

新颖的 WDM EPON 动态带宽调度算法

汪学舜¹, 余少华^{1,2}, 戴锦友²

(1.华中科技大学 计算机学院, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉邮电科学研究院 新一代光纤通信技术和网络国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 对 WDM EPON 的 ONU 授权调度技术进行了研究, 采用调度理论的方法来解决授权调度问题。将授权调度和波长分配进行结合, 并将其形式化为矩形 Packing 问题, 采用拟人的策略, 提出了基于欧氏距离的高效用 ONU 带宽分配策略, 为 WDM EPON 中 ONU 授权调度问题的快速求解提供了一种高效的启发式算法。进一步模拟实验表明, 提出的算法可以减少平均分组时延, 提高网络带宽利用率, 表明算法对授权调度的有效性。

关键词: 动态带宽分配; 波分复用; 以太网无源光网络; 拟人法; 调度策略

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)02-0069-07

Novel algorithm for dynamic bandwidth scheduling in WDM EPON

WANG Xue-shun¹, YU Shao-hua^{1,2}, DAI Jin-you²

(1.School of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074,China;

2. State Key Laboratory for New Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan Research Ins. of Posts and Telecoms, Wuhan 430074, China)

Abstract: Optical network unit (ONU) grant scheduling techniques for wavelength division multiplexed Ethernet passive optical networks (WDM EPON) was investigated and the grant scheduling problem based on scheduling theory was solved the question was formulated into a rectangle packing problem and a high performance ONU grant scheduling policy based on Euclidian distance was proposed by taking quasi-human strategy. An effective heuristic algorithm was provided to quickly solve ONU grant scheduling problem in WDM EPON. Further simulation experiments show the grant scheduling algorithm can decrease average packet delay and increase network utilization. The results indicate the effectiveness of this algorithm.

Key words: dynamic bandwidth allocation; wavelength division multiplexed; Ethernet passive optical network; quasi-human strategy; scheduling policy

1 引言

高速 Internet 接入网中, 以太网无源光网络 (EPON) 成为新出现的有吸引力的方法, 在 EPON 初始阶段, 光线路终端 OLT (optical line terminal) 到光网络单元 ONU (optical network unit) 的下行流和上行流分别采用一个单波长^[1], 然而, 随着带宽需求

的增长和传输质量保证要求更高, 在每一个方向采用多波长传输的波分复用 (WDM) 技术得到越来越多的研究^[2]。

WDM EPON 的网络结构与传统的 EPON 结构类似^[3], 由一个 OLT、 N 个 ONU 以及一个 1: N 无源光纤分路器组成的树形拓扑结构。OLT 发送数据帧, 通过光纤分路器, 发送到 ONU 的数据传输,

收稿日期: 2010-07-05; 修回日期: 2010-11-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (2005AA 121410)

Foundation Item: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2005AA 121410)

称为下行传输；反之，由 ONU 发送到 OLT 的数据传输，称为上行传输。在 WDM EPON 系统中，为了保证上行传输的以太数据帧不发生碰撞，IEEE 802.3ah 工作组提出了多点控制协议(MPCP)，MPCP 定义 2 种类型控制消息，REPORT 和 GATE 消息^[4]，REPORT 消息用于 ONU 向 OLT 通告自己需要传输的数据量，OLT 收到 ONU 的 REPORT 消息之后，通过动态带宽分配计算(DBA)发送 GATE 消息，向 ONU 通告下一周期授权的传输数据量。为了区分 WDM EPON 系统中上行和下行波长，McGarry 等人对传统的 MPCP 协议进行了扩展。

WDM EPON 中的动态带宽分配由授权调度和授权带宽组成。在文献[5]中研究了各种授权带宽技术，本文采用基于门限的授权带宽技术，重点对 WDM EPON 动态带宽分配的授权调度进行研究。OLT 收到 ONU 的报告消息之后，立即进行授权的在线调度机制，由于公平性较差，对多波长传输，效率较低。OLT 收到所有或部分 ONU 的报告消息之后，进行统一带宽分配的离线调度，是主要的调度方式。本文针对离线调度机制，采用调度理论方法解决授权调度问题，将授权调度和波长分配结合，形式化为矩形 Packing 问题，由于矩形 Packing 问题是一个 NP 难问题，采用启发式的近似算法可有效解决调度问题。

