

支持 ONU 模块独立不连续收发数据的节能方法

熊余, 管建军, 王汝言

(重庆邮电大学 光通信与网络重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: 为有效解决绿色无源光网络中的节能效果与时延性能的矛盾, 提出一种支持 ONU 模块独立不连续收发数据的节能方法。通过光网络单元的模块化, 各能耗模块独立地切换睡眠或唤醒模式, 从而在规定时隙内实现不连续地收发数据; 通过子周期划分, 将实时业务集中到第一个子周期内收发, 提升了网络的总体服务质量; 提出完全独立的上下行带宽分配算法, 使所提方法在流量上下行不对称的应用场景更具优势。仿真表明, 所提方法在保证业务时延性能的前提下, 网络的能耗得到进一步降低。

关键词: 无源光网络; 光网络单元; 模块化; 独立不连续; 业务区分; 节能; 时延

中图分类号: TN915.63

文献标识码: A

Energy-saving scheme supporting ONU modularization with independent-discontinuous transceiving

XIONG Yu, GUAN Jian-jun, WANG Ru-yan

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

Abstract: To effectively solve the contradiction between energy-saving and packet delay performance in green passive optical network, an energy-saving scheme supporting ONU modularization with independent-discontinuous transceiving is proposed. Utilizing the technology of optical network unit modularization, each module could switch to sleep or awake mode independently and transmit data in specified time slots discontinuously. Simultaneously, to enhance the quality of service of the overall network, the real-time packets are transmitted in the first sub-cycle based on the sub-cycle division strategy. Furthermore, an independent bandwidth allocation algorithm is proposed, which makes the scheme have more advantages in the asymmetric network traffic scenarios. Simulation results verify that the proposed scheme further reduce the network energy consumption on the premise of guarantee the packet delay.

Key words: passive optical network; optical network unit; modularization; independent discontinuous; service differentiation; energy-saving; packet delay

1 引言

随着社会的发展, 通信网的能耗问题越来越受到人们的重视。整个网络中, 因接入网铺设广泛、数量庞大, 其消耗的能量约占网络总能耗的 70%^[1]。因此构建一个绿色节能的接入网对降低网络的整体能耗至关重要。通过对 DSL、HFC、无源光网络

(PON)、WiMAX 等多种有线或无线接入技术的对比, 发现无源光网络是高速接入网中节能效率最高的^[2]。为此, 构建以 PON 为核心的接入网是未来高速节能型接入网发展的方向。据统计, 一个基于 IP 的光接入网中, 光网络单元(ONU)的能耗占 60%^[3]。可见, 提高 PON 系统中 ONU 的能量有效性将有效降低接入网的总能耗。

收稿日期: 2014-05-09; 修回日期: 2015-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401052, 61001105); 重庆市自然科学基金资助项目(2011BA2041); 重庆市教委科学技术基金资助项目(KJ110531, KJ1400418); 重庆市高校优秀人才支持计划基金资助项目(2011-29)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61401052, 61001105); The Natural Science Foundation of Chongqing(2011BA2041); The Science and Technology Project of Chongqing Municipal Education Commission(KJ110531, KJ1400418); The Third Excellent Talents in Chongqing's Universities (2011-29)

一般可采用睡眠机制来避免 ONU 一直处于高能耗的工作状态, 因此合理地设计 ONU 睡眠和唤醒时间是 PON 节能技术的研究重点^[4]。ITU-T 在 2009 年形成的 ITU-T G.984 技术规范中描述了 4 种 ONU 节能方法, 即 ONU 减负、ONU 假寐、快速睡眠和深度睡眠^[5], 但对采用何种睡眠方案并没有做出具体规定。文献[6,7]提出当 ONU 负载低于某个阈值时, 将 ONU 置于睡眠模式, 而高于阈值时则唤醒 ONU。这虽实现了节能, 但固定的阈值设计并不能很好地适应动态网络的要求。文献[8,9]提出以上行为中心(UCS)和以下行为中心(DCS)2种节能方案, 使下行业务只在上行发送的时隙内进行接收, 或只有 ONU 完全没有数据收发时将 ONU 睡眠, 其中 DCS 的时延更小, 而 UCS 节能效果更好。为平衡时延和能耗之间的矛盾, 文献[10]为各个 ONU 分别分配收发时隙, 在本轮轮询周期分配的时隙内收发业务数据, 在无收发任务的时段内进入低功耗的睡眠状态。

以上研究中, ONU 被整体地转入睡眠/唤醒状态, 并没有深入分析 ONU 内部模块的能耗状况。ONU 主要由收发机、串并转换器、处理器、交换设备、缓存等模块组成, 其中收发机及周边电路所消耗的能量占 ONU 总能耗的 60%~70%^[11]。因此允许接收机和发射机单独睡眠分别收发业务是实现 ONU 节能的新途径。文献[12]首次提出 ONU 模块化耗能思想, 它针对收发机的能耗问题, 根据业务状态动态关闭 ONU 内的收发模块, 从而实现有效节能, 但其时延性能没有得到有效保障。文献[13]进一步讨论了 ONU 的 2 种能耗级别与 4 种能耗级别状态下的能耗差异, 但仍没有考虑时延与节能的矛盾。文献[14]研究了收发机的独立睡眠问题, 并考虑到时延性能, 提出在每个轮询周期内按数据分组排队时延动态改变 ONU 轮询顺序, 同时优先发送实时业务的调度方案, 综合性能表现优越, 但由于非实时业务须等待实时业务完全发送后才转发, 非实时业务时延性能牺牲较大。因此, 结合时延性能充分研究 ONU 模块化能耗问题, 大力挖掘 ONU 模块化的节能潜力, 可在保证网络服务质量的前提下, 进一步降低 PON 的能耗。

