=1}^J \left[\sum_{i=0}^{N-1} (P_{\text{tx}}^{\text{ONU}} \times T_{w,i,j}^{\text{ONU}} + P_{\text{rx}}^{\text{ONU}} \times T_{w,i,j}^{\text{ONU}} + P_{\text{tune}}^{\text{ONU}} \times T_{\text{ov}}) + \sum_{w=1}^W (P_{\text{tx}}^{\text{OLT}} \times T_{w,j}^{\text{OLT}} + P_{\text{rx}}^{\text{OLT}} \times T_{w,j}^{\text{OLT}} + P_{\text{tune}}^{\text{OLT}} \times T_{\text{ov}} \times C_j^{\text{OLT}}) + (N \times P_{\text{base}}^{\text{ONU}} + P_{\text{base}}^{\text{OLT}}) \times T_{\text{POLL},j} \right]}{\sum_{j=1}^J [N \times (P_{\text{tx}}^{\text{ONU}} + P_{\text{rx}}^{\text{ONU}} + P_{\text{base}}^{\text{ONU}}) + P_{\text{base}}^{\text{OLT}} + (P_{\text{tx}}^{\text{OLT}} + P_{\text{rx}}^{\text{OLT}}) \times W] \times T_{\text{POLL},j}} \quad (31)$$

仿真拓扑场景包括一个 OLT、一个光分路器和 64 个 ONU，OLT 和 ONU 之间上/下行最多可用 4 对波长信道，每条波长信道的 $R=10^{10}$ bit/s。ONU 和 OLT 端支持模块化设计，可关闭部分收机模块、发机模块进入低功耗状态。ONU 与 OLT 之间的距离在 30~50 km 范围内随机分布。上/下行数据产生均服从 H 参数为 0.8 的 Pareto 分布，数据分组长度在 64~1 518 byte 内均匀分布，其他仿真参数如表 1^[10,13,19-20]所示。与参考文献[19-20]类似，在数据分组时延限制分别为 7.5 ms、10 ms 和 15 ms 下对 4 种算法的性能进行仿真比较。

图 3 比较了不同分组时延约束下 EE-DWBA-DC、TESM、EWA 和 OFF-DWBA 4 种算法 OLT 节能率随相对网络负载变化的情况。相对网络负载定义为网络中每秒产生上行数据的总比特数与 $W=4$ 条上行链路支持最大速率的比值，如式(32)所示，其中 R_i 表示 ONU_i 每秒产生的比特数。

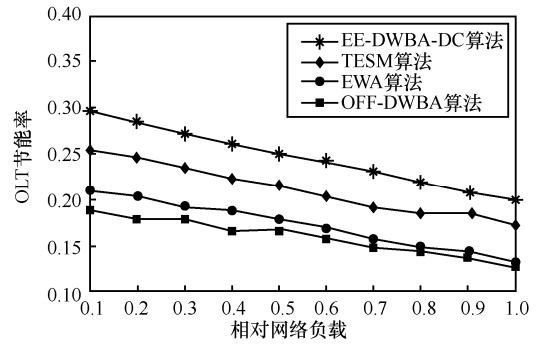
$$\Phi = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} R_i}{W \times R} \quad (32)$$

表 1 仿真参数设置

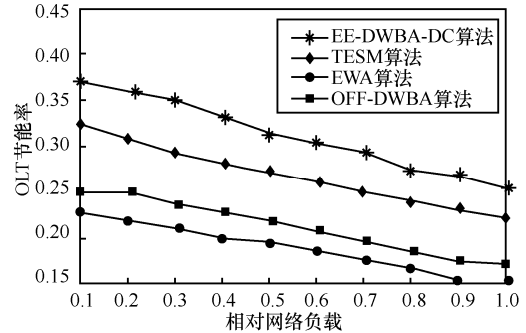
参数	数值	参数	数值
T_g	5 μs	$P_{\text{rx}}^{\text{ONU}}$	4.4 W
T_{ov}	2 ms	$P_{\text{base}}^{\text{ONU}}$	0.7 W
$P_{\text{tune}}^{\text{OLT}}$	11 W	$P_{\text{tx}}^{\text{OLT}}$	6.875 W
$P_{\text{tune}}^{\text{ONU}}$	5.1 W	$P_{\text{rx}}^{\text{OLT}}$	4.125 W
$P_{\text{tx}}^{\text{ONU}}$	0.684 W	$P_{\text{base}}^{\text{OLT}}$	64 W

