

以太网无源光网络 ONU 休眠节能技术*

赵继军, 冯楠, 张凯, 郭昆

(河北工程大学信息与电气工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 针对以太网无源光网络(EPON)中的能源消耗问题,从标准制定和发展层面上阐述了节能技术的标准化现状,明确了 EPON 休眠机制的基本原理;详细分析比较了 EPON 中多种 ONU 休眠控制机制的特点、性能差异及发展趋势;对 EPON 中绿色带宽分配算法进行了分类讨论,并总结了其他休眠技术。最后对未来的研究工作进行了展望。

关键词: 以太网无源光网络;能源消耗;节能;休眠控制机制;绿色带宽分配算法

中图分类号: TN929.18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)03-0661-06

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.03.004

Energy-efficient ONUs' sleeping control technologies in Ethernet passive optical network

ZHAO Ji-jun, FENG Nan, ZHANG Kai, GUO Kun

(School of Information & Electric Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038, China)

Abstract: According to the features of the energy consumption in Ethernet passive optical network (EPON), this paper described the actuality of energy-efficient technology standardization in terms of the standard level, studied the basic principle about sleep mechanism in EPON. It also analyzed and compared the characteristics, performance and the corresponding research prospects of the various specific ONU sleep control mechanisms in detail. It discussed and analyzed the green bandwidth allocation and summarized other sleep control technologies. Finally, it gave the key research issues in future.

Key words: Ethernet passive optical network; energy-consumption; energy efficient; sleep control mechanism; green bandwidth allocation algorithm

日前,国家发改委等八部委正在联合研究“宽带中国战略”^[1]实施方案。“宽带中国战略”的实施将加快推进宽带基础设施建设,提高网络接入带宽,扩大用户普及和拓展应用领域。然而,从目前的发展情况看,电信运营商对接入网络的带宽资源控制能力还不够,未来会面临较高的资本和运维支出,能源消耗巨大。气候变暖、能源危机等全球化问题的加剧使能源消耗中占有较大比重的接入网络^[2~4]成为节能技术的重要研究对象。接入网作为电信网络的“最后一公里”,其终极目标为实现光纤到户(fiber to the home, FTTH),相对于电信网络中的城域网和骨干网,需要更多的通信设备,其能源消耗大约占整个电信网络的70%^[5]。EPON和千兆比特无源光网络(gigabit passive optical network, GPON)作为光纤接入网的两种主流技术,相比于接入网的其他接入方式,节能效果更好,尤其是EPON以其标准化程度高、维护简单、接入成本低等优点已成为我国FTTH重要的实现技术。随着EPON系统的规模越来越大,速率越来越高,能耗问题将愈加严重。有效降低接入网络的能源消耗对降低整个通信网络的能源消耗至关重要,降低PON中的能源消耗可以进一步提升宽带接入的成本效率,推进绿色通信产业的发展。

PON系统的节能技术受到了学术界的广泛关注,研究主

要集中在物理层节能方式和数据链路层节能方式以及混合策略的节能方式^[6]。基于物理层的节能方式无须改变上层协议,通常改进一些物理层的设备或器件结构^[7],如不断改进集成电路技术;或采用更好的节能装置,如突发模式的激光器^[8];或采用能暂停工作的节能芯片,如某些嵌入式处理器^[9]等。基于数据链路层的节能方式主要是在EPON的媒体接入控制(media access control, MAC)层和GPON的传输汇聚(transmission convergence, TC)层上设计高效的节能通信协议或算法。其中,ONU休眠方式即当ONU端的业务流量比较少时使其处于休眠状态,是当前最重要的一种节能方式^[10~12]。基于混合策略的节能方式有休眠和自适应链路控制结合的混合机制,Kubo等人^[13]最先采用自适应链路速率控制来实现节能,即根据当前网络的流量自适应地调整、选择与之匹配的最佳的链路速率,之后其进一步在1 G-EPON与10 G-EPON混合网络结构中将休眠机制与自适应链路控制机制结合起来有效地实现了节能^[14]。

1 休眠节能技术标准化现状

近年来,各国际标准化组织纷纷提出通过引入一种合适的能源管理机制(energy management mechanism, EMM)来减少整

收稿日期: 2012-08-07; 修回日期: 2012-09-13 基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(F2010001045)

作者简介: 赵继军(1970-),男,河北邯郸人,教授,硕士,博士(后),CCF会员,主要研究方向为下一代光网络、无线传感器网络;冯楠(1987-),女,河北邯郸人,硕士研究生,主要研究方向为光纤无线接入网络(fengnan65@163.com);张凯(1987-),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要研究方向为下一代光网络;郭昆(1986-),男,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向为下一代光网络。

个电信网络的能源消耗。针对以太网中的能耗问题,IEEE 于 2010 年提出了新的以太网节能标准 IEEE 802.3az^[15],它通过引入低能耗空闲(low power idle, LPI)模式来降低以太网链路的能源消耗。然而,以太网节能机制尚不能直接应用于 PON 系统中,还需要结合 PON 自身的特点进行改进和深入研究。

ITU-T 于 2009 年 5 月发布了关于 GPON 的 G-sup-45 标准^[16]。该标准描述了 ONU 休眠节能具有四种模式,即 ONU 电源受限、ONU 假寐、ONU 深度休眠和 ONU 快速休眠(也称周期休眠)。其中,ONU 的快速休眠模式是目前广泛研究的休眠机制的应用模式,实际的节能设备中一般支持假寐和快速休眠模式而不支持深度休眠模式。此外,G-sup-45 标准还规定了实际部署网络时采用该四种休眠模式时涉及的具体问题。

