

混合复用无源光网络中带有灰色预测的高效动态资源分配策略

王汝言 蒋 婧 熊 余* 唐剑波

(重庆邮电大学光通信与网络重点实验室 重庆 400065)

摘 要: 针对混合复用无源光网络的用户接入距离增大,使得往返时延增加,造成网络中闲置时间增多,进而引起带宽浪费的问题,该文提出一种带有灰色预测的高效动态混合资源分配策略。通过对闲置时间内到达的数据进行灰色预测,动态确立光网络单元的带宽分配策略,以减小网络时延;利用波长结束时间的差异性,周期性地实时调整各波长的数据传输顺序,实现波长的高效利用和负载均衡。仿真结果表明,该动态资源分配策略有效地消除闲置时间的影响,且波长得到高效地利用,提高了带宽利用率的同时减少网络时延。

关键词: 无源光网络;时分波分复用;动态资源分配;闲置时间;灰色预测;资源利用率

中图分类号: TN915.63

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)08-1880-08

DOI: 10.11999/JEIT151201

An Efficient Dynamic Resource Allocation Strategy with Grey Prediction in Hybrid Multiplex Passive Optical Network

WANG Ruyan JIANG Jing XIONG Yu TANG Jianbo

(Key Laboratory of Optical Communication and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: With the access distance of users increasing in hybrid Time and Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Networks (TWDM-PONs), the round trip time becomes very long, and idle time is increased in the network. It leads to the problem of bandwidth waste. In order to solve this issue, an efficient and hybrid dynamic resource allocation strategy with Grey Prediction (GP) is proposed. In order to decrease the network delay performance and avoid the waste of resource, the Grey Prediction model is utilized to predict the arrival data during the idle time and dynamically allocate bandwidth to optical network units. Utilizing the finishing time difference of data transmission on wavelengths, the higher transmission efficiency and load balance of wavelengths can be achieved by constantly adjusting the mode of wavelengths transmission periodically. The simulation results show that the proposed hybrid strategy can effectively eliminate the idle time to avoid waste of bandwidth and reduce network delay while making wavelengths efficiently used to improve resource utilization rate.

Key words: Passive Optical Networks (PONs); Time and Wavelength Division Multiplexing (TWDM); Dynamic Resource Allocation (DRA); Idle time; Grey Prediction (GP); Resource utilization rate

1 引言

目前,波分复用技术的发展极大地提升了核心网的承载能力^[1]。然而,作为“最后一公里”的接入网发展相对缓慢,成为制约核心网与用户之间大容量快速数据通信的瓶颈。时分波分复用无源光网络

(Time and Wavelength Hybrid Division Multiplexed Passive Optical Network, TWDM-PON)具有大容量、高带宽和长距离等优势,被广泛研究^[2-4]。而 TWDM-PON 是基于多点控制协议(Multi-Point Control Protocol, MPCP)实现资源分配,接入距离的增大会导致往返时间(Round Trip Time, RTT)增加,使得网络产生更多的闲置时间,这造成资源浪费^[5]。同时, TWDM-PON 的资源分配较传统无源光网络更为复杂^[6]。因而,设计合理的资源分配策略以消除闲置时间,提高带宽利用率并降低网络时延,是 TWDM-PON 得以实际部署的关键。

针对 TWDM-PON 中闲置时间增大导致带宽浪费的问题,文献[7]基于波长结束时间提出对闲置

收稿日期:2015-10-29;改回日期:2016-04-27;网络出版:2016-06-03

*通信作者:熊余 xiongyu@cqupt.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(61401052),重庆市教委科学技术研究项目(KJ1400418, KJ1500445),重庆邮电大学博士启动基金(A2015-09)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61401052), The Science and Technology Project of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1400418, KJ1500445), The Ph.D. Start-up Fund of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2015-09)

时间填空的策略即最早完成时间填空(Earliest Finish Time with Void Filling, EFT-VF),一定程度上消除闲置时间,但需在 RTT 差异特别大的网络中性能才最优。文献[8]结合 EFT-VF 的优势,提出多线程部分填空策略,进一步降低网络时延,但其性能的提升依赖于平均每条波长在周期内传输光网络单元(Optical Network Unit, ONU)的数量。而通过预测闲置时间内到达 ONU 端的数据,并提前为之分配补偿带宽,有效地减少数据在 ONU 端的等待时延,消除闲置时间的影响。为此,文献[9]提出通过监测 ONU 端流量变化,随机设定预测因子来预测带宽以进行更为准确的分配,但未基于预测因子分析网络性能。文献[10]提出基于自适应线性预测的动态带宽分配策略,即基于当前和过去平均到达率的线性组合来预测闲置时间内业务的平均到达率,但线性预测不能很好地预测突发性业务。文献[11]利用业务突发性来实现最优的预测顺序,其预测精度进一步改善,但性能改善不大。文献[12]通过对不同等级业务的线性预测,保证了不同等级业务的服务质量(Quality of Service, QoS),但缺乏很好的预测模型以致预测精度不高。文献[13]基于在线-离线分配的改进型稳定匹配策略,通过指数衰减模型对周期内部分 ONU 带宽请求信息进行预测,提高了波长调度效率,但并未对单个 ONU 的闲置时间进行考虑。尽管上述文献在一定程度上预测了闲置时间内到达的业务,减小了排队时延,但缺乏有效的理论模型和定量的分析,且预测精度有待提高。