通常, 光线路终端(OLT)广播下行帧, ONU 则接收并根据帧头信息判断是否为自己需要的数据, 是则转发, 否则丢弃, 这种方式导致 ONU 接收了大量无用数据。为此本文提出一种支持 ONU 模块

独立不连续收发数据的节能方法(OM-IDTR, energy-saving scheme supporting ONU modularization with independent-discontinuous transceiving)。其主要思想为: 建立 ONU 模块化能耗模型, 使 ONU 不同模块根据业务情况独立地唤醒或睡眠, 并使 ONU 在所分配的时隙内不连续地只接收自己所需要的数据, 从而增大睡眠时间, 避免了由于接收无用数据而带来的能耗; 进一步地, 通过划分子周期的方式, 将每轮询周期内的实时业务数据集中到第 1 个子周期内收发, 同时第 2 个子周期内收发非实时业务, 达到了不过分影响非实时业务的服务质量, 又尽可能地减少实时业务时延的目的; 并且为实现所提方法, 使 ONU 上/下行模块获取相关工作时隙信息, GATE 帧被重新做了设计。

2 问题描述

2.1 能耗模型

一般地, ONU 可分为上行模块、下行模块和基础模块。其中, 上行模块包括发射机、串并转换器及其周边电路等; 下行模块包括接收机、串并转换器及其周边电路等; 基础模块是指 ONU 上电后, 除了上下行模块之外需要一直处于工作状态的部件, 包括介质访问控制、处理器、交换设备、电源、物理层接口和缓存等, 同时由于 ONU 的唤醒速度与时钟恢复和同步直接相关, 为更快地唤醒 ONU, 将时钟划分到基础模块中, 如图 1 所示。其中收发机及周边电路所消耗的能量占 ONU 总能耗的主要部分。显然, 若网络中仅有上/下行业务时, 只唤醒 ONU 的上/下行模块, 让下/上行模块保持睡眠的方案, 比上/下行模块都被唤醒的传统方案更为节能。将相比于传统 ONU, 模块化 ONU 虽然控制结构稍加复杂, 但带来的节能效果显著。同时, 模块化也使得未来对 ONU 进行升级换代时, 只需更换相关模块即可, 避免因网络升级而废弃整个 ONU, 能够充分利用现有设备, ONU 整个生命周期性价比更高, 进一步提高了网络运营商的成本效率。

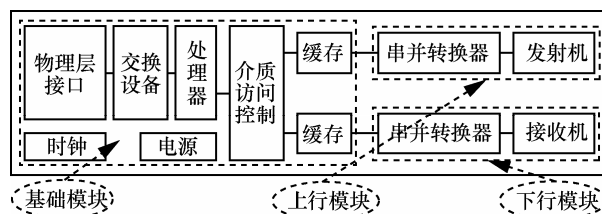


图 1 ONU 内部模块结构

为此，可构建一种新的模块化能耗模型，其 ONU 的能耗如下

$$E = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K (P_{ua} T_{ua,i}^n + P_{us} T_{us,i}^n + P_{da} T_{da,i}^n + P_{ds} T_{ds,i}^n + P_{base} T_{cycle}) \quad (1)$$

其中， E 表示 PON 中所有 ONU 的总能耗， N 表示轮询周期数， K 为 ONU 个数， P_{ua}/P_{da} 表示 ONU 上/下行模块处于工作状态下的功耗， P_{us}/P_{ds} 表示 ONU 上/下行模块处于睡眠状态下的功耗， $T_{ua,i}^n/T_{da,i}^n$ 表示 ONU _{i} 在第 n 个轮询周期内上/下行模块处于工作状态的时间， $T_{us,i}^n/T_{ds,i}^n$ 表示 ONU _{i} 在第 n 个轮询周期内上/下行模块处于睡眠状态的时间， P_{base} 表示 ONU 基础模块的功耗， T_{cycle} 表示轮询周期的长度。

2.2 业务分类

在建立 ONU 模块化能耗模型的基础上，为降低睡眠对网络时延对业务传输性能带来的影响，可进一步将业务分为实时业务与非实时业务来分析时延性能。其中，实时业务包括 VoIP、IPTV、VOD 等时延敏感业务；非实时业务指 E-mail、文件下载等对时延不敏感业务。

因此考虑业务分类，设计一种双轮询子周期方案，将实时业务集中到第一个子周期内进行收发，使实时业务数据能够尽可能快地得到发送，从而提高时延敏感业务的服务质量。同时，在第 2 个子周期内收发非实时业务，这能够避免由于实时业务始终挤占信道，非实时业务得不到发送而性能急剧恶化的情况发生，兼顾了 2 种业务的时延性能。

可见，PON 节能研究的关键问题是要解决时延与能效这对矛盾。如何在保证网络业务特别是实时业务性能，同时又不过分影响非实时业务性能的前提下，进一步减少网络能耗是研究的重点所在。

3 方法描述

本节提出支持 ONU 模块独立不连续收发数据的节能方法，其步骤如下。

Step1 每周期开始时，OLT 统计各 ONU 实时/非实时业务带宽请求及 OLT 缓存队列中将发往各 ONU 的实时/非实时业务数据量。

Step2 分配各 ONU 实时/非实时业务带宽。考虑到 ONU 之间的公平性，为各 ONU 设置保证带宽；采用剩余带宽回收策略，并将剩余带宽分配给重负载 ONU，提高带宽利用率。具体见 3.1 节。

Step3 ONU 进行相关数据的收发与睡眠。采用双轮询子周期的方式收发业务数据，在无数据收发的其他间隙内，ONU 相关模块则转入睡眠状态以节省能耗。具体见 3.2 节。