ITU-T 在 2010 年提出的 G.987.3 标准^[17]中针对 10 Gbps GPON(10-gigabit-capable PON, XG-PON)定义了 GPON 架构的传输汇聚层,明确了 XG-PON 的能源管理及相关协议,包括 ONU 的假寐及快速休眠节能模式中具体性能参数的合理配置以及 OLT 和 ONU 状态转换需要达到的条件。其中,主要的参数如表 1 所示。

表 1 节能状态下的 ONU 及 OLT 参数

参数	意义描述
T_{aware}	快速休眠模式中由 ONU 本地计时的正常工作时间
T_{sleep}	快速休眠模式中由 ONU 本地计时的休眠时间
T_{hold}	ONU 强制休眠的最大时间
T_{alarmed}	ONU 没有按照 OLT 的要求醒来时 OLT 端的唤醒时间
T_{cri}	OLT 休眠状态转换到正常工作时间

ITU-T 还于 2010 年 10 月发布 G.988 标准^[18](XG-PON 中 ONU 管理和控制接口定义配置),定义了 ONU 动态节能管制控制实体的具体属性和相关参数。上述关于 GPON 的 ONU 休眠节能方式是通过网络的物理层操作管理和维护信息(PLOAM 信息)来进行休眠周期等一系列的休眠控制。

截至目前,IEEE 发布的最新 EPON 标准 IEEE 802.3av^[19]中并没有定义关于 ONU 的节能特征,但是,在 IEEE 802.3av 工作组的建议中已明确提出了要对 ONU 引入低功率状态^[20],并具体描述了 EPON 中休眠节能的基本原理。

2 EPON 休眠节能基本原理

在 EPON 系统架构中,ONU 主要由光接收机、光发射机、业务监测模块、中央处理器、MAC 控制模块、电源管理模块以及光接口模块等构成。业务监测模块主要用来监测网络中的业务流量,当 ONU 端的业务流量满足一定的条件时,通过光接口模块将上行及下行数据信息传送到 MAC 控制模块,MAC 控制模块解析指令并通告中央处理器进行唤醒 ONU 或指示 ONU 休眠。

EPON 的 ONU 休眠节能技术与 GPON 相关标准中已规定的 ONU 休眠模式及机制基本一致,其发射机与接收机是否关闭要满足标准中规定的四种休眠模式。与 GPON 中不相同的是,在 EPON 中,对休眠间隔等具体参数的控制要遵循 IEEE 802.3ah/av 规定的 MAC 层控制协议即多点控制协议(multi-point control protocol, MPCP)信息,不再是 GPON 中的 PLOAM 信息。MPCP 中规定利用控制帧授权信息(Gate)、请求信息(Report)进行 OLT 与 ONU 之间消息的传输控制。EPON 的休

眠节能控制机制可以由 ONU 向 OLT 发送休眠请求来发起和终止休眠,也可以由 OLT 发起和终止^[20],如图 1 所示。

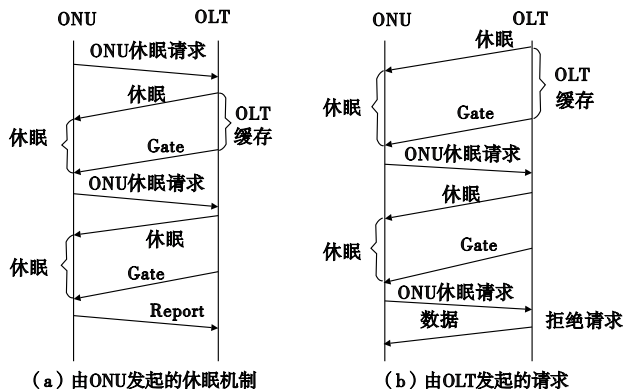


图 1 EPON 休眠节能机制

图 1(a)中,当 ONU 的业务监测模块监测系统的业务流量满足 ONU 的休眠条件以后,向 OLT 发送请求休眠信息,OLT 在收到休眠请求信息后允许 ONU 休眠。ONU 在收到该指令信息后进入休眠。在休眠期间,ONU 的接收机和发射机均关闭,但仍然保持定时和业务监测的功能,本地的定时器就指定了 ONU 的休眠开始与结束的时间。在该确定的休眠时间结束之前,ONU 内部的自由时钟会自动产生一个唤醒信号;当休眠结束以后,OLT 发送 Gate 信息给 ONU,这时 ONU 苏醒并接收命令。若此时 ONU 端仍满足休眠条件,则它将向 OLT 发送睡眠请求信息,OLT 接收请求信息后判断允许 ONU 休眠;否则,若此时 ONU 不满足休眠条件,则它将立即唤醒并向 OLT 发送 Report 信息和数据信息。在整个过程中,假设 ONU 端始终没有上行业务,那么 OLT 与 ONU 每隔 50 ms^[10]仍需要进行上述周期性的请求—授权的握手过程,换句话说,OLT 至少每隔 50 ms 生成一个 Gate 信息,以保证 ONU 一直处于正常的链路模式。

图 1(b)中,当 ONU 休眠由 OLT 的休眠控制信息发起或终结时,ONU 首先接收来自 OLT 的休眠命令并进入休眠过程,然后不断地进行与图 1(a)相似的过程,OLT 接收休眠请求信息后允许 ONU 休眠,OLT 同时也可以拒绝请求并向 ONU 发送下行数据。整个 ONU 的休眠过程中,OLT 将不断地缓存下行数据,直到 ONU 苏醒后才发送下行数据给 ONU。