为此,本文提出一种基于灰色预测的高效动态资源分配策略(Novel Dynamic Resource Allocation Strategy with Grey Prediction, NDRAS-GP),通过对闲置时间内到达数据及周期内部分 ONU 的带宽请求信息进行预测以动态确立 ONU 时隙带宽分配策略;通过对 ONU 分配到的时隙带宽大小进行排序,实时调整 ONU 数据发送顺序;最后,采用高效的波长传输方案进行数据承载。

2 问题描述

随着多媒体业务和大量智能终端的不断涌现,用户对带宽需求急剧增加,使得资源分配问题面临巨大的挑战^[14]。在 TWDM-PON 中,ONU 与光线路终端(Optical Line Terminal, OLT)之间的“请求-授予”过程势必会导致闲置时间产生,造成带宽浪费,如图 1 所示(其中, T_{is} 为闲置起始时间, T_{ie} 为闲置结束时间)。因而,需尽可能地利用 TWDM-PON 多波长传输的优势,消除闲置时间以降低网络时延及避免带宽浪费,具有重要的现实意义^[15]。

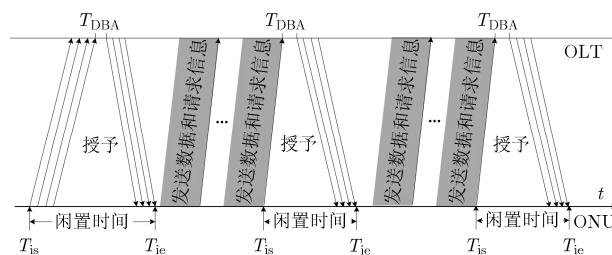


图 1 网络闲置时间示意图

由图 1 可知,闲置时间内数据会持续到达 ONU 缓存。而 ONU 向 OLT 发送的带宽请求并不包含新到达的数据,OLT 也不能为之分配带宽,使得闲置时间内新到达数据要等到下个周期才能申请带宽,增加网络时延。若对闲置时间内到达数据进行科学地预测,并提前为之分配补偿带宽,则能有效减少数据的排队时延。而 ONU 向 OLT 申请带宽时,并不能获取 ONU 在得到授权带宽前用户数据流量的全部信息及其变化特征,显然部分信息未知的用户数据流量属于灰色系统^[16]。在灰色系统中,通过对少量原始数据累加后,预测数据具有明显的指数特征;然后,通过建立微分方程进行数据拟合,并以逆累加生成的方式获得原始数据的预测值。虽然 ONU 的请求信息随时间推移差异性较大,但是灰色预测模型可在很短时间内对少量原始数据信息进行科学预测,使得对闲置时间内到达的数据进行预测获得的预测值更为准确。

对闲置时间内到达的数据进行带宽预测补偿后,需尽可能地利用多波长进行数据传输。而在资源分配的过程中,不可避免地产生了往返时延及波长调谐时间(Turn Time, TT),使得波长开始及结束的时间不一,引起波长存在空闲时隙,造成带宽浪费。因而,怎样合理调度多波长高效地完成数据传输,提高带宽利用率的同时实现负载均衡,是所提策略亟待解决的问题。

3 方法描述

本文所提策略的基本思想为:运用灰色预测模型,并根据周期内波长传输的结束时间,对闲置时间内部分 ONU 的带宽请求信息进行预测,以消除闲置时间的影响;同时,基于波长最早结束时间进行资源分配,并对 ONU 数据进行动态排序发送,实现波长负载均衡。为描述该资源分配策略,定义变量如表 1 所示。

3.1 带有灰色预测的动态时隙带宽分配子策略

本文所提策略是基于固定周期,往返时间 RTT、波长调谐时间 TT 及第 $q-1$ 周期的调度情况

表1 符号及含义

符号	意义
N	ONU 总数
n	某一周期实际参与轮询过程的 ONU 数量
K	波长总数
d_k	最高服务等级 ONU 组的时延要求
T_g	ONU 之间的保护时隙
T_u	波长转换时间
T_{id}	闲置时间
T_{cy}	轮询周期
R	波长传输速率
$t_{q,s}^k$	第 q 周期内波长 k 的开始时间
$t_{q,f}^k$	第 q 周期内波长 k 的结束时间
N_p^q	需进行预测的 ONU 集合
$R_{p,q}^i$	周期 q 内需进行预测 ONU 的带宽请求预测值
$R_{p,T_{id}}^i$	ONU 闲置时间内带宽预测补偿值
B_{min}	周期内的最小保证带宽
b_q^i	周期 q 内为 ONU i 分配的带宽大小
$N_k^{q,i}$	周期 q 内 ONU i 由几条波长承载
$t_k^{q,i}$	周期 q 任意时刻 t 在波长 k 上传输的 ONU 数量