从图 3 可以看出，4 种算法的 OLT 节能率都随网络负载增加而减小，其中 EE-DWBA-DC 算法的 OLT 节能率最高，EWA 算法的 OLT 节能率最低，

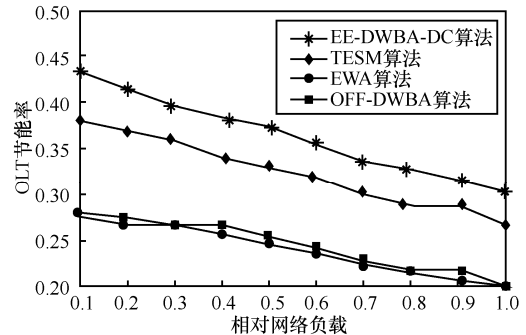
而 TESH 算法和 OFF-DWBA 算法的 OLT 节能率分别介于二者之间，并且 TESH 算法的 OLT 节能率优于 OFF-DWBA 算法。这是因为随着网络负载增加，为了保障用户分组的时延要求，需要激活更多波长进行数据传输。相应地，OLT 端需开启更多收机模块、



(a) 数据分组时延限制 7.5 ms



(b) 数据分组时延限制 10 ms



(c) 数据分组时延限制 15 ms

图 3 不同算法的 OLT 节能率比较

发机模块，导致其处于低功耗状态的时间减少。因而，4 种算法 OLT 端的能耗增加，其节能率下降。由于 EWA 算法仅关闭接收机，发射机始终保持激活状态，因此，节能效果不及其他算法，但 OLT 端节能率最低。而 OFF-DWBA 算法收机、发机需同时开启/关闭，灵活性较差，即使仅有上行或下行数据传输时，也要开启收机、发机，导致不必要的能量浪费，因此，其 OLT 端节能率略优于 EWA 算法而较其他 2 种算法差。由于 TESM 算法可以单独开启和关闭收机、发机，其 OLT 节能效果优于 EWA 算法和 OFF-DWBA 算法。但是，由于每个轮询周期内 OLT 端收机和发机一经开启则整个轮询周期内保持激活，因此 OLT 端节能效果不及 EE-DWBA-DC 算法。EE-DWBA-DC 算法尽可能减少每个轮询周期内激活波长数和延长轮询周期长度，通过合理授权波长信道和传输窗口，有利于减少 OLT 状态转换次数、延长 OLT 处于低功耗状态的时间，同时还尽可能避免产生高能耗空隙，因此，其 OLT 端节能率最好。

另外，从图中还可看出，4 种算法的 OLT 节能率都随数据分组时延约束值的增大而增加。这是因为随着数据分组时延限制值增大，每个 ONU 可以上传数据的最晚时间随之增大，因而 OLT 对 ONU 的可调节性增强，有利于将网络负载集中在更少波长信道传输，从而减少激活波长数以关闭更多收机模块、发机模块，使 OLT 端能耗降低。由于 EE-DWBA-DC 算法考虑 OLT 和 ONU 的协同节能，无论数据分组时延约束值如何变化，其 OLT 节能率都优于其他 3 种算法。