3 EPON 休眠节能控制机制

已有的 GPON 休眠节能标准明确地指出了 ONU 休眠模式以及假寐和快速休眠模式中的具体参数设置及 OLT 和 ONU 端各状态之间的转换框架;EPON 的标准工作组建议^[20]中也明确了对 ONU 引入休眠机制以实现节能。但是所有这些标准和建议都并未设定具体的休眠节能控制机制。因此,深入研究各种具体的休眠节能控制机制对于 PON 的节能技术研究具有重要意义。

3.1 上行中心调度机制与下行中心调度机制

Yan 等人^[21-23]在 EPON 中引入了 EMM 机制并比较了两种不同的控制休眠机制,即上行中心调度机制(upstream centric scheduling, UCS)和下行中心调度机制(downstream centric scheduling, DCS)。休眠周期中的休眠时间和工作时间都在这两种休眠控制算法中计算得到。UCS 原理示意图如图 2(a)所

示,为简单化,这里以两个 ONU 为例,G 表示 Gate 信息,R 表示报告信息,d 表示上行及下行的数据。该机制中 OLT 在 ONU 休眠时期内缓存下行流量,它根据各 ONU 的上行请求来轮询 ONU,以此授权上行数据传输带宽及最大化轮询休眠周期,ONU 则在指定的上行时隙中发送上行数据。

DCS 机制的原理示意图如图 2(b)所示。该机制除具有包含上行休眠信息的 Gate 信息以外,因考虑了下行业务的分配,还引入了可命令 ONU 工作并接收下行数据的 Gate_{dc}信息(图中用 Gd 来表示),dd 表示要传输的下行数据,其他信息表示与(a)相同。因此,只要 OLT 发送下行流量,ONU 必须立即激活并传输数据,由此不断更新各 ONU 的休眠周期。

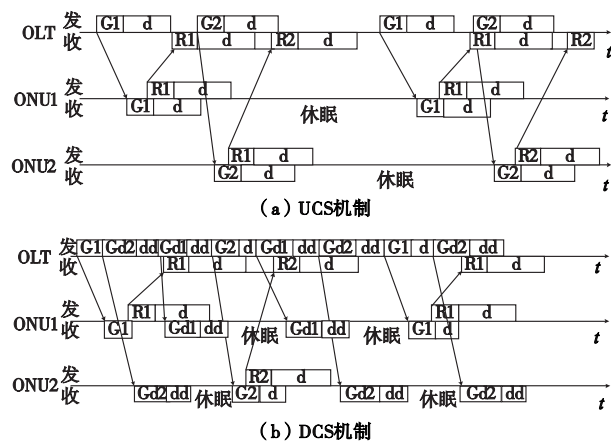


图2 UCS和DCS机制

UCS 及 DCS 两种机制的复杂程度相对较低。随着网络业务流量的动态变化,其性能会受上行和下行两个方向的业务流量的影响。若某时刻下行业务流量远远大于上行的流量,则采用 UCS 算法时由于下行的数据信息需要至少等待一个轮询周期才可以发送,因此如果没有严格的服务质量(QoS)的约束,将造成下行链路具有较高的延迟。

采用 DCS 机制时,若下行的业务流量比上行流量少,ONU 将要一直根据上行请求处于工作状态,只有当 OLT 处于缓存下行数据的状态时 ONU 才会进入休眠模式。DCS 机制是一种更为灵活的方式,但是因为它考虑了下行业务流量存在,所以它将消耗仅考虑上行业务请求时得到的空闲时期的能量,节能效果不如 UCS。

综合来讲,UCS 由于上行和下行方向数据传输的时间重叠从而可以节省更多的能量,而 DCS 可以依赖带宽分配算法满足更好的 QoS 需求。

3.2 实时休眠控制机制

在考虑休眠节能的 EPON 系统中,当 ONU 从休眠状态到工作状态不断转换时,网络必须要进行 OLT 与 ONU 之间的时钟同步。Wong 等人^[24]针对这一问题,通过在 ONU 中设计具有快速时钟恢复能力的电路来减少 ONU 状态转换的时间开销,如图 3 所示。

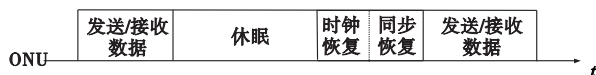


图3 ONU 状态转换时隙图

并且 Wong 等人提出了一种新的实时休眠控制机制(just-in-time sleep control, JIT-SC)。该机制考虑了 OLT 与 ONU 之间时钟的偏移;ONU 在 OLT 指定的时隙内进行休眠与激活状态

之间的转换,ONU 收到 OLT 的 Gate 控制信息以后,即可获得状态转移及数据传输的时间等信息;当 ONU 传输上行数据结束以后,ONU 保持休眠并等待下次传输时间的到来。

JIT-SC 机制是在特定的 ONU 架构下提出的,该机制的实现具有一定的复杂性,但是它可以最大化 ONU 休眠周期。由于该机制中的 Gate 信息是 OLT 在上一个周期中通过动态带宽分配(dynamic bandwidth allocation, DBA)算法计算得到的,该机制依赖于带宽分配算法来进行精确的休眠时间的评估,因此,该机制的重点仍然在于采用先进的带宽分配算法来实现 EPON 中的有效节能。

3.3 休眠感知的 MAC 层控制和调度机制

Zhang 等人^[25]提出了在 1 G-EPON 和 10 G-EPON 混合网络架构中休眠感知的 MAC 层控制和调度机制。该机制提出了具有多能源等级的 ONU 的两种休眠模式:a)大于一个 DBA 周期的休眠,它是通过设置一个 idle_threshold 的门限值来表示 ONU 休眠前最大持续空闲时间,但每次的休眠时间不能超过 50 ms,由此描述了激活状态前每一次休眠的时间;b)在一个 DBA 周期内的休眠,它是指 ONU 通过对 OLT 到达其他 ONU 的业务流量进行评估来设定一个门限值,从而确定自己的休眠时间。