Step4 完成一个周期的收发，回到 Step1。

方法中涉及的符号及含义如表 1 所示。

表 1 符号及含义

符号	含义
B^n	第 n 个轮询周期的总带宽
k_{RP}^n	第 n 个轮询周期内请求实时业务带宽的 ONU 数量
k_{NP}^n	第 n 个轮询周期内请求非实时业务带宽的 ONU 数量
$B_{g,RP}^n$	第 n 个轮询周期内 ONU 实时业务保证带宽
$B_{g,NP}^n$	第 n 个轮询周期内 ONU 非实时业务保证带宽
$B_{u,RP,i}^n$	第 n 个轮询周期内 ONU _{i} 实时业务带宽请求
$B_{u,NP,i}^n$	第 n 个轮询周期内 ONU _{i} 非实时业务带宽请求
$UB_{u,RP,i}^n$	第 n 个轮询周期内授予 ONU _{i} 的实时业务带宽
$UB_{u,NP,i}^n$	第 n 个轮询周期内授予 ONU _{i} 的非实时业务带宽
T_g	保护时隙
R_u	上行链路速率
R_d	下行链路速率
N	仿真周期数
K	ONU 数量

3.1 带宽分配

随着如 VOD 等上下行流量不对称业务的兴起，网络对带宽分配提出了更高要求。本文提出上/下行完全独立的带宽分配策略，使 ONU 相关模块的睡眠/唤醒与网络情况更加吻合，同时在不对称业务场景下更具优势。每个轮询周期内，首先为实时/非实时业务分配基本保证带宽，设 φ 为每轮询周期内，所有 ONU 实时业务的带宽请求占总带宽请求的比例，则在每个轮询周期内上行实时业务基本保证带宽为 $B_\varphi = B^n \varphi$ 。

同理，设 θ 为每轮询周期内，OLT 将发往各 ONU 的下行实时业务数据量占总数据量的比例，则每个轮询周期内下行实时业务基本保证带宽为 $B_\theta = B^n \theta$ 。

1) 上行带宽分配

各 ONU 实时业务保证带宽为

$$B_{g,RP}^n = \frac{B_\varphi - k_{RP}^n R_u T_g}{k_{RP}^n} \quad (2)$$

若 ONU 请求的实时业务带宽小于实时业务保证带宽, 即轻负载, 则该 ONU 被授予的实时业务带宽为

$$UB_{uRP,i}^n = B_{uRP,i}^n, B_{uRP,i}^n \leq B_{g,uRP}^n \quad (3)$$

此时所有轻负载 ONU 的剩余带宽为

$$B_{ex,uRP}^n = \sum_{i=1} (B_{g,uRP}^n - B_{uRP,i}^n), i \in \{B_{uRP,i}^n \leq B_{g,uRP}^n\} \quad (4)$$

将剩余带宽按比例公平分配给各重负载 ONU, 每个重负载 ONU 可得到的额外带宽为

$$\bar{B}_{ex,uRP,i}^n = \frac{B_{uRP,i}^n - B_{g,uRP}^n}{\sum_{i=1} (B_{uRP,i}^n - B_{g,uRP}^n)} B_{ex,uRP}^n, i \in \{B_{uRP,i}^n > B_{g,uRP}^n\} \quad (5)$$

则授予重负载 ONU 的带宽为保证带宽与额外带宽之和, 即

$$UB_{uRP,i}^n = \bar{B}_{ex,uRP,i}^n + B_{g,uRP}^n, B_{uRP,i}^n > B_{g,uRP}^n \quad (6)$$

由上可知, 非实时业务总带宽为 $B^n - B_\varphi$, 同理, 各 ONU 最终分配的非实时业务带宽为

$$UB_{uNP,i}^n = \begin{cases} B_{uNP,i}^n, B_{uNP,i}^n \leq B_{g,uNP}^n \\ \bar{B}_{ex,uNP,i}^n + B_{g,uNP}^n, B_{uNP,i}^n > B_{g,uNP}^n \end{cases} \quad (7)$$

2) 下行带宽分配

与上行带宽分配相类似, 可得到下行带宽分配情况如下

$$DB_{dRP,i}^n = \begin{cases} B_{dRP,i}^n, B_{dRP,i}^n \leq B_{g,dRP}^n \\ \bar{B}_{ex,dRP,i}^n + B_{g,dRP}^n, B_{dRP,i}^n > B_{g,dRP}^n \end{cases} \quad (8)$$

$$DB_{dNP,i}^n = \begin{cases} B_{dNP,i}^n, B_{dNP,i}^n \leq B_{g,dNP}^n \\ \bar{B}_{ex,dNP,i}^n + B_{g,dNP}^n, B_{dNP,i}^n > B_{g,dNP}^n \end{cases} \quad (9)$$

其中, $B_{dRP,i} / B_{dNP,i}$ 为 OLT 缓存的 ONU_i 实时/非实时业务数据量, $DB_{dRP,i}^n / DB_{dNP,i}^n$ 是第 n 周期内允许发往 ONU_i 的实时/非实时业务数据量。

通过上述带宽分配方法, 各 ONU 间带宽授予的公平性得以保证, 同时剩余带宽的回收实现了带宽资源的有效利用, 提高了带宽利用率; 同时上/下行完全独立的带宽分配方式, 能够有效避免因流量不对称而对网络性能造成的影响, 对于不对称流量业务场景, 在时延性能方面更具优势。

3.2 数据收发

完成带宽分配后, 为提升网络的时延性能, 将每个轮询周期划分为双轮询子周期, 在第 1 个子周期内集中收发实时业务, 第 2 个子周期内集中收发非实时业务。ONU 内部的各模块在所分配的时隙内进行相应数据的收发, 其他时隙则转入睡眠状态以减少能耗, 如图 2 所示。

为将相关带宽时隙信息通知各 ONU, OLT 需计算各个时间点并将时间点信息加载到 GATE 帧中。下面 L_R 表示 REPORT 帧长度, T_{DBA} 表示带宽计算时间, T_{ov} 表示 ONU 模块唤醒时间。