图 4 对比了不同数据分组时延约束条件下 4 种算法 ONU 节能率随相对网络负载变化的情况。从图中可以看出，4 种算法 ONU 节能率都随网络负载增加而减小，其中 EE-DWBA-DC 算法的 ONU 节能率最高，OFF-DWBA 算法最低，而 TESM 算法和 EWA 算法分别介于二者之间，并且 TESM 算法 ONU 节能率高于 EWA 算法。这是因为随着网络负载增加，ONU 需要上传/接收更多上/下行分组，相应地，收机、发机处于开启状态的时间更长，导致其处于低功耗状态的时间更少。因此，其能耗增加、节能率降低。由于 EE-DWBA-DC 算法和 TESM 算法在 ONU 引入传输状态（发射机开启、接收机关闭），当下行数据早于上行数据传输结束时，可提前关闭 ONU 接收机以节能。因此，其 ONU 节能率

明显高于 EWA 算法和 OFF-DWBA 算法。EWA 算法在 ONU 端同时进行上/下行数据传输，因而 ONU 处于低功耗状态的时间相对 OFF-DWBA 算法更长，节能率更高。另外，从图中还可看出，4 种算法的 ONU 节能率都随分组时延约束值增大而增大。这是因为随着分组时延约束时间增加，相应地可以增加每个轮询周期的长度，潜在地有利于延长 ONU 处于低功耗状态的时间，进一步降低其能耗，提高节能率。与 OLT 端类似，无论数据分组时延约束值如何变化，联合考虑 OLT 和 ONU 节能的 EE-DWBA-DC 算法的 ONU 节能率都优于其他 3 种算法。

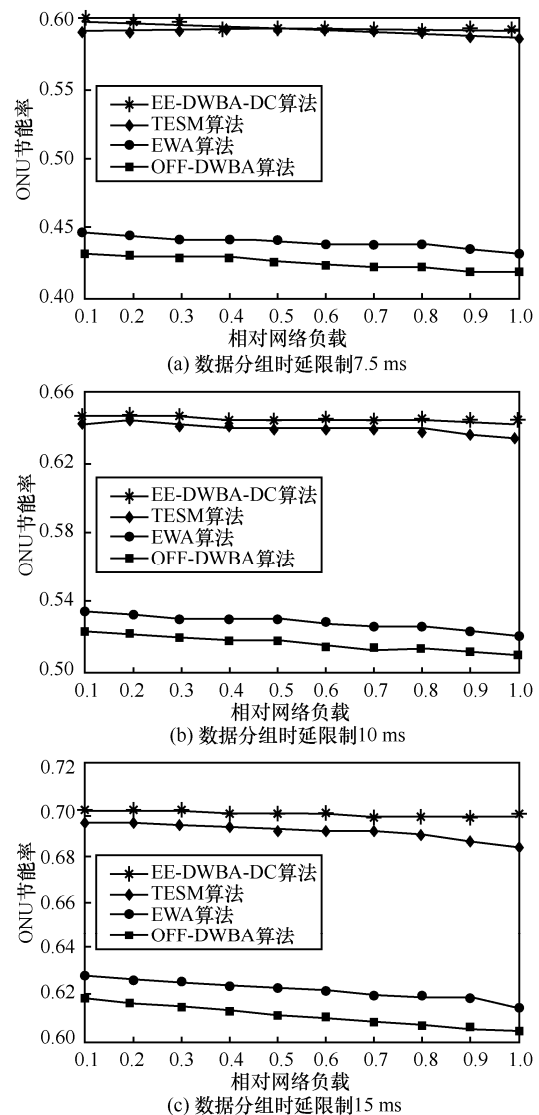


图 4 不同算法的 ONU 节能率比较

图 5 对比了不同数据分组时延约束条件下 4 种算法全网总节能率随相对网络负载变化的情况。与

图 2 和图 3 类似, 4 种算法全网总节能率都随网络负载增加而减小, 其中 EE-DWBA-DC 算法的总节能率最高, OFF-DWBA 算法最低, 而 TESM 算法和 EWA 算法介于二者之间, 并且 TESM 算法的总节能率高于 EWA 算法。另外, 4 种算法的全网总节能率都随数据分组时延约束值增大而增大, 而且在不同数据分组时延约束条件下, EE-DWBA-DC 算法的全网总节能率都优于其他 3 种算法。