休眠感知的 MAC 协议控制机制中 ONU 的每一个能源等级依赖于 ONU 内部的硬件是否处于打开和关闭状态,软件复杂程度高。在一个 DBA 休眠时期内的休眠比在大于一个 DBA 周期时可以更有效地节能。然而,在一个 DBA 周期内休眠时,ONU 会造成提前唤醒或延迟唤醒,提前唤醒时能源得不到进一步的节省,而延迟唤醒的情况下将会造成网络 QoS 的下降。该机制没有在具体的软件或硬件平台上仿真验证,也没有指出其对用户的 QoS 需求的影响。因此,对于能源感知的 MAC 协议设计对网络的具体性能影响还需要进一步的验证。

3.4 休眠和周期性唤醒机制

Kubo 等人^[26]提出了在 PON 中具有可变睡眠周期的休眠和周期性唤醒(sleep and periodic wake-up, SPW)机制来实现对休眠周期的控制。SPW 机制已经在无线传感器网络的节能技术研究中得到了广泛的应用^[27-29],它们通过基于两次输入的包的间隔和服务等级的两种方法来设置休眠周期。依赖于数据包间隔思想的休眠周期控制算法改变了传统 SPW 中依靠包到达时的门限值而确定固定休眠周期,即休眠周期随着数据包间隔的函数不断地变化;基于服务等级思想的休眠周期控制算法则充分考虑了业务的优先级,将 PON 中承载的业务分为八个等级,最高优先级的业务到来时确定休眠周期的功能优先选择,之后逐次进行不同优先级业务所分别对应的不同休眠周期的分配。

SPW 机制考虑了网络的状态并通过包到达间隔、队列长度、服务等级等来设置休眠周期。与其他休眠机制相比,其最重要的优点是它不依赖于 DBA 算法,并且考虑了业务等级的差异,更适合 EPON 中休眠机制的改进。但 SPW 机制中 OLT 可能低估或高估下行业务流量而造成延迟增加或带宽利用率的降低,此外,该机制未利用上行的 Report 信息进行休眠周期的确定^[30]。在突发业务的情况下 ONU 无法立即执行 SPW 机制,这些都是未来改进该机制仍需研究的方向。

3.5 网络编码机制

Liu 等人^[31]结合网络编码技术提出了基于下行带宽预留的 ONU 精确休眠控制机制(downstream-bandwidth-reservation-based accurate ONU sleep control, DBR-ASC),该机制同时针对 OLT 和 ONU 两端,通过网络编码技术将两个包编码为一个包,且按照一定的顺序调度这些数据包并计算相应的休眠时间,从而达到 ONU 精确休眠控制的目的。该机制具体如图 4 所示。图 4 中 d 表示汇聚的但未经编码的数据包,NCd 表示汇聚且编码了的数据包,这里的 Gate 信息里包含了下一轮询周期内到达每一个 ONU 的 Gate 信息、下行汇聚的包的长度以及包传输的开始和结束时间。通过 DBR-ASC 机制的扩展,已汇聚且编码的数据包在每一个 ONU 固定的传输时隙内接收,从而减少了 ONU 接收机打开的时间,通过仿真验证了所提出机制在网络性能提升以及能耗降低等方面的有效性。

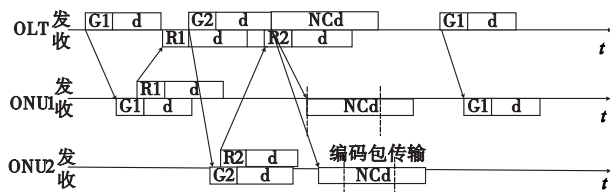


图4 基于网络编码的DBR-ASC机制

网络编码技术是信息论的重要突破,是当前信息领域研究

表2 经典 ONU 休眠控制机制比较

机制名称	复杂程度	主要优点	主要缺点	节能效果	服务质量(QoS)	研究展望
上行中心调度	低	简单	节能	高	取决于 DBA	减少延迟
下行中心调度	低	网络性能好	延迟大	中	高	最大休眠
实时休眠控制	中	硬件基础	依赖 DBA	中	中	DBA 改进
休眠感知的 MAC 协议	高	硬件基础	复杂	高	待研究	DBA 算法验证
休眠和周期性唤醒(SPW)机制	低	不依赖 DBA	存在突发业务时	中	高	突发业务仿真
网络编码机制	高	先进	待研究	高	高	相关参数改变后验证

4 EPON 绿色带宽分配算法

4.1 绿色带宽分配算法基本思想

面向节能的带宽分配算法称做绿色带宽分配(green bandwidth allocation, GBA)算法^[37]。传统 EPON 中先进的带宽分配算法可以有效改善网络的带宽利用率、降低平均延迟、提高网络的吞吐量等。GBA 的基本思想是建立在传统带宽分配的基础之上,除了要保证网络的性能以外,还要能够满足 ONU 的节能特征。