本文组织结构如下：第 2 节对 WDM EPON 的调度策略相关研究进行回顾；第 3 节对 WDM EPON 中 ONU 授权调度问题进行模型化，并说明带宽分配策略；第 4 节提出了多波长高效用带宽分配算法解决带宽授权调度问题；第 5 节对算法的计算复杂性进行分析；第 6 节对不同的调度技术进行模拟实验，并进行分析和比较；第 7 节为结束语。

2 相关研究

WDM EPON 网络中的波长和带宽动态分配可分为 2 个部分：授权大小和授权调度^[6]，每一个 ONU 可分配的带宽大小取决于授权大小(即带宽分配)，过去几年，有很多高效的算法，值得注意的是：单信道 EPON 提出的自适应周期交叉轮循机制(IPACT)，已经扩展到 WDM EPON 网络中，在文献[7]中，Kwong 等人提出多个上行波长的 IPACT 方式，称之为 WDM IPACT-ST，其中 ST 表示单个轮循表。该算法对所有上行波长的可用时间进行跟踪，一旦收到 ONU 的报告消息，OLT 将第一个可

用波长的带宽或传输窗口分配给 ONU，同时假定每一个 ONU 支持所有的波长。文献[8]提出了一种类似于 WDM IPACT 的调度，选择下一个 ONU 可用波长进行调度，而 WDM IPACT-ST 不支持这种适用性。

Dhaini 等人在文献[9]中对基本的 WDM PON 结构中动态波长和带宽分配(DWBA)算法进行了研究，提出了以下 3 种可变动态波长和时间的带宽分配。

1) DWBA-1 在一个周期内，所有报告消息收到之后进行调度，DWBA-1 对过量带宽进行公平分配。2) DWBA-2 对轻载 ONU，在收到报告消息之后，立即调度，对重载 ONU，收到所有 ONU 报告消息之后，进行调度。当限制授权大小的时候，对轻载 ONU 的多余带宽，由重载 ONU 进行分配，所有的报告消息必须在一个周期内传送，以便确定该周期中超过部分。因此，OLT 能感知重载 ONU，并能分配合适的授权大小。3) DWBA-3 需要收到所有 ONU 的报告消息，采用 2 个授权，当收到 ONU 的报告消息之后，立即授权最小带宽，收到所有 ONU 报告消息之后，对超过部分进行授权。这个方法有 2 个问题：1) 每一个过载 ONU 收到 2 个授权，由于增加了保证时隙而降低了效率；2) 分为 2 个授权，由于帧边界，致使不必要的时延，因此 DWBA-2 效率更高。

以上基于 WDM IPACT 进行变化的算法并没有考虑到授权调度问题，使用第一次适应的时间和波长进行分配，仅针对超过带宽进行授权调度。

文献[10]提出的实时调度机制(JIT)考虑了 WDM EPON 网络中的有效授权调度问题，指出调度机制的选择受到平均队列时延和可用波长利用率的影响，引入由调度机制和调度策略组成的分层调度方法，调度机制用于确定 OLT 何时开始调度计算，被当作在线调度和离线调度之间的连续集合，在线 JIT 定义为调度池，请求带宽的 ONU 加入到调度池中，一旦有可用波长，池中的 ONU 开始进行调度。另一方面，调度策略是指 OLT 进行调度的方法，每一个 ONU 可以当作为一项作业，授权大小定义为处理时间，EPON 中传输的波长表示加工的机器，这样，调度策略可归纳为一系列作业的调度，要求在指定时间内，在一系列机器上进行优化执行。对其他各种调度策略或者他们的组合都进行了验证，如并行机模型(PM)、下一个可用支持波长(NASC)等，在 PM 模型中，WDM EPON 授权调度问题形式化为 $PM_i \Sigma C_i$ ，其中 P 表示相同的并行机，

