

doi: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2019.01.018

本文引用格式:谢宏伟,鲍常军,刘科学,等. 光纤-无线传感器网关在智能电网中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2019,33(1):118-124.

Citation format: XIE Hongwei, BAO Changjun, LIU Kexue, et al. Research on Application of Optical Fiber Wireless Sensor Network Gateway in Smart Grid[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(1): 118-124.

光纤-无线传感器网关在智能电网中的应用

谢宏伟¹, 鲍常军¹, 刘科学¹, 赵娟²

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司, 呼和浩特 010010;
2. 天津科技大学 现代分析技术研究中心, 天津 300457)

摘 要:为了解决电网基础设施通信流量的服务质量供给问题,提出一种光纤-无线传感器网络(Fi-WSN)电网网关设计。首先,该设计基于数据包的优先等级对到达基站的数据包进行分类,并将其排队放入优先级队列。然后,Fi-WSN网关负责协调WSN数据包处理,并将其聚集在一起;最后,为了聚合突发数据,利用突发组装机将突发数据封装到服务等级队列中。仿真结果证明:在WSN报告消息频率较为频繁的情况下,与EPON-WiMAX相比,所提设计的高优先级数据包的端到端延迟和最大延迟更加接近基准EPON,而且低优先级数据包的端到端延迟和最大延迟明显低于EPON-WiMAX。所提设计提高了紧急消息的服务质量,性能更优。

关 键 词:以太无源光网络;智能电网;无线传感器网络;突发组装机;聚合

中图分类号:TN929

文献标识码:A

文章编号:1674-8425(2019)01-0118-07

Research on Application of Optical Fiber Wireless Sensor Network Gateway in Smart Grid

XIE Hongwei¹, BAO Changjun¹, LIU Kexue¹, ZHAO Juan²

(1. State Grid Inner Mongolia Eastern Power Co., Ltd., Hohhot, 010010, China;
(2. Research Center for Modern Analytical Technology,
Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: To solve the problem of the quality of service supply for the communication flow of the power grid infrastructure, a fiber optic wireless sensor network (Fi-WSN) gateway design is proposed. First, the design classifies packets arriving at the base station based on the priority of the packet and queues them into the priority queue. Then, the Fi-WSN gateway is responsible for coordinating WSN packet processing and aggregating them together. Finally, the burst assembly mechanism encapsulates the burst data into the service level queue for the aggregation of burst data. The simulation results show that, in the case of frequent WSN report messages, the end-to-end delay

收稿日期:2018-08-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31400092)

作者简介:谢宏伟,男,硕士,教授级高级工程师,主要从事智能电网应用、网关设计、电力营销等研究,E-mail:cguohegu@163.com。

and the maximum delay of the high-priority data packets in the proposed design are much closer to the benchmark EPON in comparison with EPON-WiMAX. Meanwhile, the end-to-end delay and the maximum delay of the low priority packet are significantly lower than that of EPON-WiMAX. The design improves the quality of the emergency message, and the performance is better.

Key words: ethernet passive optical networks; smart grid; wireless sensor networks; burst assembly mechanism; aggregation

近几年,无源光网络^[1] (passive optical networks, PON) 已经发展成为一项成熟的高速宽带接入技术。集成式光纤-无线(fiber wireless, FiWi) 宽带接入网络是 PON 支持网络构建中的一个特例,其结合了光网络的高速率和可靠性,以及无线技术的灵活性和覆盖范围广的优点^[2]。PON 支持的网络构建在智能电网通信中发挥着关键作用,特别是光纤-无线传感器网络(fiber-wireless sensor network, Fi-WSN) 为智能电网的监测提供了独有的解决方案^[3-4]。然而,将 Fi-WSN 广泛部署到智能电网之前,尚有一些难题必须解决。其中一个基本的挑战是:Fi-WSN 的异构网络架构和电网监测任务中涉及到的流量负载服务质量(quality of service, QoS)。

众所周知,无源光网络技术已经成为宽带接入的一个重要组成部分。如文献[5]研究了光载射频通信协议,通过射频信号在中央机房对光载波进行调制,在模拟光纤链路中将其传播到远端天线单元,然后由客户进行无线接收。文献[6]详细分析了 EPON 系统中的局端 OLT 设备以及用户端 ONU 设备的需求,重点介绍了 OLT 设备的软硬件实现和各个模块的具体设计,以及 EPON 在用电采集系统中的应用。文献[7]在 R&F 协议下,将 EPON 与全球微波互联接入(WiMAX) 技术集成在一起,实现了包括集成式 ONU-基站网关处良好的容量匹配。文献[8]以配电网典型 PON 网络结构为基础,从可靠性、分光级联、功率预算和部署方式等方面提出了 PON 网络规划约束条件,采用最小生成树算法生成 PON 网络的最优连接^[8]。