会影响第 q 周期内波长 k 的开始时间 $t_{q,s}^k$ 及结束时间 $t_{q,f}^k$ 。根据波长在周期内最早完成时间, 确定 OLT 最终进行动态带宽分配 (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA) 计算的决策时间, 以提前对下一周期进行带宽授予。

定义 1 决策时间 t_d^q , 即任意周期内最早出现波长结束数据传输的时刻。

$$t_d^q = \min_{k \in [1, K]} (t_{q,f}^k) \quad (1)$$

将该值作为 DBA 的决策时间, 同时对带宽请求还未到达 OLT 的部分 ONU 进行预测, 并提前发送下行授予, 以消除闲置时间的影响。然而, 动态改变 DBA 的决策时间, 会导致部分 ONU 的带宽请求在 DBA 决策时并未到达 OLT, 需对这部分 ONU 的带宽请求进行预测, 通过式(2)计算需进行预测的 ONU 集合 N_p^q 。

$$N_p^q = \{i \mid t_f^{q,i} \geq t_d^q\} \quad (2)$$

其中, $t_f^{q,i}$ 为 ONU i 在周期 q 内结束数据传输的时间。由于数据到达具有突发性, ONU 并不知当前周期内带宽请求大小, 且不能获知闲置时间内数据流量的信息及变化特征。因而, 可利用灰色理论对请求带宽进行补偿, 获知 ONU 在该周期的带宽请求及闲置时间内到达 ONU 数据的预测值, 以降低排队时延。

初始状态下, OLT 获取 ONU 前 n 个连续的时间段 $t(t = T_{id} \text{ 或 } t = T_{cy})$ 内到达的数据量, 将这 n 个数据量作为样本值来预测下个时间段内到达的数据

量。所获得的数据样本值按 $r^{(0)} = r^{(0)}(1), r^{(0)}(2), \dots, r^{(0)}(n)$ 的形式描述。随着时间的推移, OLT 获取的数据信息随之增加。为消除数据获取过程中的随机干扰并寻找时间数据间的规律, 对样本数据进行累加得到 $r^{(1)} = r^{(1)}(1), r^{(1)}(2), \dots, r^{(1)}(n)$ 所描述的数据, 生成规则为式(3)所示。

$$r^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k r^{(0)}(i), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

经过上述累加过程, 原样本序列的随机性得到削弱, 变为较有规律的样本数据。为了便于对该变化过程进行研究和描述, 分析其时序冗余性, 对生成数据序列建立微分方程如式(4)所示。

$$dr^{(1)}/dt + ar^{(1)} = u, \quad 0 \leq a \leq 1 \quad (4)$$

其中, a 为发展系数, 反映了时间序列 $r^{(0)}$ 的增长速度; u 为灰色作用量, 反映序列 $r^{(0)}$ 的数据变化关系。此方程满足初始条件, 当 $t = t_0$ 时, 如式(5)所示。

$$x^{(1)} = x^{(1)}(t_0) \quad (5)$$

为便于求解, 将上述微分方程离散化, 得到闲置时间内到达的数据量的差分方程为

$$\frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{r^{(1)}(k+1) - r^{(1)}(k)}{k+1-k} = r^{(0)}(k+1) \quad (6)$$

对等间隔取样的离散值(注意到 $t_0 = 1$)则为

$$r^{(1)}(k+1) = \left[r^{(1)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (7)$$

将 $r^{(1)}(1)$ 留作初值用, 故将 $r^{(1)}(2), r^{(1)}(3), \dots, r^{(1)}(n)$ 代入式(4)中, 等间隔取样, 故得

$$\begin{aligned} \frac{\Delta r^{(1)}(2)}{\Delta t} &= r^{(0)}(2), \frac{\Delta r^{(1)}(3)}{\Delta t} = \Delta r^{(0)}(3), \dots, \\ \frac{\Delta r^{(1)}(n)}{\Delta t} &= \Delta r^{(0)}(n) \end{aligned} \quad (8)$$

由式(7)写成向量的数量积的形式有

$$\left. \begin{aligned} r^{(0)}(2) &= \left[-r^{(1)}(2), 1 \right] \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \\ r^{(0)}(3) &= \left[-r^{(1)}(3), 1 \right] \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \\ &\vdots \\ r^{(0)}(N) &= \left[-r^{(1)}(N), 1 \right] \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$\frac{\Delta r^{(1)}}{\Delta t}$ 涉及到累加序列 $r^{(1)}$ 的两个时刻的值, $r^{(1)}(i)$ 取前后两个时刻的平均, 即将 $r^{(1)}(i)$ 替换为

$$\frac{1}{2} [r^{(1)}(i) + r^{(1)}(i-1)], \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