M_i 表示 ONU i 支持的波长集合, C_i 表示 ONU i 完成传输的时间, 优化目标是使得经过 EPON 传输的数据帧排队时延最小, 增加资源利用率。

文献[11]使用调度理论的方法, 研究了多波长光接入网传输授权机制, 将动态带宽调度问题的模型转化为一个开放式车间调度方法, 对调度和波长分配进行形式化, 并将其统一为一个线性规划问题, 引入启发式的禁忌搜索算法来解决这个问题, 可改善波长分配和减少调度时间。但该算法需要用到的分发规则为尽早在一个波长上调度 ONU, 以保证与其他已经调度的 ONU 不发生重叠。这些调度只能在某些特定场景下, 产生最优解, 一般情况下, 不能产生最优解。

3 带宽分配策略

3.1 网络模型

设 WDM EPON 网络中有 N 个 ONU, 第 i 个 ONU 的发送上行流速率为 R_{ui} (bit/s), 接收下行流速率为 R_{di} (bit/s), ONU 可在任一波长上传输, 也可在任一波长上接收, ONU 通过半导体光放大器(RSOA)实现带宽旁通过滤, 可同时发送和接收数据, 一个 ONU 在一个周期只能在一个波长上传输, 2 个 ONU 不能同时在同一个波长上传输。另外, 每一个 ONU 的负载不能超过波长的传输能力, OLT 能够同时接收所有上行波长数据。

OLT 通过 MPCP 协议获取所有 ONU 的带宽需求, 对给定的 ONU 带宽请求, 通过某些算法, 如门限机制, 可以确定授权大小。OLT 每一个周期在每一个波长上进行授权大小确定和授权调度, 周期长度由特定波长上, 每一个 ONU 分配的最小带宽保证确定, 每一个周期进行调度计算。定义 C_i 为波长 λ_i 在一个周期的传输时间长度。

结合授权调度和波长分配(P), 以及使周期最短或者最大传输时间 C_{\max} 最短的目标, 其模型定义为

$$P \min(C_{\max})$$

其中, $C_{\max} = \max\{C_i\}$ 。

3.2 高效用带宽分配策略

根据文献[10]和文献[11], 对于波长数量大于 3, WDM EPON 中传输调度和波长分配是一个 NP 难题, 为解决这类问题, 提出了采用启发式算法获取最优解。本文提出了一种新的基于拟人策略的启发式算法——多波长高效用带宽分配算法。

WDM EPON 中 ONU j 在波长 λ_i 上传输的数据,

用矩形来表示, 其中矩形宽为波长 λ_i 的上行传输速率, 矩形的长为传输时间 t_j , 则矩形面积为一个周期内 ONU j 在波长 λ_i 中上行传输的数据量。在一个周期中, OLT 收到所有 ONU 的带宽请求后, 在多个波长上进行分配, 类似于矩形 Packing 问题^[12], 其中一个周期可分配的带宽为大矩形, 宽为所有波长上行传输速率之和, 长为周期的传输时间。每一个 ONU 请求的上传数据用小矩形表示, 宽为某一波长的上行传输速率, 长为对应波长的传输时间。一个 ONU 的上行传输可以分配给任意波长, 由于每一个波长上行传输速率不同, 每一个 ONU 请求上传数据表示的小矩形不同, 但在一个周期中, 只采用一种进行传输。因此 WDM EPON 动态带宽的分配目标为可分配的带宽(大矩形)中尽量装入更多的 ONU 带宽请求(小矩形), 使可分配的带宽中空闲面积最小, 或者为传输所有 ONU 上行数据, 使最长传输时间波长的传输时间最短, 即传输相同数据, 使传输时间(周期长度)最短。