EPON 经典带宽分配算法是 2002 年 Kramer 等人^[38]提出的基于间插周期轮询(interleaved polling with adaptive cycle time, IPACT)的动态带宽分配算法。基于 IPACT 基础之上的 GBA 算法仅仅考虑了上行方向上的带宽分配,并没有考虑下行方向上的带宽分配原则。文献[39,40]提出了一种双向轮询式 DBA 算法来进行 EPON 中节能策略的设计。它与传统 EPON 中的 DBA 算法最大的不同之处在于,它在上行和下行两个方向上都进行轮询的带宽分配,即在下行方向上,针对不同的 ONU,OLT 需要进行不同数据的存储,并采用周期轮询的方式为每一个 ONU 分配带宽。文献中对提出的双向轮询的 DBA 算法在利用 MATLAB 搭建的仿真平台上进行了仿真验

证,证明了节能方案的有效性。将网络编码技术结合 QoS 需求应用于 EPON 中可显著减少 OLT 的发射机及 ONU 的接收机的工作时间,从而实现高效节能;同时,采用网络编码技术可以增大网络的下行吞吐量,提高网络的性能,进一步地通过改变 EPON 中的网络参数及对不同长度的数据包进行编/解码来验证其在 PON 中的影响。由于网络编码技术在无线网络和组播业务中的广泛应用,将网络编码技术应用于光与无线混合接入网络^[35,36]的情景是未来非常具有前景的研究方向。上述几种经典的 ONU 休眠节能控制机制分别侧重不同的角度,在一定程度上有效地实现了在 EPON 中的节能,它们在实现复杂程度、主要优缺点、节能效果、服务质量保证以及未来的研究展望等方面的具体比较如表 2 中所示。

通过对上述几种经典的休眠控制机制的研究可以得出,EPON 中的能源效率以及 QoS 保证是各休眠控制机制的两个重要指标。设计 ONU 休眠节能控制机制的基本原则是在适当的硬件及软件复杂程度下尽可能使 ONU 的休眠时间达到最大,并且要尽可能得满足网络的 QoS 需求。

上述 UCS、DCS、JIT-SC 机制、网络编码节能机制等对网络的节能效率及网络性能的影响都依赖于带宽分配算法所决定的 ONU 休眠周期,如何在上述机制中采用先进的带宽分配算法来权衡节能效率与 QoS 这两个性能指标尤为重要。

证,证明了节能方案的有效性。

因此,GBA 算法基本思想是要在传统上行 DBA 算法基础之上充分考虑下行方向的带宽分配策略,DCS 机制、DBR-ASC 机制都充分体现了这一思想。

4.2 GBA 算法分类

1) 根据带宽分配的方式

a) 固定 GBA 算法。固定带宽分配也称为静态带宽分配,它是指当 ONU 的业务流量小于一定值时使 ONU 周期性地在指定的时隙长度后唤醒。Lee 等人^[41]提出了 EPON 中一种新型的能源感知的 MAC 协议,它使得 ONU 在正常工作模式下采用 DBA 算法,而在休眠模式下采用固定带宽分配模式而不是动态带宽分配模式。然而在该算法中并没有考虑网络 QoS 的需求。

b) 动态 GBA 算法。在 EPON 中,动态绿色带宽分配(dynamic green bandwidth allocation, DGBA)是建立在 IPACT 算法之上并对其进行扩展。在数据链路层,算法的设计需要引入休眠、休眠请求等控制信息,然后在此框架下运行 DBA 算法以达到休眠节能的目的。

Kanonakis 等人^[42]提出了一个 1G/10 G-EPON 中的小时隙固定带宽分配算法,该算法实质是一种新型的混合静态和动态的下行分配调度算法,它在有限的时隙内进行固定带宽的分

配,但却以一种动态的方式进行调整,从而确保 ONU 处于长时间的休眠状态。该机制使得整个 PON 系统在不依赖于网络负载的情况下同时兼顾了节能与包延迟。

2) 根据 ONU 上行传输的特点^[30]

a) 休眠结束后直接传输。这种情况是指一旦 ONU 唤醒,就将立即传输缓存在 ONU 内的数据信息。这种情况下减少了网络的同步与时钟恢复的时间开销,但是在 EPON 中,该情景需要 OLT 对所有 ONU 的休眠时间进行精确的同步并调整,以避免两个或者多个 ONU 共享信道时的冲突。

b) 休眠请求后传输。这种情况是指一旦 ONU 唤醒,它要在上行方向上发布一个请求并等待 OLT 的授权。这种情况与上一种情况相比,不需要 OLT 与 ONU 之间精确地同步,但是该情况下会引起额外的延迟,因此在算法复杂度和节能效果上将会付出一定的代价。

无论上述哪一种传输方式,ONU 在接收到 OLT 的授权信息之前都需要等待一个空闲时间,而这个空闲时间的长短则依赖于 ONU 端上行的业务流量。

3) 根据是否满足服务质量的需求

a) 无 QoS 保证的 GBA 算法。无 QoS 保证的 GBA 算法主要关注了网络的节能效率,如 UCS 控制机制中的 GBA 算法设计,忽略了整个网络的性能要求。而网络的性能主要体现在延迟、延迟抖动、吞吐量、资源利用率、对多等级业务的支持等多个方面。

b) 有 QoS 保证的 GBA 算法。有 QoS 保证的 GBA 算法在设计时根据客户对业务的需求充分考虑了网络的性能需求。因此,在 OLT 中采用先进的排队理论或者采用先进的包调度技术使其可以自适应地根据网络业务等级和网络负载要求调整 GBA 算法的相关参数,以达到提高节能效率并满足 QoS 需求的双重目的。

针对这一问题,Sankaran 等人^[43]也提出了一种忽略 ONU 内的缓冲区的算法设计,它并不在 ONU 中缓存数据,而是在 ONU 侧的终端节点处缓存,并且当且仅当 ONU 需要接收数据时终端节点才进行发送。该算法依赖于 GBA 算法,其在减小能源消耗及网络开销的同时增加了延迟,仿真结果表明由该算法带来的延迟代价落在了一个可接受的范围之内。