1) 下行方向

t_1 为轮询周期开始时间。

t_2 为 ONU_i 唤醒下行模块接收 GATE 帧的时间

$$t_2 = t_1 + T_{DBA} + \frac{RTT_i}{2} - T_{ov} \quad (10)$$

t_3 为 ONU_i 下行模块接收 GATE 帧完毕时间

$$t_3 = t_2 + \frac{L_G}{R_d} \quad (11)$$

t_4 为 ONU_i 唤醒下行模块接收实时业务的时间

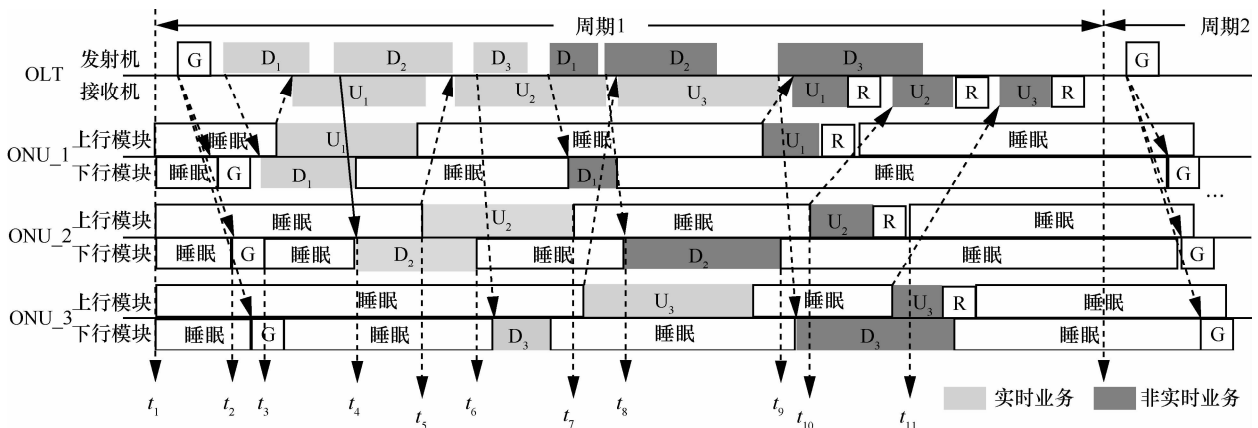


图 2 独立不连续收发数据

$$t_4 = t_1 + T_{DBA} + \frac{L_G}{R_d} + \sum_{k=1}^{i-1} \left(\frac{DB_{dRP,k}^n}{R_d} + T_g \right) + \frac{RTT_i}{2} - T_{ov} \quad (12)$$

t_6 为 ONU_{*i*} 下行模块实时业务接收完毕并转入睡眠状态的时间

$$t_6 = t_1 + T_{DBA} + \frac{L_G}{R_d} + \sum_{k=1}^i \left(\frac{DB_{dRP,k}^n}{R_d} + T_g \right) + \frac{RTT_i}{2} \quad (13)$$

t_8 为 ONU_{*i*} 唤醒下行模块接收非实时业务时间

$$t_8 = t_1 + T_{DBA} + \frac{L_G}{R_d} + \sum_{k=1}^K \left(\frac{DB_{dRP,k}^n}{R_d} + T_g \right) + \sum_{k=1}^{i-1} \left(\frac{DB_{dNP,k}^n}{R_d} + T_g \right) + \frac{RTT_i}{2} - T_{ov} \quad (14)$$

t_9 为 ONU_{*i*} 下行模块接收非实时业务完毕并转入睡眠的时间

$$t_9 = t_1 + T_{DBA} + \frac{L_G}{R_d} + \sum_{k=1}^K \left(\frac{DB_{dRP,k}^n}{R_d} + T_g \right) + \sum_{k=1}^i \left(\frac{DB_{dNP,k}^n}{R_d} + T_g \right) + \frac{RTT_i}{2} \quad (15)$$

由此可得到第 n 个周期内 ONU_{*i*} 下行模块的工作时间为

$$T_{da,i}^n = \frac{L_G + DB_{dRP,i}^n + DB_{dNP,i}^n}{R_d} + 3T_{ov} \quad (16)$$

则第 n 个周期内 ONU_{*i*} 下行模块的睡眠时间为

$$T_{ds,i}^n = T_{cycle} - T_{da,i}^n \quad (17)$$

可得所有 ONU 下行模块的能耗

$$E_d = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K (P_{da} T_{da,i}^n + P_{ds} T_{ds,i}^n) \quad (18)$$

2) 上行方向

t_5 为 ONU_{*i*} 唤醒上行模块发送实时业务时间

$$t_5 = t_1 + T_{DBA} + \frac{L_G}{R_d} + \sum_{k=1}^{i-1} \left(\frac{UB_{uRP,k}^n}{R_u} + T_g \right) - \frac{RTT_i}{2} - T_{ov} \quad (19)$$

t_7 为 ONU_{*i*} 上行模块实时业务发送完毕并转入睡眠状态的时间

$$t_7 = t_1 + T_{DBA} + \frac{L_G}{R_d} + \sum_{k=1}^i \left(\frac{UB_{uRP,k}^n}{R_u} + T_g \right) - \frac{RTT_i}{2} \quad (20)$$

t_{10} 为 ONU_{*i*} 唤醒上行模块发送非实时业务时间。

$$t_{10} = t_1 + T_{DBA} + \frac{L_G}{R_d} + \sum_{k=1}^K \left(\frac{UB_{uRP,k}^n}{R_u} + T_g \right) + \sum_{k=1}^{i-1} \left(\frac{UB_{uNP,k}^n}{R_u} + \frac{L_R}{R_u} + T_g \right) - \frac{RTT_i}{2} - T_{ov} \quad (21)$$

t_{11} 为 ONU_{*i*} 上行模块非实时业务发送完毕并转入睡眠状态的时间

$$t_{11} = t_1 + T_{DBA} + \frac{L_G}{R_d} + \sum_{k=1}^K \left(\frac{UB_{uRP,k}^n}{R_u} + T_g \right) + \sum_{k=1}^i \left(\frac{UB_{uNP,k}^n}{R_u} + \frac{L_R}{R_u} + T_g \right) - \frac{RTT_i}{2} \quad (22)$$