将式(9)写为矩阵表达式:

$$\begin{bmatrix} r^{(0)}(2) \\ r^{(0)}(3) \\ \vdots \\ r^{(0)}(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[r^{(1)}(2) + r^{(1)}(1)] \\ -\frac{1}{2}[r^{(1)}(3) + r^{(1)}(2)] \\ \vdots \\ -\frac{1}{2}[r^{(1)}(N) + r^{(1)}(N-1)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \quad (11)$$

令

$$\mathbf{Y} = (r^{(0)}(2) \ r^{(0)}(3) \ \dots \ r^{(0)}(n))^T \quad (12)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[r^{(1)}(2) + r^{(1)}(1)] \\ -\frac{1}{2}[r^{(1)}(3) + r^{(1)}(2)] \\ \vdots \\ -\frac{1}{2}[r^{(1)}(N) + r^{(1)}(N-1)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \quad (14)$$

则式(11)的矩阵形式可写为

$$\mathbf{y} = \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (15)$$

式(14)的最小二乘估计为

$$\hat{\mathbf{U}} = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{u} \end{bmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{y} \quad (16)$$

经最小二乘估计所得值代入式(3)中, 可得离散解:

$$\hat{r}^{(1)}(k+1) = \left[r^{(1)}(1) - \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \right] e^{-\hat{a}k} + \frac{\hat{u}}{\hat{a}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

对该解进行累减还原计算, 即可得原数列的预测模型。

$$R_p(t) = \hat{r}^{(0)}(k+1) = (e^{-a} - 1) \left[r^{(0)}(1) - \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \right] e^{-\hat{a}k}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

由式(18)可得在周期 q 内需进行预测 ONU 的带宽请求预测值 $R_{p,q}^i$ ($i \in N_p^q$) 及其余 ONU 闲置时间内带宽预测补偿值 $R_{p,T_{id}}^i$ ($i \in N_p^q$)。

前面由灰色预测模型对数据样本进行了预处理, 得到了带宽预测补偿值 $R_{p,T_{id}}^i$ 。为使该预测值尽可能地反映闲置时间内的数值, 需对预测值进行检验, 利用残差检验对预测值做一步考察, 如式(19)所示。

$$\varepsilon(k) = \left| \frac{r^{(0)}(k+1) - \hat{r}^{(0)}(k+1)}{r^{(0)}(k+1)} \right| \times 100\%, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (19)$$

规定相对残差值 $\varepsilon(k) \leq 10\%$, 否则需重新调整灰色系数 a 以利用灰色模型进行修正。

经过带宽预测及修正后, 计算出各 ONU 在周期 q 内获得带宽如式(20)所示, 其中最小保证带宽如式(21)。

$$b_q^i = \begin{cases} \min(R_{p,q}^i, B_{\min}), & i \in N_p^q \\ \min(R_{p,q}^i + R_{p,T_{id}}^i, B_{\min}), & i \notin N_p^q \end{cases} \quad (20)$$

$$B_{\min} = \frac{(T_{cy} - N \times T_g - K \times T_u) \times K \times R}{N} \quad (21)$$

经过前述灰色模型的预处理及利用残差检验对预测精度进行修正, OLT 能够获得基于时序数据序列的灰色预测值。OLT 根据预测值补偿相应的带宽, 可减少业务的排队时间, 从而达到提升网络传输性能的目的。至此, 各 ONU 的时隙带宽已分配完毕, 在资源池中等待 OLT 为其分配波长以获得数据发送。

3.2 高效的波长分配子策略

3.1 节基于灰色理论进行带宽请求预测, 动态确立了时隙分配策略。而如何高效地利用多波长资源传输数据, 并尽可能实现负载均衡及避免带宽浪费是所提策略的重要问题。为此, 本文提出高效的波长分配策略。

OLT 已将资源池中的时隙资源合理有效地分配给各 ONU, 动态调整发送 ONU 数据的顺序以确立不同的波长承载方案。同时, 波长承载 ONU 数据需遵循一定的约束条件, 如式(22)~式(24)所示。

$$K < N \quad (22)$$

$$|N_k^{q,i}| \leq 1, \quad k \in K, \quad i \in N \quad (23)$$

$$|t_k^{q,i}| \leq 1, \quad k \in K, \quad i \in N \quad (24)$$

其中, 式(22)表示波长数小于 ONU 总数; 式(23)表示同一个 ONU 不能同时在两条或两条以上的波长上进行传输; 式(24)表示同一时刻每条波长只能传输一个 ONU 的数据。所提高效的波长分配策略步骤如下:

步骤 1 在初始周期 $q = 0$ 时, OLT 在资源池中随机挑选 ONU 加载到各波长信道上进行数据承载。各波长在周期内完成传输任务的结束时间 $t_{q,f}^k$ 先后不同, 即波长出现空闲的时间不等。如图 2(a)所示, 波长 $k = 1$ 的结束时间 $t_{q=0,f}^{k=1}$ 最大, 而 $k = 3$ 的结束时间 $t_{q=0,f}^{k=3}$ 最小。OLT 选择波长 $k = 3$ 这条波长的结束时间作为决策时间, 按照 3.1 节的时隙带宽分配策略对下一周期进行 DBA 计算。