4.3 GBA 算法设计原则

无论 EPON 中具体网络参数如何变化,或者设计采用哪一种 ONU 休眠控制机制,在设计 GBA 算法时都应遵循一定的准则,其主要分为以下几个方面:

a) 设计时先明确算法设计时需要扩展的 MPCP,无论协议怎样按照网络需求进行扩展,都应遵循在 IEEE 802.3av 中已标准化了的 MPCP。

b) 在满足 a) 的原则下,算法设计时应充分考虑现有已经成熟并正在不断发展的 DBA 算法的设计。确保各 ONU 在共享带宽的情况下传输数据时避免冲突,在带宽利用率、延迟、延迟抖动、吞吐量等方面保证网络的性能,满足网络 QoS 的需求。

c) 在满足 b) 的原则下,算法设计时应使得在 GBA 周期内 ONU 休眠时间尽可能达到最大,使得节能效率更高,接入成本更低。

d) 在满足 c) 的原则下,算法设计时要充分考虑对网络中下

行方向业务的调度,使得 GBA 算法在综合了上行方向与下行方向业务流量以后,节能效率以及网络的服务质量都达到最高。

因此,一般意义上进行 GBA 算法时的基本流程大致分为以下几个步骤:

a) 给出一个预先设定的延迟要求以及 EPON 中指定的服务类型(如固定服务、限定服务、敞开服务等);

b) OLT 检查轮询表,等待接收请求信息,可以是集中式即等待所有来自 ONU 的请求信息以后进行授权,也可以是每接收到一个请求信息即进行授权;

c) OLT 根据上行带宽的请求计算为 ONU 分配的上行带宽大小;

d) OLT 根据下行缓冲区中的业务流量计算为 ONU 分配的下行带宽大小,即在已分配的上行传输带宽上调度休眠时期内缓存在 OLT 的下行数据给某目的 ONU;

e) 由请求计算判别相应 ONU 的休眠模式,生成相应的授权信息,并计算各授权信息的分配时刻,向整个 EPON 中的所有 ONU 发送包含休眠时间的授权信息。

5 其他休眠节能算法设计

EPON 中 ONU 休眠节能除了上述几种典型 ONU 休眠控制机制及其框架下的具体 GBA 算法外,还有许多算法无须扩展协议或者不依赖于 GBA 算法。Rodríguez-Pérez 等人^[44]提出了一种基于数据包汇聚的上行方向的节能算法,该算法无须改进传统的协议和 DBA 算法。他们指明了 ONU 休眠状态与正常发送数据状态之间的转移过程,当数据包长度小于规定的门限值时,ONU 进入休眠状态;并通过改变不同的门限值大小进行了总链路时间、能源消耗和平均包延迟等指标的仿真验证,在保证网络性能的前提下实现了节能。

Zhang 等人^[45]提出了一种面向 ONU 休眠节能的半马尔科夫链的能耗模型,该模型也无须扩展标准协议,它分别在 OLT 和 ONU 端进行相应的下行业务调度和休眠控制,ONU 通过下行业务的历史到达情况预测当前 ONU 队列状况,并根据自己的休眠规则进行休眠周期的调整;同样,OLT 同时会根据 ONU 的休眠情况预测其缓存序列中的下行业务流量。

Dhaini 等人^[46]针对 ONU 的休眠节能方式,采用数据突发的基本思想,通过多个包汇聚成一个包进行传输,减少了由于各个数据包头在休眠与工作状态之间转换的次数,从而有效地减小了由状态转换造成的总时间开销。此外,文献中基于此思想还建立了 ONU 休眠时间精确的解析模型,利用排队论理论分析并证明了网络中受限服务条件下每一个 ONU 的排队延迟及最大休眠时间,从而达到休眠节能的目的。

6 结束语

随着视频点播(VOD)、高清电视(HDTV)、对等网络(P2P)等新型多媒体业务的爆炸式增长,用户对于接入网络的带宽需求越来越大,基于传统时分复用无源光网络(time multiplex passive optical network, TDM-PON)越来越难以满足用户需求,因此,下一代 PON 是以具有更高速率的 TDM-PON、波分复用无源光网络(wavelength division multiplex passive optical network, WDM-PON)、时分与波分混合无源光网络(time wavelength division

multiplex passive optical network, TWDM-PON) 以及正交频分复用无源光网络 (orthogonal frequency division multiplex passive optical network, OFDM-PON) 为代表, 在理论和实际层面正在逐步发展并不断演进。解决具有不同网络架构的下一代 PON 中的能耗问题不仅取决于软件层面的节能技术, 很大程度上也依赖于网络的架构, 因此, 除了延续 TDM-PON 中节能的关键技术外, 还要在特殊网络架构下研究相应的节能技术或对网络的各层设备进行功能聚合以减少网络设备的数目。

本文面向 EPON 中 ONU 休眠节能技术, 从不同侧面对网络中多种具体的 ONU 休眠控制机制及绿色带宽分配算法进行了研究。在此基础上, 对于在 10 G-EPON 中设计一种随网络负载动态变化同时可以兼顾能源效率、数据传送性能以及对多等级服务质量支持的 ONU 休眠节能控制机制及相应的带宽分配算法, 并利用 OPNET 网络仿真软件对其进行仿真实现, 这都将作为今后的研究方向。

参考文献:

- [1] 毛谦. 光纤接入是“宽带中国”的基石[J]. 信息通信技术, 2012(2):4-5.
- [2] 林闯, 田源, 姚敏. 绿色网络和绿色评价: 节能机制、模型和评价[J]. 计算机学报, 2011, 34(4):593-612.
- [3] GUPTA M, SINGH S. Greening of the Internet[C]//Proc of Conference on Applications Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2003:19-26.
- [4] BALIGA J, AYRE R, HINTON K, *et al.* Energy consumption in optical IP networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(13):2391-2403.
- [5] LANGE C, GLADISCH A. On the energy consumption of FTTH access networks[C]//Proc of Optical Fiber Communication and National Fiber Optic Engineers Conference. 2009:1-3.
- [6] VALCARENGHI L, CHINCOLI M, MONTI P, *et al.* Improving energy efficiency in passive optical networks with service guarantees[R]. Pisa: Scuola Superiore Sant' Anna, 2012.
- [7] BIANCO C, CUCCHIETTI F, GRIFFA G. Energy consumption trends in the next generation access network: a telco perspective[C]//Proc of the 29th International Telecommunications Energy Conference. 2007:737-742.
- [8] IGAWA E, NOGAMI M, NAKAGAWA J. Symmetric 10G-EPON ONU burst-mode transceiver employing dynamic power save control circuit[C]//Proc of Optical Fiber Communication and National Fiber Optic Engineers Conference. 2011.
- [9] EFFENBERGER F J. Opportunities for power savings in optical access[EB/OL]. (2008-02). http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/09/05/T09050000010006PDF.pdf.
- [10] 刘建华, 徐之光, 林薇, 等. 宽带接入设备节能技术的研究[R]. 深圳: 华为技术有限公司, 2009.
- [11] KANI J I. Power saving techniques for optical access[C]//Proc of National Fiber Optic Engineers Conference. 2012.
- [12] WONG S W, VALCARENGHI L, YEN S, *et al.* Sleep mode for energy saving PONs: advantages and drawbacks[C]//Proc of the 2nd International Workshop on Green Communication. 2009:1-6.
- [13] KUBO R, KANI J I, FUJIMOTO Y, *et al.* Sleep and adaptive link rate control for power saving in 10G-EPON systems[C]//Proc of the 28th IEEE Conference on Global Telecommunications. Pisataway: IEEE Press, 2009:1573-1578.
- [14] KUBO R, KANI J I, UJIKAWA H, *et al.* Study and demonstration of sleep and adaptive link rate control mechanisms for energy efficient 10G-EPON[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2010, 2(9):716-729.
- [15] IEEE 802.3az, energy efficient ethernet task[S]. 2010.
- [16] ITU-T. G. Supp45-2009, means and impact of GPON power saving[S]. 2009.
- [17] ITU-T. G. 987.3, 10-gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): transmission convergence(TC) specifications[S]. 2010.
- [18] ITU-T. G. 988, ONU management and control interface (OMCI) specifications[S]. 2010.
- [19] IEEE. 802.3av, IEEE standard for information technology: telecommunications and information exchange between systems: local and metropolitan area networks-specific requirements[S]. 2009.
- [20] MANDIN J. EPON power saving via sleep mode[EB/OL]. (2008-09). http://www.ieee802.org/3/av/public/2008_09/3av_0809_mandin_2.pdf.
- [21] YAN Ying, WONG S W, VALCARENGHI L, *et al.* Energy management mechanism for Ethernet passive optical networks (EPONs)[C]//Proc of IEEE International Conference on Communication. 2010:23-27.
- [22] YAN Ying, DITTMANN L. Analysis of sleep-mode downlink scheduling operations in EPON systems[C]//Proc of the 8th International Conference on Information, Communications and Signal Processing. 2011:1-5.
- [23] 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.
- [24] WONG S W, YEN S H, AFSHAR P, *et al.* Demonstration of energy conserving TDM-PON with sleep mode ONU using fast clock recovery circuit[C]//Proc of Optical Fiber Communication and National Fiber Optic Engineers Conference. 2010:1-3.
- [25] ZHANG Jing-jing, ANSARI N. Toward energy-efficient 1G-EPON and 10G-EPON with sleep-aware MAC control and scheduling[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(2):S33-S38.
- [26] KUBO R, KANI J I, FUJIMOTO Y. Adaptive power saving mechanism for 10 gigabit class PON systems[J]. *IEICE Trans on Communications*, 2010, E93-B(2):280-288.
- [27] WANG F, LIU Z, SONG X. Power-saving mechanisms for mobile devices in wireless communications[J]. *IET Communications*, 2009, 3(2):257-267.
- [28] JEONG D G, JEAN W S. Performance of adaptive sleep period control for wireless communication systems[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2006, 5(11):3012-3016.
- [29] KIM M G, CHOI J Y, KANG M. Adaptive power saving mechanism considering the request period of each initiation of awakening in the IEEE 802.16e system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(2):106-108.
- [30] VALCARENGHI L, WONG S W, CAMPELO D R, *et al.* Energy efficiency in optical access networks[EB/OL]. (2011). <http://networking.disi.unitn.it/cavalese2011/paper/63.pdf>.
- [31] LIU Xin, FOULI K, KANG Rui, *et al.* Network-coding based energy management for next-generation passive optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(6):864-875.
- [32] MANLEY E D, DEOGUN J S, XU Li-song, *et al.* All-optical network coding[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2010, 2(4):175-191.