第 n 个周期内 ONU_{*i*} 上行模块的工作时间为

$$T_{ua,i}^n = \frac{L_R + UB_{uRP,i}^n + UB_{uNP,i}^n}{R_u} + 2T_{ov} \quad (23)$$

则第 n 个周期内 ONU_{*i*} 上行模块的睡眠时间为

$$T_{us,i}^n = T_{cycle} - T_{ua,i}^n \quad (24)$$

可得所有 ONU 上行模块的能耗为

$$E_u = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K (P_{ua} T_{ua,i}^n + P_{us} T_{us,i}^n) \quad (25)$$

3.3 GATE 帧设计

普通 GATE 帧只包含各 ONU 上行开始时间与上行长度信息，为实现所提方法，使 ONU 上/下行模块得到相关工作时隙信息，需重新设计 GATE 帧。因此可在 802.3ah 规定的多点控制协议(MPCP)帧基本结构与框架下，在 GATE 帧中添加 ONU 上/下行时隙信息，从而使 ONU 在接收到 GATE 帧后，可以得到与各模块相关的时隙信息。同时一个 GATE 广播帧包含所有 ONU 信息的设计，相比于传统只包含一个 ONU 信息的 GATE 帧，由于帧头帧尾等信息共用，网络控制信令开销更小，修改后结构如表 2 所示。

4 仿真分析

4.1 仿真指标

定义 1 平均每比特能耗 E_b ：仿真时间内消耗的总能量与所发送的比特数之比，即

$$E_b = \frac{E}{N_{bit}} \quad (26)$$

其中， E 表示所有 ONU 的能耗， N_{bit} 表示所有 ONU 发送/接收的总比特数。

表 2 修改后的 GATE 帧结构

字段	大小/byte
目的地址	6
源地址	6
类型=8808	2
操作码	2
时间戳	4
标识字节	4
T_{cycle} 周期	2
GATE 帧长度	2
ONU ₁ 实时业务上行开始时间	4
ONU ₁ 实时业务上行长度	2
ONU ₁ 非实时业务上行开始时间	4
ONU ₁ 非实时业务上行长度	2
ONU ₁ 实时业务下行开始时间	4
ONU ₁ 实时业务下行长度	2
ONU ₁ 非实时业务下行开始时间	4
ONU ₁ 非实时业务下行长度	2
ONU ₁ GATE 帧接收时间	4
ONU ₂
...	...
ONU _n
...	...
FCS	4

定义 2 平均时延 D : 若一个数据分组 t_1 时间到达 OLT 缓存, t_2 时间到达 ONU 缓存, 则其时延为 t_2-t_1 。由此可定义仿真时间内所有数据分组的时延与数据分组的数量之比为平均时延。

实时业务平均时延为

$$D_{RP} = \frac{\sum_{k=1}^{num_RP} (t_{RP_out}^k - t_{RP_in}^k)}{num_RP} \quad (27)$$

非实时业务平均时延为

$$D_{NP} = \frac{\sum_{k=1}^{num_NP} (t_{NP_out}^k - t_{NP_in}^k)}{num_NP} \quad (28)$$

其中, $t_{RP_out}^k / t_{NP_out}^k$ 为第 k 个实时/非实时业务数据分组到达 ONU 缓存的时间。 $t_{RP_in}^k / t_{NP_in}^k$ 为第 k 个实时/非实时业务数据分组到达 OLT 缓存的时间。 num_RP / num_NP 为实时/非实时业务数据分组总数量。

4.2 仿真环境

采用 C/C++语言搭建仿真平台, 分业务模块、事件处理模块、数据统计模块等, 在包含 1 个 OLT、1 个分光器和 $K(4,8,16,32)$ 个 ONU 的常规 EPON 网络中进行仿真。假定 OLT 与 ONU 之间距离固定且为 20 km, 所部署的 ONU 支持文中所提节能方法, 数据分组到达率满足泊松分布, 分组大小为 64~1 518 byte, 上下行链路速率均为 1 Gbit/s, 每轮询周期长度固定为 2 ms, 仿真中实时业务与非实时业务数量比例为 1:4, 其他仿真参数如表 3 所示^[8,15,16]。

表 3 仿真参数

参数	数值
P_{ua}	1.63 W
P_{da}	1.55 W
P_{us}	0.15 W
P_{ds}	0.15 W
P_{base}	0.7 W
L_G	480 byte(16 ONU)
T_{ov}	125 μ s
T_g	5 μ s
L_R	64 byte
RIT	200 μ s
T_{DBA}	10 μ s

4.3 仿真结果与分析

仿真分析中将对比以下几种方法。

PIS 方法: 不采用睡眠模式的传统方法。

UCS 方法^[8,9]: 不区分上/下行模块, ONU 以整体方式转入睡眠状态, 在上行发送时, 接收下行数据, 其他时隙则转入睡眠状态。

ZYF 方法^[10]: 不区分上/下行模块, ONU 以整体方式转入睡眠状态, 下行方向各 ONU 在各自的时隙内进行相关数据的收发, 其他时隙则转入睡眠状态。

ESPS 方法^[14]: 上下行独立睡眠, 区分实时/非实时业务并优先收发实时业务, 下行带宽分配与上行带宽分配情况相关。

图 3 给出在 16 个 ONU 情况下各种方法的能耗情况。可见, 随着负载的增大, 各种方法的平均每比特能耗逐步下降并逐渐趋于稳定。这是因为当负载较小时, 由于系统发送的数据量较小, 因而每个比特能耗较高; 而负载的增大使系统发送的数据量随之增加, 当系统趋于饱和时, 系统的每比特能耗