在解决矩形 Packing 问题的过程中, 根据生活经验, 一般采取先占角, 然后占边, 最后占中心的方法。受这种思想的启发, 对于 WDM EPON 带宽分配问题, 优先选择高效用的 ONU 带宽分配。对于当前分配状态中所有的 ONU 带宽分配, 若对等待分配的 ONU 带宽请求进行分配以后, 其与已经分配的某一固定矩形(除初始的分配外)之间的欧氏距离最小, 就认为该 ONU 带宽分配的效用最高, 优先考虑该 ONU 带宽分配, 这就是基于拟人策略的多波长高效用 ONU 带宽分配策略。

已知 2 个 ONU 带宽分配请求, 用矩形 R_1 、 R_2 表示, 矩形的 2 条边分别为传输速率和传输时间, 在 R_1 、 R_2 中任取一条边 e_1 和边 e_2 , 将 e_1 、 e_2 进行向两边延长, 其交点为 O , 并得到 4 个区域, 定义可用分配为存在某个区域中只含 ONU 带宽分配矩形 R_1 、 R_2 的这 2 条边 e_1 、 e_2 。图 1 所示为 2 个可用分配示例。

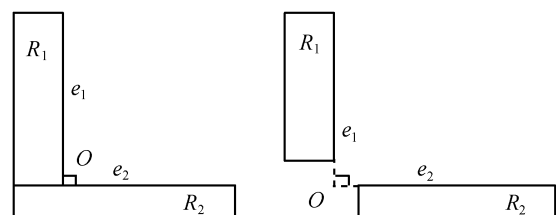


图 1 可用分配构成示意图

设一个周期中全部带宽分配能力构成的矩形框的 4 个顶点为 A、B、C、D，宽 AC 为所有波长带宽能力之和，AB 为一个周期的传输时间，矩形 ABCD 为带宽分配区域。第 k 个分配状态是指在某个时刻有 k 个 ONU 带宽请求已被放进带宽分配区域，其中 k 小于 ONU 带宽请求个数 n 。 $k=0$ 时为初始分配状态； $k=n$ 时为终止分配状态；正在处理的分配状态为当前分配状态。

在第 k 个分配状态下，称分配区域外尚未被置入的 $n-k$ 个 ONU 带宽请求为等待分配块，称已被置入分配区域内的 k 个 ONU 带宽分配为已分配块。

在第 k 个分配状态下，ONU 带宽请求等待分配块 M 占据了当前分配状态中的某一个可用分配，且该等待分配块与分配状态中的其他任一已分配块重叠面积为 0，则称等待分配块 M 做了一个分配。对等待分配块 M 进行一次分配，如果等待分配块 M 的两垂直边与形成可用分配中的 2 个 ONU 带宽请求矩形的两边均相交(接触长度大于 0)，则称等待分配块 M 进行了一次合法分配；否则称等待分配块 M 进行了一次非法分配。

设 a_i 、 b_i 分别为等待分配的 ONU 带宽请求 M 在某一波长上的传输时间和该波长传输速率， d_i 为 M 与所有已分配 ONU 带宽请求之间的最小欧氏(Euclidian)距离(如图 2 所示)，称 $D_i=1-2 \times d_i/(a_i+b_i)$ 为等待分配的 ONU 带宽请求 M 进行合法分配后的效用。

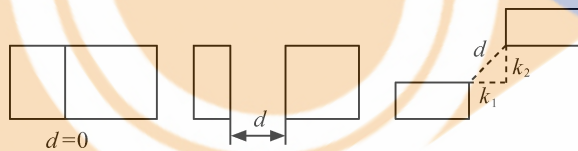


图 2 矩形之间的欧式距离

根据先占角，然后占边，最后占中心的原则，多波长高效用带宽分配的策略如下：1) 仅考虑等待分配 ONU 带宽请求矩形的所有合法分配；2) 选择效用最大的合法分配；3) 若 2 个等待分配 ONU 带宽请求所做的不同合法分配得到相同的效用，则优先考虑带宽请求数据量大的；4) 若 2 个等待分配 ONU 带宽请求数据量也一样大，则考虑 2 个等待分配 ONU 带宽请求分配的坐标，先比较对应波长的数据传输能力，再比较开始传输时间，数值小者优先。根据以上策略，可使 ONU 带宽请求分配之间尽可能从左下角开始，进行紧凑分配。另外在选取等待分配 ONU 带宽请求矩形时，其矩形高度(波