- [29] 耿瑞敏, 练秋生, 孙马秋. 基于形态学成分分析的指纹分离[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(16): 188-190
- [30] RUDIN L I, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation noise removal algorithm[J]. *Physica D*, 1992, 60(1-4): 259-268.
- [31] BOBIN J, MOUDDEN Y, STARCK J L, *et al.* Morphological diversity and source separation[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2006, 13(7): 409-412.
- [32] BOBIN J, MOUDDEN Y, STARCK J L. Enhanced sourced separation by morphological component analysis[C]//Proc of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. [S. l.]: IEEE Press, 2006: 833-836.
- [33] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising[C]//Proc of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society, 2005: 60-65.
- [34] 祁国平, 吴朝润. 基于非局部均值的图像降噪[J]. 山西电子技术, 2012(2): 45-47.
- [35] SALMON J, STROZECKI Y. Patch reprojections for non-local methods[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(2): 477-489.
- [36] ZHAI Guang-tao, WU Xiao-lin, YANG Xiao-kang, *et al.* MDL context modeling of images with application to denoising[C]//Proc of the 16th International Conference on Image Processing. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 3845-3848.
- [37] ELAD M, STARCK J L, QUERRE P, *et al.* Simultaneous cartoon and texture image inpainting using morphological component analysis (MCA) [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2005, 19(3): 340-358.
- [38] MAUREL P, AUJOL J F, PEYRÉ G. Locally parallel texture modeling[J]. *SIAM Journal on Imageing Sciences*, 2011, 4(1): 413-447.
- [39] PORTILLA J, STRELA V, WAINWRIGHT M J, *et al.* Image denoising using a scale mixture of Gaussians in the wavelet domain[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2003, 12(11): 1338-1351.
- [40] SIVARAMAKRISHNAN K, WEISSMAN T. A context quantization approach to universal denoising[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2009, 57(6): 2110-2129.
- [41] WEISSMAN T, ORDENTLICH E, SEROUSSI G, *et al.* Universal discrete denoising: known channel[J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2005, 51(1): 5-28.
- [42] BUADES A, COLL B, MOREL J M. Image denoising methods: a new nonlocal principle[J]. *SIAM Review*, 2010, 52(1): 113-147.
- [43] BOBIN J, STARCK J L, FADILI J M, *et al.* Sparsity and morphological diversity in blind source separation[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2007, 16(11): 2662-2674.
- [44] CHANG S G, YU Bin, VETTERLI M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2000, 9(9): 1532-1546.
- [45] CROUSE M S, NOWAK R D, BARANIUK R G. Wavelet-based signal processing using hidden Markov models[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1998, 46(4): 886-902.
- [46] LIU Juan, MOULIN P. Information-theoretic analysis of interscale and intrascale dependencies between image wavelet coefficients[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2001, 10(11): 1647-1658.
- [47] SIMONCELLI E P, ADELSON E H. Noise removal via Bayesian wavelet coring[C]//Proc of IEEE International Conference on Image Processing. 1996: 379-382.
- [48] 易翔, 王蔚然. 基于小波域统计混合模型的图像降噪方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(11): 1722-1725.
- [49] 王波波, 来忠信, 黄廉卿, 等. 基于多尺度隐马尔可夫模型的CR影像降噪方法研究[J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 188-192.
- [50] RABINER L R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition[J]. *Proceedings of IEEE*, 1989, 77(2): 257-286.
- (上接第666页)
- [33] ASTERJADHI A, FASOLO E, ROSSI M, *et al.* Toward network coding-based protocols for data broadcasting in wireless Ad hoc networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2010, 9(2): 662-673.
- [34] FOULI K, MAIER M, MÉDARD M. Network coding in next-generation passive optical networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(9): 38-46.
- [35] GONG Xiao-xue, HOU Wei-gang, ZHANG Lin-cong, *et al.* A novel energy-saving algorithm based on sleeping low-loaded ONU for hybrid wireless-optical broadband access network[C]//Proc of the 2nd International Conference on Networking and Information Technology. 2011: 335-342.
- [36] 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.
- [37] CHEN Shen. Energy efficiency and differentiated QoS in next generation PONs [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2012.
- [38] KRAMER G, MUKHERJEE B, PESAVENTO G. IPACT: a dynamic protocol for an Ethernet PON (EPON) [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(2): 74-80.
- [39] 于文畅. 无源光网络节能等关键技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- [40] WANG Zhen, YU Wen-chang, WANG Li-qian. Energy saving mechanism based on double-way polling DBA algorithm and ONU sleep mode for EPON[C]//Proc of International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. 2011: 2222-2225.
- [41] LEE S S W, CHEN A. Design and analysis of a novel energy efficient Ethernet passive optical network [C]//Proc of the 9th International Conference on Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010: 6-9.
- [42] KANONAKIS K, ZHANG Jing-jing, CVIJETIC J. 1G/10G-EPON compliant scheme combining ONU energy efficiency with QoS performance[C]//Proc of National Fiber Optic Engineers Conference. 2012: 1-3.
- [43] SANKARAN G C, SIVALINGAM K M. ONU buffer elimination for power savings in passive optical network [C]//Proc of IEEE International Conference on Communication. 2011: 1-5.
- [44] RODRÍGUEZ-PÉREZ M, HERRERÍA-ALONSO S, FERNÁNDEZ-VEIGA M, *et al.* Improving energy efficiency in upstream EPON channels by packet coalescing [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2012, 60(4): 929-932.
- [45] ZHANG Jing-jing, ANSARI N. Standards-compliant EPON sleep control for energy efficiency: design and analysis [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. 2012: 2994-2998.
- [46] DHAINI A R, HO P H, SHEN Gang-xiang, *et al.* Energy efficiency in Ethernet passive optical networks: for how long can ONU sleep? [EB/OL]. (2011-05). http://ece.uwaterloo.ca/~adhaini/Files/G_EPON_sleep.pdf.