也将趋于稳定。PIS 方法由于未采用睡眠方式，能耗最高。ZYF 方法在数据收发时，ONU 以整体方式被唤醒，减少了某些模块的睡眠时间，节能效果得到有效提升。UCS 方法限制了下行数据的收发，ONU 睡眠时间最长，且唤醒次数最少，故其能耗最低。所提 OM-IDTR 方法与 ESPS 方法都采用上/下行独立睡眠的技术，两者能耗相似，取得了稍次于 UCS 方法的节能效果。

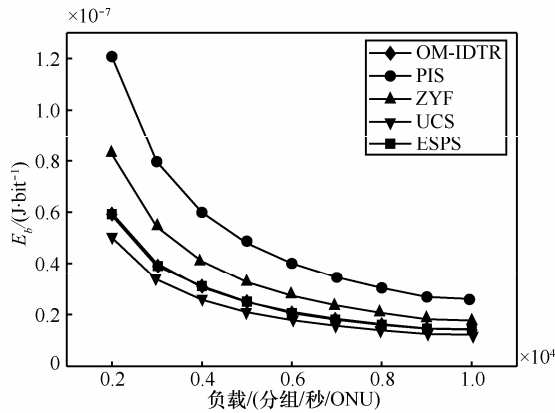


图 3 不同方法的平均每比特能耗对比

图 4 给出不同数量 ONU 下所提方法的能耗对比。可见，随着 ONU 的增多，网络能耗将增加，造成平均每比特能耗增大。同时随着网络负载增大，ONU 收发的数据量增大，降低了平均每比特能耗。由此可知，网元数量与能耗成正相关关系，通过减少网元数量，提高单个网元吞吐量可以提高节能效果。

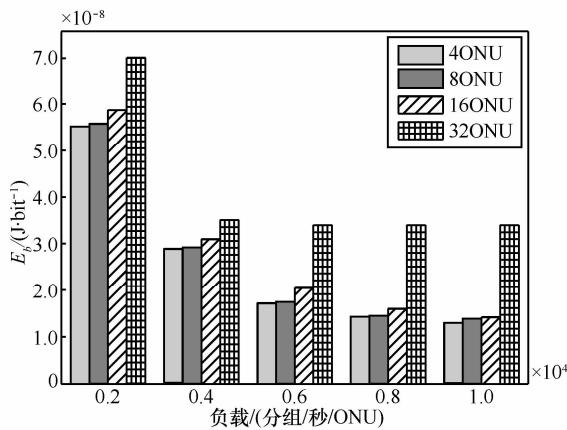
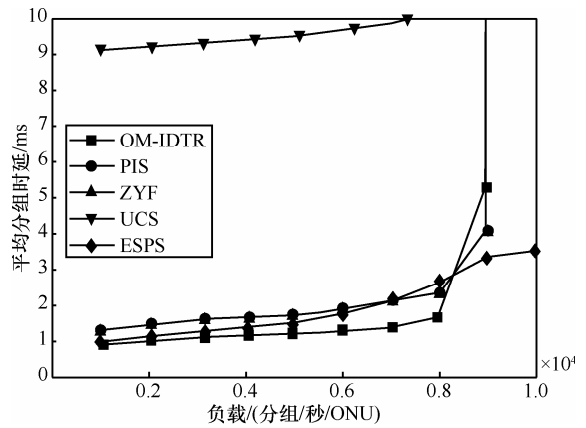


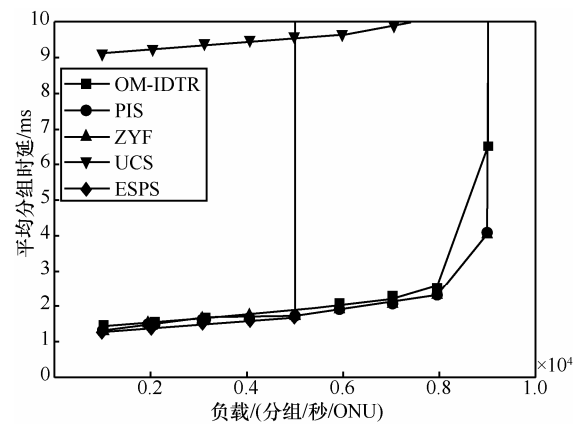
图 4 采用 OM-IDTR 方法的平均每比特能耗对比

从图 5 可知，系统在未饱和前，上一个周期到达的数据可以在下一个周期收发完毕，时延大约在一个轮询周期长度 2 ms 内。而当系统饱和时，由于系统来不及收发数据，时延将迅速增加。UCS 方法

中，由于上下行收发被重叠在一个时隙内，所分配的时隙信息与网络下行业务负载状况较难匹配，引入了 10 ms 左右的下行分组延时^[8]，时延性能最差。ESPS 方法采用发送完所有实时业务数据分组再发送非实时业务的方式，因此时延较小，大约为几个毫秒。在负载较低时，OM-IDTR 方法的实时业务时延性能与 ESPS 方法相似，但在高负载时，由于有部分带宽用于发送非实时业务，因此高负载实时业务时延性能较 ESPS 方法略差。同理，ESPS 方法中，高负载时非实时业务很难及时发送，因此时延性能较差，且时延性能恶化点较早到来。反之，OM-IDTR 方法在高负载时非实时业务时延性能则更优。



(a) 实时业务



(b) 非实时业务

图 5 不同方法的平均分组时延对比

图 6 给出采用 OM-IDTR 方法后不同 ONU 数量下实时/非实时业务的时延情况。可以看出，在业务负载较低时，由于网络可将数据及时收发，故而时延差别较小，特别是在 ONU 数量只有 4 和 8 个时，基本没有时延；而当单个 ONU 负载增大时，