长速率)需与传送波长速率一致。

4 多波长高效用带宽分配算法

为了利用多波长高效用带宽分配算法进行计算时的空闲时间，同时减少多波长高效用带宽分配算法的复杂性，将 N 个 ONU 分成 2 个相等大小的不相交子群，OLT 通过一个标志位区分哪一个子群 ONU 上行数据帧，对每个子群，OLT 在接收完子群的全部带宽请求之后，进行多波长高效用带宽分配算法分配下一周期波长和带宽。OLT 交替的从 2 个子群接收数据，在接收一个子群发送上行数据帧时，同时对另一个 ONU 子群进行波长和带宽分配计算，避免了空闲时间，降低了时延。由于 2 个子群的带宽分配算法完全一样，后面对波长和带宽的分配仅针对一个子群进行说明。

在多波长 ONU 动态带宽分配问题中，由于调度时间的任意性，每个等待分配的 ONU 带宽请求分配方法有无穷多种，在本文分配策略中，在第 k 个分配状态下，可用分配最多不会超过 $2C_{k+1}^2$ 个。另外，首先挑选效用最高的合法分配进行分配，这是一种贪心的方法，采用这种方法可以在带宽分配区域内分配尽可能多的 ONU 带宽请求。

4.1 效用分配算法

效用分配算法的主要过程如下。

首先，在当前分配状态下，计算出所有等待分配的 ONU 带宽请求在带宽分配区域内的合法分配，并计算进行所有合法分配后的效用。

然后，对效用最大的合法分配所对应的等待分配 ONU 带宽请求进行分配。

分配完成后，更新当前分配状态，得到新的分配状态。

重复以上过程直到所有等待分配 ONU 带宽请求全部置入带宽分配区域内，或等待分配 ONU 带宽请求个数不为 0 但没有合法分配为止。

4.2 多波长带宽分配算法

假定在当前分配状态下，等待分配 ONU 带宽请求 M 做了一个合法分配 P ，得到一个新的分配状态，然后按效用分配算法依次将等待分配 ONU 带宽请求放入带宽分配区域内，此时带宽分配区域内所有已分配 ONU 带宽请求的数据量之和定义为 P 的价值度。

为了对效用分配算法进行改进，在当前分配状态下对每一个等待分配 ONU 带宽请求首先都要试分配所有的合法分配，然后利用效用分配算法计算

每个合法分配的价值度，最后正式确定执行价值度最大的那个合法分配，得到一个新的分配状态。从这个新的分配状态出发，重复这个过程直至分配完成。这就是多波长高效用带宽分配算法的基本思想，显然，多波长高效用带宽分配算法能在试探的基础上，求得一个更优的动态带宽分配。

图 3 为多波长高效用带宽分配算法具体描述。

```

已知波长数量和每一波长对应上行传输能力，足够长的传输周期初始化带宽分配区域，ONU 带宽请求个数为  $n$ ，形成初始分配状态。 $k$  为已被置入带宽分配区域内的 ONU 带宽请求的个数，令  $k=0$ ；
当前分配状态下的每一个等待分配 ONU 带宽请求计算所有的合法分配；
While  $k \neq n$  且在当前分配状态下有合法分配
{
  For 当前分配状态下的每一个合法分配
  {
    试做这个合法分配；
    利用效用分配算法计算这个合法分配的价值度；
  }
  挑选价值度最大的合法分配，若 2 个合法分配价值度一样大，则优先考虑 ONU 带宽请求数据量大的分配，若仍一样大，则依次考虑等待分配 ONU 带宽请求的  $y$  坐标， $x$  坐标，选择坐标小的一个分配，直到确定一个合法分配为止，正式进行该合法分配；
  更新第  $k$  个分配状态  $L_k$ ，得到第  $k+1$  个分配状态  $L_{k+1}$ ，令  $k = k + 1$ ；
  对于新的分配状态下的每一个等待分配 ONU 带宽请求计算所有的合法分配；
}