步骤 2 进入常规周期 ($q \geq 1$) 后, OLT 提前对各 ONU 的带宽信息进行授予, 进一步消除周期内闲置时间的影响。如图 2(b)所示, 由于在初始化周期内波长 $k = 3$ 最早结束传输任务, 则该周期内并未得到最大化利用, 在周期 $q = 1$ 内, 优先对该波长进行调度。依次类推, 波长结束时间 $t_{q,f}^k$ 越小其优先级越高。按照波长优先级不同, 将资源池中的 ONU

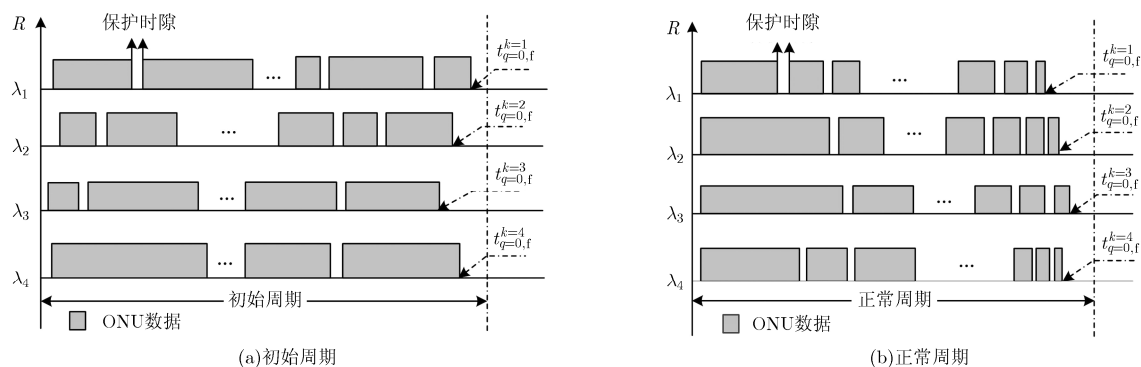


图 2 ONU 数据块加载图

待发送数据按降序的方式依次加载到各波长信道上进行传输。

步骤 3 当出现波长可用时, 按照波长优先级顺序进行挑选 ONU 数据。如图 2(b)所示, 首先考虑波长 $k=3$ 在完成第 1 个 ONU 数据后带宽利用情况, 将在资源池中为其预留最大的 ONU 数据。按照同样的方式, 为各优先级波长预留 ONU 待发送 ONU 数据, 该最早可用波长将传输属于自己优先等级的 ONU 数据。

依次类推, 当出现最早可用波长时按照波长优先级进行 ONU 数据挑选, 保证波长优先级最高的波长得到最充分利用。如图 2(b)所示, 理想情况下, 周期 $q=1$ 结束时, 波长 $k=3$ 最晚结束调度任务, 波长 $k=1$ 最早结束调度任务。较初始周期, 各波长结束时间正好为相反的顺序, 虽在单周期内波长负载并未达到均衡, 但一段时间内各波长达到负载均衡。此外, 该策略能消除周期期间闲置时间的影响, 以进一步提高带宽利用率。

可见, 基于波长在周期内结束时间的不同, 动态调整下一周期内的优先级顺序, 自适应改变其承载 ONU 的数据量, 使波长在一段时间内达到均衡。同时, 基于波长最早的结束时间进行决策可将带宽信息提前发送消除闲置时间, 提高带宽利用率。通过上述两个子策略, 实现资源的高效调度, 其流程如图 3 所示。