ONU 数量变多带来整个网络的负载增大时,系统将很快饱和,从而使系统不能及时收发数据,造成时延将迅速增大,且 ONU 数量越多时延增加越快。因此可知,在一个 EPON 网络中,ONU 数量过多

将会降低系统性能。

图 7 就实时业务 2 种情况,分析下行平均分组时延随上行负载的变化情况(DS 表示下行负载大小,单位与横坐标一致),可以看出,ESPS 方法中

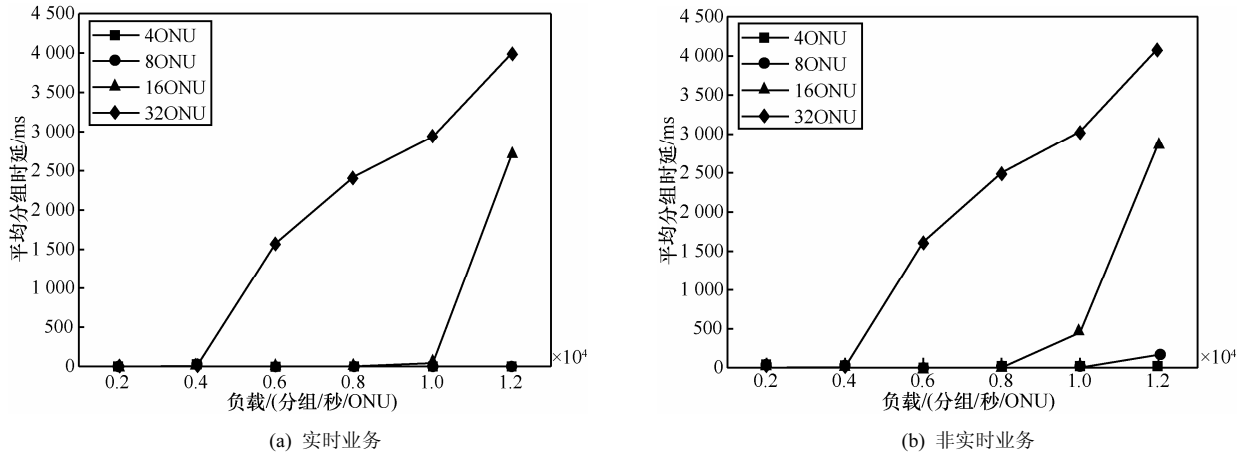


图 6 采用 OM-IDTR 方法的平均分组时延情况

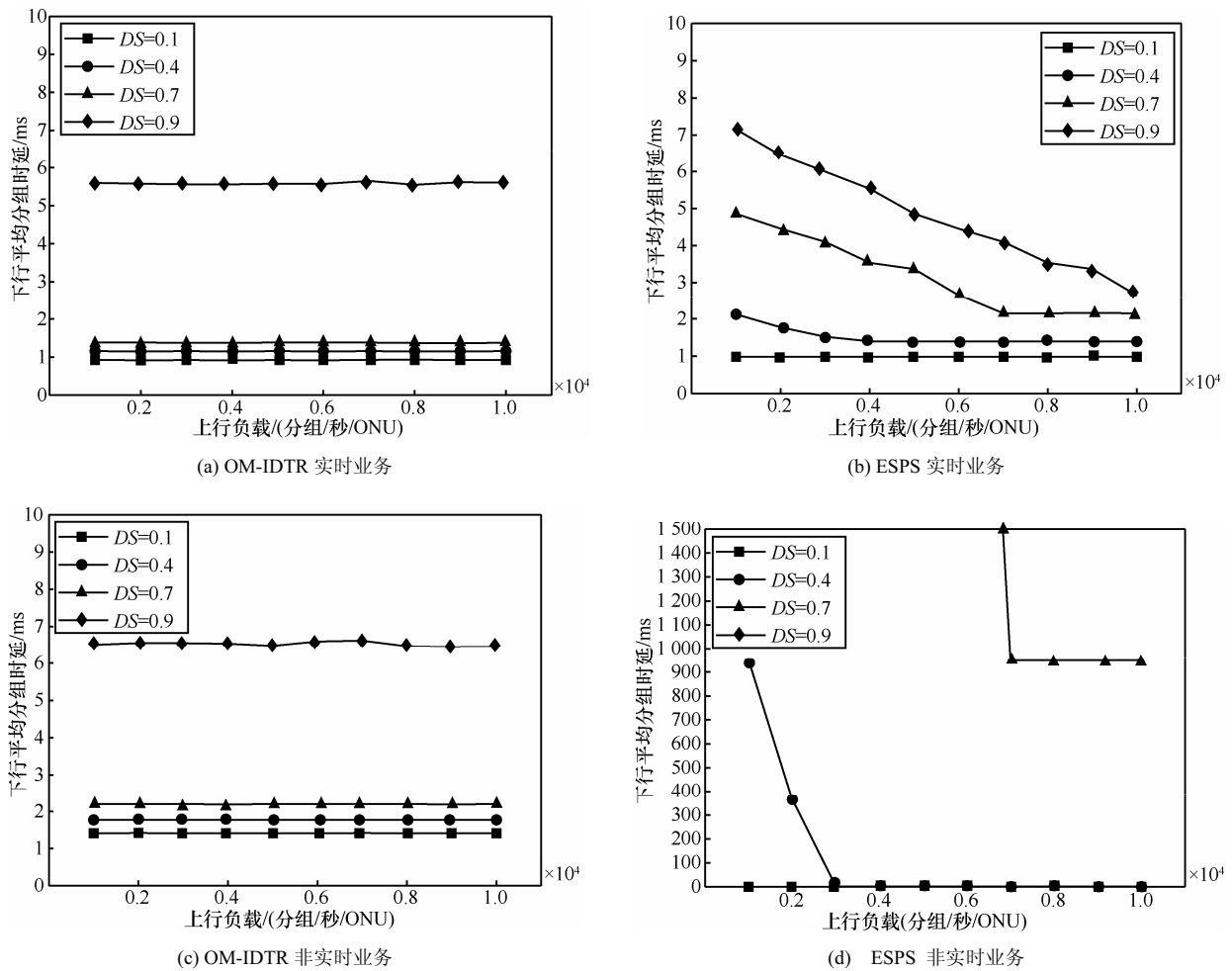


图 7 下行平均分组时延与上行负载的变化关系

由于下行带宽取决于上行带宽分配情况, 因此当下行负载大于上行负载时, 下行时延性能变差。而 OM-IDTR 方法中由于上下行带宽分配完全独立, 上行负载并不影响下行传输, 因此下行时延不随上行负载变化而变化。这对如 VOD、文件下载等应用场景来说具有重要意义, 由于上下行流量差异巨大, 采用上下行完全独立的方式能够有效改善网络性能, 给用户提供更优质的服务体验。

5 结束语

通过研究无源光网络节能技术, 在保证业务时延性能的前提下, 进一步减少网络能耗, 提出一种支持 ONU 模块独立不连续收发数据的节能方法 (OM-IDTR), 使 ONU 相关模块能够根据网络业务状况独立转入睡眠状态, 从而增大了睡眠时间, 降低了网络能耗; 相比于其他方法, OM-IDTR 方法通过划分子周期的方式, 提前收发实时业务, 减少网络时延, 且能够有效缓解高负载时非实时业务时延性能恶化问题; 同时由于采用上下行完全独立的带宽分配方法, 在上下行流量不对称的网络环境中, 网络时延性能相比于其他方法优势明显。对于未来工作, 从物理设备的角度看, 需进一步减少 ONU 唤醒开销; 从方法优化的角度看, 可以通过优化带宽分配方法及深入研究新的保证业务时延性能的方法, 在保证网络服务质量的前提下进一步提高能效。

参考文献:

- [1] ZHANG Y, CHOWDHURY P, TORNATORE M, *et al.* Energy efficiency in telecom optical networks[J]. *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, 2010, 12(4): 441-458.
- [2] BALIGA J, AVRE R W A, HINTON K, *et al.* Energy consumption in wired and wireless access networks[J]. *Communications Magazine*, IEEE, 2011, 49(6): 70-77.
- [3] KANI J. Power saving techniques and mechanisms for optical access networks systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4): 563-570.
- [4] SHI L, MUKHERJEE B, LEE S S. Energy-efficient PON with sleep-mode ONU: progress, challenges, and solutions[J]. *Network*, IEEE, 2012, 26(2): 36-41.
- [5] CONSERVATION G P. ITU-T G-Series Recommendations- Supplement 45 (G. sup45)[R]. ITU-T, May, 2009.
- [6] CHOWDHURY P, TORNATORE M, SARKAR S, *et al.* Building a green wireless-optical broadband access network (WOBAN)[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(16): 2219-2229.
- [7] KUBO R, KANI J, FUJIMOTO Y, *et al.* Adaptive power saving mechanism for 10 Gigabit class PON systems[J]. *IEICE transactions on communications*, 2010, 93(2): 280-288.