```

图 3 多波长高效用带宽分配算法

为了有效地进行多波长动态带宽分配，首先对各 ONU 请求分配带宽进行判断，对于超过保证带宽门限的部分，只对保证带宽门限部分参与分配，对于 ONU 请求带宽分配小于门限，则按照实际带宽请求进行分配。初始给定的传输周期长度能保证各 ONU 带宽请求全部按照门限分配进行传输的时间，使得利用多波长高效用带宽分配算法可以把这 n 个事先给定的等待分配 ONU 带宽请求全部互不重叠地放入带宽分配区域内，然后逐渐减少带宽分配区域的时间长度，采用多波长高效用带宽分配算法分配所有等待分配 ONU 带宽请求，直到不能再减小传输时间长度为止，此时的带宽分配区域就是传输周期最短的分配。

5 算法的计算复杂性

由于任意 2 个 ONU 请求带宽分配之间最多产生 2 个可用分配，在第 k 个分配状态下，可用分配的个数 u 不会超过 $2 \times C_{k+4}^2$ 。在效用分配算法中，包含以下 3 个部分：1) 判断所有合法分配的时间，

主要为计算一个 ONU 带宽请求是否在带宽分配区域内以及计算 2 个 ONU 请求带宽之间是否重叠；2) 计算所有合法分配效用的时间，主要是计算 2 个 ONU 请求带宽之间的欧拉距离；3) 为在所有合法分配中，查找最大效用合法分配时间。因此效用分配算法处理当前分配状态的计算时间为

$$T_k = O[(k \times u + u \times k^2) + u \times k^2 + u \times k]$$

从上式可以看出，当前分配状态的计算时间复杂度为 $T_k = O(k^4)$ 。设 n 为一个子群 ONU 请求带宽分配的个数，效用分配算法的计算时间复杂度为

$$T = \sum_{k=0}^{n-1} T_k, \text{ 即 } T = O(n^5).$$

下面分析多波长高效用带宽分配算法的计算复杂性。

设当前分配状态是第 k 个分配状态，且有 u 个合法分配。根据定义以及效用分配算法分析，计算一个合法分配价值度的时间为 $t_p = O(n^5)$ 。与效用分配算法的分析相比，多波长高效用带宽分配算法处理当前分配状态的时间只需将 2) 中计算所有合法分配效用的时间修改为计算所有合法分配价值度的时间，因此其计算时间复杂度可计算如下：

$$T_{Bk} = O[(k \times u + u \times k^2) + u \times k \times t_p + u \times k]$$

将 u 和 t_p 代入上式，可得 $T_{Bk} = O(n^8)$ ，因此多波长高效用带宽分配算法的计算时间至多为 $T_B = \sum_{k=0}^{n-1} T_{Bk} = O(n^9)$ ，即多波长高效用带宽分配算法的计算复杂度为 $O(n^9)$ 。

实际上，如果将已被分配 ONU 请求带宽占用的带宽分配区域去掉，则处理当前分配状态中合法分配的个数远少于分析值。另外，如果当前分配状态下某个合法分配的价值度等于 n 个 ONU 请求带宽的数据量之和，则立刻成功停止。

6 实验结果

本节通过模拟方式，对 WDM EPON 中不同授权调度技术进行模拟比较，使用 NS2 网络模拟工具，对本文提出的基于欧氏距离多波长高效用 ONU 带宽分配调度算法(UDWBA)与其他 2 种研究较多的带宽和波长分配算法：文献[8]提出的多个上行波长交叉轮循算法(WDM IPACT)和文献[11]提出的基于禁忌搜索算法的 WDM 动态带宽分配算法(Tabu DWBA)进行比较。主要比较的性能包括系统