4 仿真分析

4.1 仿真评价指标

带宽利用率、网络吞吐量、平均包时延和带宽浪费量。

定义 2 带宽浪费量, 即系统不存在丢包时, 周期内 ONU 分得带宽与数据实际发送占用带宽的差值。

4.2 仿真环境设定

NDRAS-GP 的对比策略为文献[7]中的 EFT,

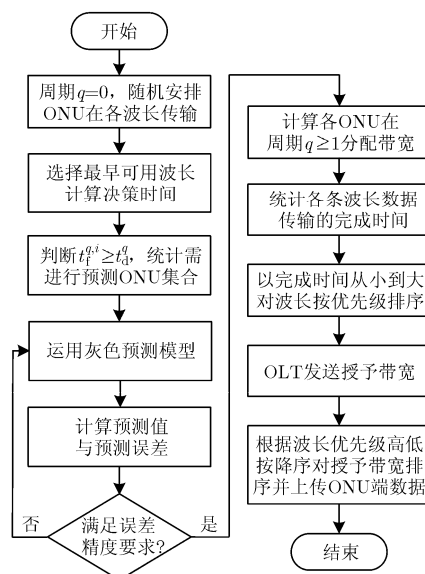


图 3 NDRAS-GP 策略流程图

文献[13]中的 MSMA 及将 NDRAS-GP 中的灰色预测模型替换为线性预测形成的对比策略 NDRAS-LP。EFT 基于波长最早可用原则进行数据传输, 但未进行数据预测。MSMA 采用指数衰减预测模型对部分 ONU 带宽请求进行预测, 但未针对所有 ONU 的闲置时间进行预测。采用图 4 所示网络拓扑, OLT 通过远端节点与 4 个 TDM 子网相连, 波长数 $K=(2, 4, 6, 8)$, 波长速率为 1 Gbps; ONU 到 OLT 的距离为 20 km; 数据包到达率满足泊松分布, 单个数据包的大小服从 64 Byte 到 1518 Byte 的均匀分布; 周期固定大小为 2 ms, ONU 保护时隙为 1 μ s, 动态带宽分配运行时长为 10 μ s。

4.3 仿真结果分析

图 5, 图 6 和图 7 表示波长数 $K=2, 4, 6, 8$ 时, NDRAS-GP 平均包时延、带宽利用率及网络吞吐量随负载率的变化情况。由图 5 可见, 平均包时延随负载率增加而增大。负载率增大使得波长承载的数据量增加, 导致等待发送的数据包增多, 平均时延

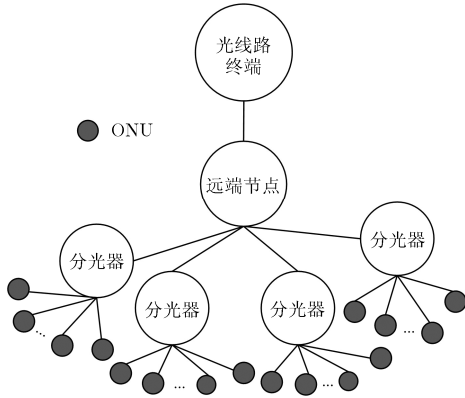


图4 仿真所用网络拓扑图

不断增大。特别地，当 $K=2$ 负载率为 0.8 时，平均包时延急剧增大。这是因为网络中的带宽资源有限，不足以承载过多数据以至于排队等待时延过长。此外，波长数越多相同负载率情况下平均包时延越低，且更晚达到时延急剧增加的负载率值，这是因为波长数越多，可用带宽越多，数据可尽快被发送。由图 6 可见，带宽利用率随负载率增加均呈上升趋势。负载率增加使得各波长承载的数据量增多，可避免因空闲带来的带宽浪费，使得带宽利用率增加。然而，当 $K=2$ 负载率为 0.6 时，带宽利用率渐趋于平缓，说明已达到带宽容量的饱和值；同时，波长数越多，相同负载率下的带宽利用率越低。由图 7 可见，网络吞吐量随负载率增加而增大。负载率较小时，不同波长数的网络吞吐量相差不大。随着负载率增加，波长数越少越先满载达到最大网络吞吐量，显示出不同波长数的网络承载能力具有较大差别。如 $K=2$ ，负载率为 0.9 时，吞吐量趋于稳定达到最大，但负载率进一步增大后，其网络吞吐量比波长数较多的网络明显更小。

图 8 为波长数 $K=2$ 时，NDRAS-GP 与 EFT 及 MSMA 平均包时延的比较。由图可见，负载率较小时，所有策略的平均包时延均在 2 ms 内，且随负载率增大呈上升趋势。然而，当负载率增加到 0.8 时，系统处于饱和状态，平均包时延均急剧增加，且 NDRAS-GP 平均包时延较 MSMA 及 EFT 更小。