- [8] YAN Y, WONG S W, VALCARENGHI L, *et al.* Energy management mechanism for ethernet passive optical networks (EPONs)[A]. *IEEE International Conference on Communications, ICC 2010*[C]. Cape Town, South Africa: IEEE Press, 2010.1-5.
- [9] YAN Y, DITTMANN L. Energy efficiency in ethernet passive optical networks (EPONs): protocol design and performance evaluation[J]. *Journal of Communications*, 2011, 6(3): 249-261.
- [10] 张引发, 贾磊, 杨剑等. 新的支持 ONU 睡眠模式的时隙管理方案[J]. *通信学报*, 2012, 33(10): 175-182.
- [11] ZHANG Y F, JIA L, YANG J, *et al.* New slot management scheme supporting ONU sleep mode[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(10): 175-182.
- [12] VALCARENGHI L, VAN D P, CASTOLDI P. How to save energy in passive optical networks[A]. *IEEE 13th International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON 2011*[C]. Stockholm, Sweden: IEEE Press, 2011. 1-5.
- [13] ZHANG J, ANSARI N. Toward energy-efficient 1G-EPON and 10G-EPON with sleep-aware MAC control and scheduling[J]. *Communications Magazine*, IEEE, 2011, 49(2): s33-s38.
- [14] NEWAZ S H S, CUEVAS A, LEE G M, *et al.* Evaluating energy efficiency of ONUs having multiple power levels in TDM-PONs[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 26(6): 1248-1251.
- [15] 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.
- [16] SKUBIC B, HOOD D. Evaluation of ONU power saving modes for gigabit-capable passive optical networks[J]. *Network*, IEEE, 2011, 25(2): 20-24.
- [17] VALCARENGHI L, VAN D P, RAPONI P G, *et al.* Energy efficiency in passive optical networks: where, when, and how[J]. *Network*, IEEE, 2012, 26(6): 61-68.
- [18] WONG S W, VALCARENGHI L, YEN S H, *et al.* Sleep mode for energy saving PONs: advantages and drawbacks[A]. *IEEE GLOBE-COM Workshops, 2009*[C]. Honolulu, USA: IEEE Press, 2009.1-6.

作者简介:



熊余 (1982-), 男, 四川资中人, 博士, 重庆邮电大学副研究员, 主要研究方向为宽带网络可靠性及抗毁、无源光网络带宽分配及节能等。

管建军 (1990-), 男, 安徽合肥人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为无源光网络。

王汝言 (1969-), 男, 湖北浠水人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为全光网络、下一代光网络故障管理机制、多媒体信息处理等。