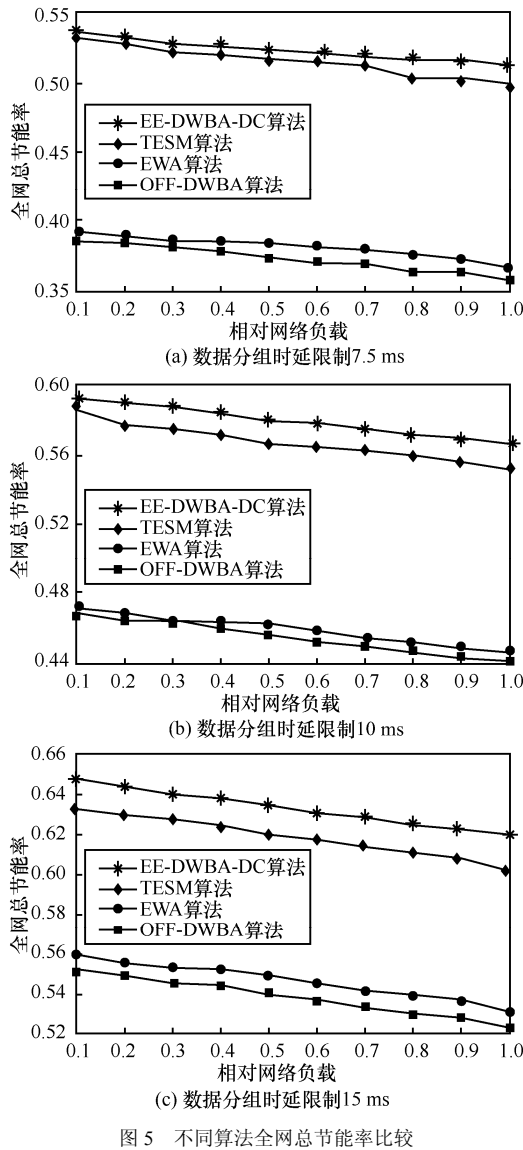


图 5 不同算法全网总节能率比较

图 6 对比了不同数据分组时延约束条件下 4 种算法的上行数据分组平均时延随相对网络负载变化的情况。从图中可以看出, 4 种算法上行分组平均时延都随网络负载增加而增加, 同时也随数据分组时延约束值增大而增大, 其中 EWA 算法和 TESM 算法的数据分组平均时延性能优于 EE-DWBA-DC 算法和 OFF-DWBA 算法, 但 EE-DWBA-DC 算法的分组平均时延低于 OFF-DWBA 算法。主要原因是随着网络负载增加, 数据分组在 ONU 中的排队时延相应增加, 导致其平均时延增大。为了更大限度地节能, EE-DWBA-DC 算法在保证 ONU 时延约束条件下, 尽可能延长每个轮询周期的长度, 而且 OLT 根据当前波长使用情况和分组时延要求动态调整 ONU 数据上传时间, 而不同于 TESM 算法和 EWA 算法, 总是利用最早可用时刻上传数据, 因此其数据分组平均时延较大。另外, 由于 EE-DWBA-DC 算法满足了 ONU 中每个分组都满足时延约束条件, 而 OFF-DWBA 算法仅考虑满足 ONU 所有分组的平均时延满足约束要求, 因此, OFF-DWBA 算法的分组时延性能不及 EE-DWBA-DC 算法。