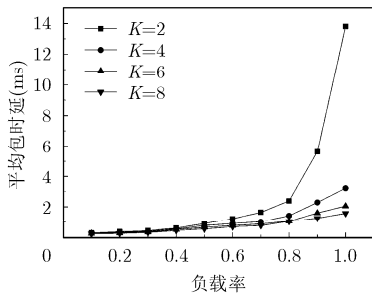


图5 不同波长数的平均包时延

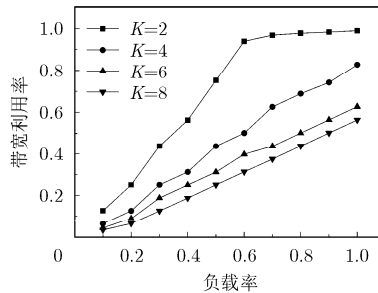


图6 不同波长数的带宽利用率

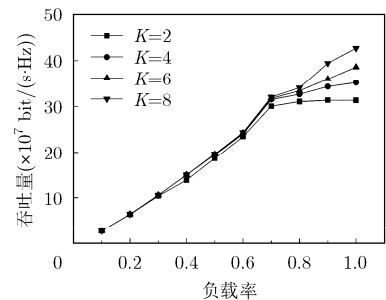


图7 不同波长数的网络吞吐量

NDRAS-GP 对闲置时间内到达的数据进行预测补偿使 ONU 缓存数据尽可能得到发送，而 MSMA 只部分消除了闲置时间对时延效果影响，但相对于不进行预测消除闲置时间的 EFT 策略，MSMA 策略的时延又更优一些。图 9 为波长数 $K=2$ 时，NDRAS-GP 与 EFT, MSMA 及 NDRAS-LP 带宽利用率的比较。可见，随着负载率的增大，所有策略的带宽利用率逐渐增大，达到最大值后趋于稳定。NDRAS-GP 对闲置时间内到达的数据及 ONU 的请求信息进行预测，且在波长结束时间最早的时刻开始 DBA 计算并提前发送授予信息，较其它策略的带宽利用率均有所提高。这是因为 EFT 采用简单的波长最早可用原则进行波长分配未引入预测，而 MSMA 对部分 ONU 的请求信息进行预测一定程度上消除了周期间闲置时间的影响，NDRAS-LP 虽采用线性预测但较灰色预测其精度不高。因而，采用预测的 NDRAS-GP, NDRAS-LP 及 MSMA 比未预测的 EFT 带宽利用率效果更好，对闲置时间进行全预测的 NDRAS-GP 及 NDRAS-LP 比部分预测的 MSMA 带宽利用率更高。而灰色预测的预测精度较线性预测更高，使得 NDRAS-GP 比 NDRAS-LP 的效果更为理想。

图10和图11表示负载率为0.8且波长数 $K=2$ 时，接入距离对不同策略平均包时延和带宽利用率的影响。显而易见，随着接入距离的增加，平均包时延随之增大，而带宽利用率随之降低。TWDM-PON 多级分光的长距离传输结构使得OLT与ONU之间的接入距离增加，造成信息交互的往返时间增大，引起网络时延不同程度地增加；同时，波长处于空闲的时间增多，造成资源浪费，引起带宽利用率下降。此外，还可以看出接入距离对NDRAS-GP的影响较小。这是因为NDRAS-GP有效地对闲置时间内到达的数据进行预测补偿，减小了接入距离对平均包时延的影响；同时，采用高效的波长分配策略，可实现波长的负载均衡，促使带宽得以高效利用。

图 12 表示波长数 $K=2$ 时，3 种策略的带宽浪

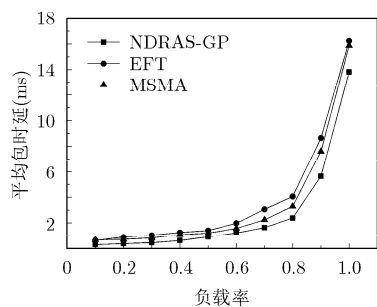


图 8 不同策略的平均包时延

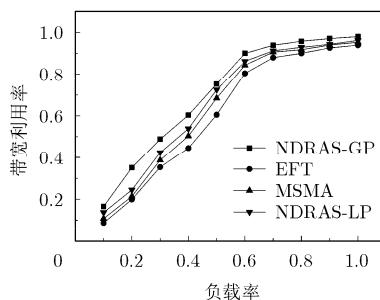


图 9 不同策略的带宽利用率

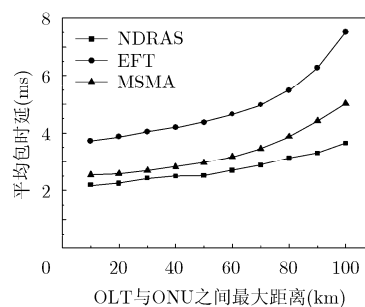


图 10 接入距离对不同策略平均包时延的影响

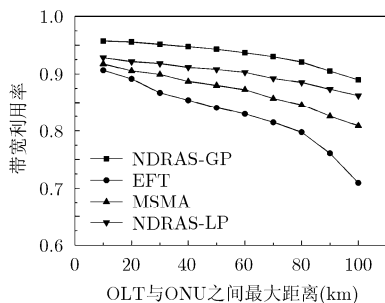


图 11 接入距离对不同策略带宽利用率的影响

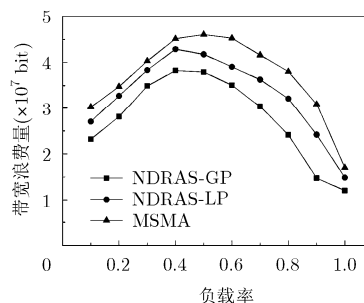


图 12 不同策略的带宽浪费量

费量随负载变化的情况。由图可见，随着负载率的增加，带宽浪费量呈现先上升后下降的趋势。负载率较小时，预测策略的引入，加之网络本身额外剩余带宽较大，造成严重的带宽浪费。当负载率超过0.4时，网络中额外剩余带宽减少，实际传输数据的带宽增加，带宽浪费随之减少。同时，由于灰色预测的精度较线性预测更高，带宽尽可能地被利用，使NDRAS-GP较NDRAS-LP带宽浪费量更小；而MSMA未对周期内所有ONU的闲置时间进行预测，使网络带宽利用未到达最大化，其带宽浪费比NDRAS-LP更为恶化。