利用率和分组时延等。

在模拟实验中，OLT 执行授权大小和调度，并将分组转发到网络中，授权大小门限按照每一个 ONU 的全部带宽请求确定。实验中数据帧规定如下：60%为低优先级的 64byte 帧，5%为高优先级的 300byte 帧，10%为中等优先级的 580byte 帧，25%为 1 518byte 帧，用自相似传输源产生以上数据分组，爆发参数为 0.75，RTT 均匀分布在[13μs, 100μs]中，OLT 与 ONU 间距离为 2~15km。授权调度中最大循环周期为 2ms，使用 UDWBA 计算最小保证带宽为 B_{min} 。由于调度的限制，一个周期可能超过 2ms(与分配时长有关)，但一个 ONU 在一个周期中分配带宽不能超过 B_{min} 。所有波长的周期长度相同，同一波长的 2 个 ONU 传输之间由 12byte 帧间隔分开，使用以下参数：1 个 OLT，4 个波长，每一个波长支持 $C=1\text{Gbit/s}$ 传输速率，128 个 WDM ONU，OLT 缓存大小为 10MB，ONU 缓存大小为 1MB。

图 4 为算法 UDWBA、WDM IPACT 和 Tabu DWBA 的各波长平均上行流带宽利用率，从图中可以看出，UDWBA 的利用率高于 WDM IPACT 和 Tabu DWBA。在低负载下，WDM IPACT 利用率较高，这是由于所有波长的完成时间并不相同，使得各算法的传输周期不同，在 WDM IPACT 某些波长直到下一周期开始，一直处于空闲状态，而 UDWBA 和 Tabu DWBA 传输周期更短，空闲时段较长，导致波长利用率较低。随着负载的增加，波长利用率超过 73%左右，WDM IPACT 传输数据量不再增加，波长利用率开始波动，但不再增长，WDM IPACT 低利用率主要是由波长的带宽浪费造成的，而算法 UDWBA 和 Tabu DWBA 波长利用率增加，但在高负载时，UDWBA 的波长利用率比 Tabu DWBA 高 20%左右，比 WDM IPACT 高 25%左右，波长利用率超过 95%，这说明 UDWBA 的波长利用率更高，其性能接近最优解。

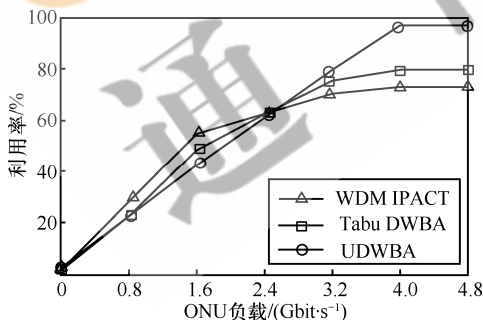


图 4 WDM 波长利用率

图 5 说明了不同调度算法下的各波长上行高优先级数据帧平均分组时延，很明显，随着负载的增加，时延增加，在低负载时，各算法的时延差别很小，这是由于在低负载下，循环周期太短的原因，所有 ONU 分配的带宽等于所请求的带宽，没有分组保留在 ONU 的缓存中，因此可以忽略排队时延。但随着负载的增加，循环周期的增长，WDM IPACT 维持最小保证带宽 B_{min} 的传输时间超过 2ms，因此，ONU 不能在同一周期中传输所有缓存中的数据分组，某些数据分组不可避免地要进行排队。随着实验时间的增长，缓存数据的增多，排队时延变得更长。在 UDWBA 的调度算法下，循环周期始终小于 2ms，每一个 ONU 的带宽分配足够传输缓存中的高优先级数据帧，因此能保证最大分组时延。从图中可以看出，在高负载时，UDWBA 的平均时延远远优于 WDM IPACT，与基于禁忌搜索算法的 WDM 动态带宽分配算法相比，平均时延降低了 45%左右，这主要是由于 UDWBA 采取划分 2 个子群进行调度，减少了信道空闲时间。