算法和 OFF-DWBA 算法, 但 EE-DWBA-DC 算法的分组平均时延低于 OFF-DWBA 算法。主要原因是随着网络负载增加, 数据分组在 ONU 中的排队时延相应增加, 导致其平均时延增大。为了更大限度地节能, EE-DWBA-DC 算法在保证 ONU 时延约束条件下, 尽可能延长每个轮询周期的长度, 而且 OLT 根据当前波长使用情况和分组时延要求动态调整 ONU 数据上传时间, 而不同于 TESM 算法和 EWA 算法, 总是利用最早可用时刻上传数据, 因此其数据分组平均时延较大。另外, 由于 EE-DWBA-DC 算法满足了 ONU 中每个分组都满足时延约束条件, 而 OFF-DWBA 算法仅考虑满足 ONU 所有分组的平均时延满足约束要求, 因此, OFF-DWBA 算法的分组时延性能不及 EE-DWBA-DC 算法。

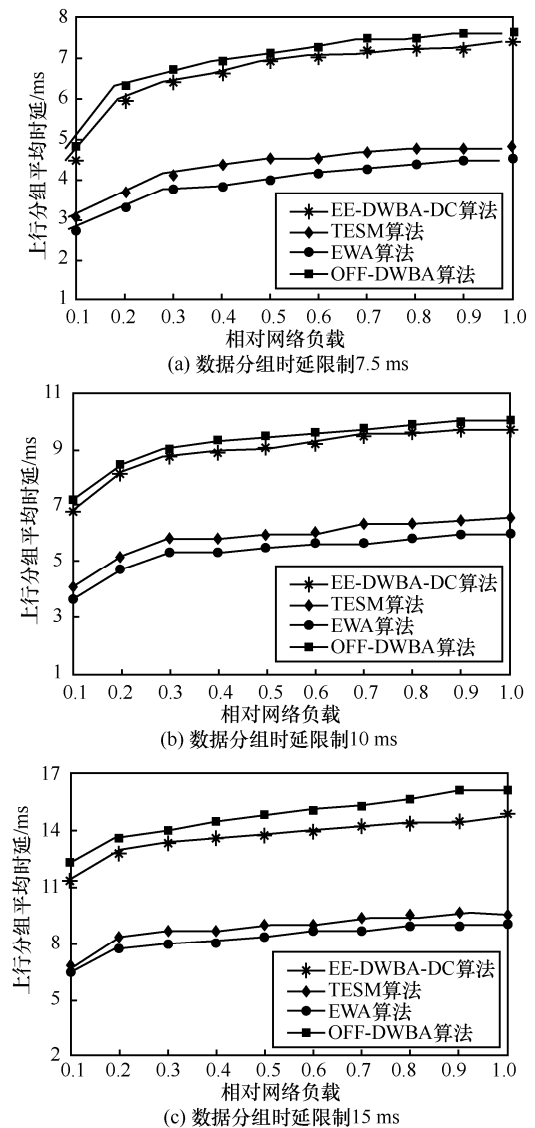


图 6 不同算法上行数据分组平均时延比较

5 结束语

本文针对 TWDM-PON 提出一种基于离线调度方式的时延约束节能 DWBA 算法 (EE-DWBA-DC), 该算法在 ONU 端和 OLT 端引入模块化设计, 联合考虑二者节能机制的相互影响, 为 ONU 动态授权合适波长信道和传输窗口。在满足数据分组时延约束条件下, 尽可能减少激活波长数, 同时每个 ONU 允许的最早和最晚上传时间内, 为其选择合适的波长信道并适当提前或延后其实际上传时间, 以尽量集中 OLT 端、ONU 端的上/下行工作时间, 延长节点进入低功耗状态时间, 减少节点状态转换次数。另外, 还尽量避免产生高能耗空隙, 进一步减少能量浪费。最后, 利用 OPNET 仿真平台对 EE-DWBA-DC 算法性能进行评测, 并与参考文献[5,10,19-20]中已有 3 种算法进行对比。仿真结果表明: EE-DWBA-DC 算法在满足数据分组时延约束前提下, OLT 节能率、ONU 节能率和全网总节能率都优于这 3 种算法。

参考文献:

- [1] DHAINI A R, HO P H, SHEN G. Toward green next-generation passive optical networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(11): 94-101.
- [2] VETTER P, SUVAKOVIC D, CHOW H, et al. Energy-efficiency improvements for optical access[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(4): 136-144.
- [3] NESSET D, PON Roadmap[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2017, 9(1): 71-76.
- [4] EFFENBERGER F, PENG G, ZHOU X, 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.
- [5] GARFIAS P, SALLEN T S, GUTERREZ, et al. A novel traffic-aware mechanism for energy-saving at the OLT in WDM/TDM-PON[C]//8th Conference on Network and Optical Communications (NOC). 2013: 225-232.
- [6] 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.
- [7] NEWAZ S H S, MIN S J, ALAELDDIN F Y M, et al. Building an energy-efficient uplink and downlink delay aware TDM-PON system[J]. Optical Fiber Technology, 2016, 29: 34-52.
- [8] NIKOUKAR A, LIEM A T, 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.
- [9] 熊余, 管建军, 王汝言. 支持 ONU 模块独立不连续收发数据的节能方法[J]. 通信学报, 2015, 36(7): 71-79.
XIONG Y, GUAN J J, WANG R Y. Energy-saving scheme supporting ONU modularization with independent-discontinuous transceiving[J]. Journal on Communications, 2015, 36(7): 71-79
- [10] XIONG Y, SUN P, LIU C, et al. Traffic-aware energy saving scheme with modularization supporting in TWDM-PON[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 33: 7-15.
- [11] JUNG J H, YANG W H, KIM Y C. A bandwidth allocation algorithm for improving QoS in EPON with sleep mode[C]//International Conference on Information Networking (ICOIN). 2012: 324-328.
- [12] SHI L, MUKHERJEE B, LEE S S. Energy-efficient PON with sleep-mode ONU: progress, challenges, and solutions[J]. IEEE Network, 2012, 26(2): 36-41.
- [13] DUTTA S, ROY D, BHAR C, et al. Online scheduling protocol design for energy-efficient TWDM-OLT[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2018, 10(3):260-271.
- [14] RUI W, HAN H L, SANG S L, et al. Energy saving via dynamic wavelength sharing in TWDM-PON[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(8):1566-1574.
- [15] YANG H, SUN W, HU W, et al. ONU migration in dynamic time and wavelength division multiplexed passive optical network (TWDM-PON)[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 21491-21499.
- [16] YANG H, SUN W, LI J, et al. Energy efficient TWDM multi-PON system with wavelength relocation[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2014, 6(6): 571-577.
- [17] DIXIT A, LANNOO B, COLLE D, et al. Novel DBA algorithm for energy efficiency in TWDM-PONs[C]//39th European Conference and Exhibition on Optical Communication. 2013:1-3.
- [18] VAN D P, KONDEPU K, VALCARENGHI L, et al. Trading energy savings and network performance in reconfigurable TWDM-PONs[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2015, 7(5): 470-471.
- [19] DIAS M P I, WONG E, VAN D P, et al. Offline energy-efficient dynamic wavelength and bandwidth allocation algorithm for TWDM-PONs[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). 2015: 5018-5023.
- [20] VAN D P, WONG E, VALCARENGHI L, et al. Energy-efficient framework for time and wavelength division multiplexed passive optical networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2015, 7(6): 496-504.
- [21] LIU X, ROUSKAS G N, HE F, et al. Multipoint control protocol with look-ahead for wavelength division multiplexed Ethernet passive optical network[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2014, 6(2): 104-113.

[作者简介]



于存谦 (1983-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 大连海事大学讲师, 主要研究方向为光网络技术。

唐明珠 (1993-), 女, 辽宁辽阳人, 大连海事大学硕士生, 主要研究方向为光网络技术。

何荣希 (1971-), 男, 四川南充人, 博士, 大连海事大学教授, 主要研究方向为光网络和无线网络技术。