5 总结

针对TWDM-PON传输距离的增加引起网络闲置时间增多的问题，本文提出带灰色预测的高效动态资源分配策略。通过灰色预测模型对闲置时间内的带宽进行预测补偿以减少网络时延及避免带宽浪费；同时，结合波长传输数据结束时间的差异性，提前进行DBA计算，对部分ONU的请求信息进行预测，动态改变各波长的优先级顺序并为其加载ONU数据，使各波长在一段时间内可达负载均衡。相比于未进行带宽预测补偿资源分配策略，NDRAS-GP减小了周期内闲置时间的影响，降低了网络时延，同时实现了波长负载均衡。

参考文献

[1] 熊余, 张鸿, 王汝言, 等. 基于光通路状态感知的分簇式故障

定位机制[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(1): 41-47. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00214.

XIONG Yu, ZHANG Hong, WANG Ruyan, *et al.* Fault location mechanism based on lightpath status aware using cluster allocation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(1): 41-47. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00214.

- [2] SALEM B, SUPA A S M, ZULKIFLI N, *et al.* Recent development on Time and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for next-generation passive optical network stage 2 (NG-PON2)[J]. *Optical Switching and Networking*, 2015, 15: 53-66. doi: 10.1109/JLT.2012.2215841.
- [3] NI C, GAN C, CHEN H, *et al.* Novel bandwidth allocation with quota-based excess-distribution algorithm and wavelength assignment in multi-wavelength access network[J]. *Optical Switching and Networking*, 2014, 13: 103-111.
- [4] NI C, GAN C, LI W *et al.* Bandwidth allocation based on priority and excess-bandwidth-utilized algorithm in WDM/TDM PON[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2015, 69(10): 1659-1666.
- [5] LIU X, ROUSKA 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. doi: 10.1364/JOCN.6.000104.
- [6] SHUAI Q and ANSARI N. Scheduling hybrid WDM/TDM EPONs with heterogeneous propagation delays[C]. IEEE

- International Conference on Communications, Sydney, Australia, 2014: 3877–3882. doi: 10.1109/ICC.2014.6883926.
- [7] KANONAKIS K and TOMKO 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. doi: 10.1109/JSAC.2010.100809.
- [8] BUTTABONI A, ANDRADE M, TORNATORE M, *et al.* A multi-threaded dynamic bandwidth and wavelength allocation scheme with void filling for long reach WDM/TDM PONs[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(8): 1149–1157. doi: 10.1109/JLT.2013.2242045.
- [9] ZHU Y and MAODE M. IPACT with Grant Estimation (IPACT-GE) scheme for ethernet passive optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(13): 2055–2063. doi: 10.1109/JLT.2008.919462.
- [10] Lu Y, GUO Y, and HE C. Dynamic wavelength and bandwidth allocation using adaptive linear prediction in WDM/TDM Ethernet passive optical networks[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Science)*, 2009, 14(2): 173–178.
- [11] DE S, SINGH V, GUPTA H M, *et al.* A new predictive dynamic priority scheduling in ethernet passive optical networks (EPONs)[J]. *Optical Switching and Networking*, 2010, 7(4): 215–223.
- [12] SHI Q, GAN C, MA X, *et al.* Dynamic bandwidth allocation using prediction in WDM/TDM passive optical network[C]. IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing, Shanghai, China, 2011: 375–378. doi: 10.1049/cp.2011.0913.
- [13] BASU S and DAS G. Scheduling hybrid WDM/TDM ethernet passive optical networks using modified stable matching algorithm[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(14): 2613–2622. doi: 10.1109/JLT.2014.2329831.
- [14] 青亮, 方旭明, 曾斌. 效用及实时业务 QoS 联合保证的资源分配方案[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1257–1261. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01174.
- QING Liang, FANG Xuming, and Zeng Bin. Utility and real time traffic QoS jointly guaranteed resource allocation scheme[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(5): 1257–1261. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01174.
- [15] RAZMKHAH A and RAHBAR A G. Dynamic bandwidth allocation in heterogeneous WDM EPONs[J]. *Telecommunication Systems*, 2015, 60(3): 1–11.
- [16] CHIANG J Y and CHEN C K. Application of grey prediction to inverse nonlinear heat conduction problem[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(3): 576–585.
- 王汝言：男，1969 年生，教授，博士，研究方向为空间光通信、光网络理论与技术、光信息处理、通信网络可靠性与故障管理。
- 蒋 婧：女，1988 年生，硕士生，研究方向为下一代无源网络资源调度算法。
- 熊 余：男，1982 年生，副研究员，博士，研究方向为下一代无源光网络的服务质量控制、绿色节能技术及可靠性抗毁技术。
- 唐剑波：男，1990 年生，硕士生，研究方向为基于混合接入的无源光网络动态资源分配机制。