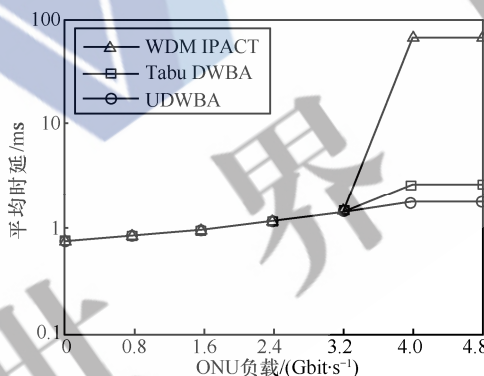


图 5 高优先级数据帧平均时延

7 结束语

在 WDM EPON 光接入网络中，将授权调度和波长分配进行结合，并将其形式化为矩形 Packing 问题，由于该问题是一个 NP 难问题，只有在特定情况下，可以得到优化解。本文提出了新的基于拟人策略的启发式算法——多波长高效用带宽分配算法，该算法采用最大效用优先的分配策略，通过合适的波长调度，将多波长传输能力与调度周期结合，有效地减少了信道空闲间隙，提高了信道利用率，降低了数据分组的平均时延。模拟实验表明系统利用率和分组时延两大性能都得到较大的改进。

参考文献:

- [1] CHUAN H, LACHLAN A, ELAINE W, *et al.* FULL-RCMA: a high utilization EPON[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(8): 1514-1524.
- [2] AHMAD R, CHADI M. Quality of service in TDM/WDM Ethernet passive optical networks (EPONs)[A]. *The 11th IEEE Symp on Computers and Communications, ISCC'06[C]*. Istanbul, Turkey, 2006. 616-621.
- [3] JUN Z, HUSSEIN T. Media access control for Ethernet passive optical networks: an overview[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(2): 145-150.
- [4] IEEE Standard. 802.3ah-2004, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements[S].
- [5] MICHAEL P. An Evolutionary Wavelength Division Multiplexing Upgrade for Ethernet Passive Optical Networks[D]. Master's thesis, Arizona State Univ, Tempe, 2004.
- [6] KYEONG S, DAVID G, FUTAI A, *et al.* Design and performance analysis of scheduling algorithms for WDM-PON Under SUCCESS-HPON Architecture[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(11): 3716-3731.
- [7] KAE H, DAVID H, IVAN A. Dynamic bandwidth allocation algorithm for differentiated services over WDM EPONs[A]. *Proc 9th Int Conf Communications Systems[C]*. 2004. 116-120.
- [8] MICHAEL P, MARTIN R, MARTIN M. WDM Ethernet passive optical networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44(2): 15-22.
- [9] AHMAD R, CHADI M, MARTIN M, *et al.* Dynamic wavelength and bandwidth allocation in hybrid TDM/WDM EPON networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(1): 277-286.
- [10] MICHAEL P, MARTIN R, CHARLES J, *et al.* Just-in-time scheduling for multichannel EPONs[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(10): 1204-1216.
- [11] LEHAN M, JAD E, HAMED A. A joint transmission grant scheduling and wavelength assignment in multichannel SG-EPON[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(21): 4781-4792.
- [12] 黄文奇, 许如初. 近世计算理论导引-NP 难度问题的背景、前景及其求解算法研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- HUANG W Q, XU R C. Introduction of the Current Computation Theory: Background, Future and Algorithms of NP-hard Problems[M]. Beijing: Sciences Press, 2004.

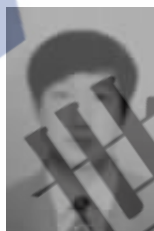
作者简介:



汪学舜 (1970-), 男, 湖北浠水人, 华中科技大学博士生, 主要研究方向为流媒体数据传输和 QoS 保证。



余少华 (1962-), 男, 湖北武汉人, 华中科技大学教授、博士生导师, 武汉邮电科学研究院总工程师, 主要研究方向为光通信和 IP 网络技术。



戴锦友 (1968-), 男, 湖北武穴人, 博士, 武汉邮电科学研究院高级工程师, 主要研究方向为多业务以太网。