在以上各种 PON 解决方案中,EPON 和 GPON 解决方案在当前的电信基础设施和要求下被广泛采用。本文选择 EPON 作为光后端技术,因为 EPON 接入速度迅速,时间成本较优,能够完美融

合到 IP 网络^[9]。在智能电网环境的 Fi-WSN 架构下,本文提出了一个支持 QoS 的网关设计,旨在实现数据分级化,保证光纤到户/楼/街(fiber-to-the-home/building/curb, FTTH)^[10] 用户的服务质量,并可靠地传递 WSN 数据。Fi-WSN 网络采用突发组装机,以区分紧急数据包和非紧急数据包。实验结果表明:所提网关设计能够为高优先级数据包实现低延迟,同时保持 FTTH 流量的 QoS 和 WSN 的可靠性。

1 系统模型和要求

Fi-WSN 通过一个无线和光纤混合接入网络,将智能电网数据传送到中央机房(CO)。该混合接入网络的前端包括一个对智能电网进行监测的 WSN,而后端则采用了 FTTH 技术。本文 EPON 部署在 R&F 接入网络的后端。该系统的基础设施如图 1 所示,其中 ONU 通过分布式光纤连接到分光器,而分布式光纤则被耦合到与 OLT 相连接的馈线光纤上^[11-12]。在相应的架构中,一个 ONU 可以向一个 FTTH 用户,或者一组 Fi-Wi 用户提供服务。

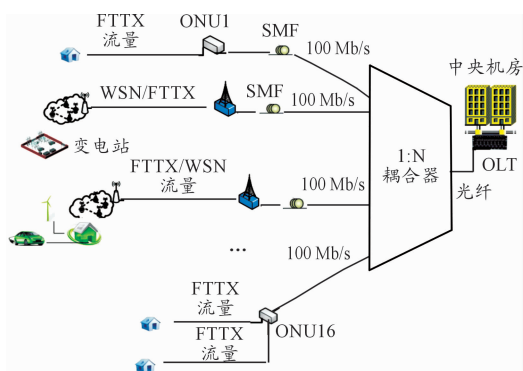


图 1 智能电网的 Fi-WSN 架构

此外,Fi-Wi 用户可以是一个无线接入节点。在智能电网监测中,WSN 的作用是确保可靠性,以

及在客户处实现高效的电力传输、配送和利用。在智能电网中,延迟要求的范围从数百毫秒至几分钟不等。其中,Fi-WSN 网关要求如下:

1) 消息优先级排序:这是 Fi-WSN 设计的主要难题,源自于前端网络的异构性。

2) 协作上行传输:将有线数据和无线数据传输到 CO 的多个用户之间,共享单个馈线光纤带宽。必须要保证 FTTX 流量不会被 WSN 流量中断。

3) 可靠的消息传递:在环境数据的传输之外,智能电网监测中的意外现象会触发报警数据。这些数据称为紧急数据,其需要以低延迟和低丢包率传递到 CO,而发生在 ONU 处的缓冲区溢出现象可能会导致数据丢包。

2 Fi-WSN 网关设计

考虑到上文所述要求,针对图 1 架构,本文设计一个 Fi-WSN 网关。图 2 以模块化的方式给出了所提 Fi-WSN 网关架构,基于数据包的优先等级对到达基站的数据包进行分类,并将其排队放入 Fi-WSN 网关的相应优先级队列。Fi-WSN 网关负责协调处理 WSN 数据包,并将其聚集在一起,以待传输到相应的 ONU 缓冲区。突发组装机制将突发数据封装到服务等级队列中,该队列在被传输到 ONU 缓冲区之前要经过最终的突发数据聚合。

如图 2 所示,通过基站(base station, BS)到达网关的数据包首先要经过一个分类阶段。该过程中,数据包将被插入不同优先级的队列中。其后,突发组装机制将形成发送到 ONU 的突发数据。Fi-WSN 网关的突发组装程序流程图如图 3 所示。仿真中所使用的符号如表 1 所示。

如图 3 所示,Fi-WSN 网关始终通过 WSN 汇聚节点接收到达的数据包。如果进入的数据包中携带高优先级(紧急)标记,则网关尝试将该数据包立即转发给后端 ONU;因此,该机制会检查高优先级缓冲区的占用情况。高优先级缓冲区被至少一个数据包占用的情况,可能是以下条件中的

一个:

- 1) 高优先级缓冲区已经开始进行队列解除;
- 2) 低优先级突发数据聚合正在进行中。

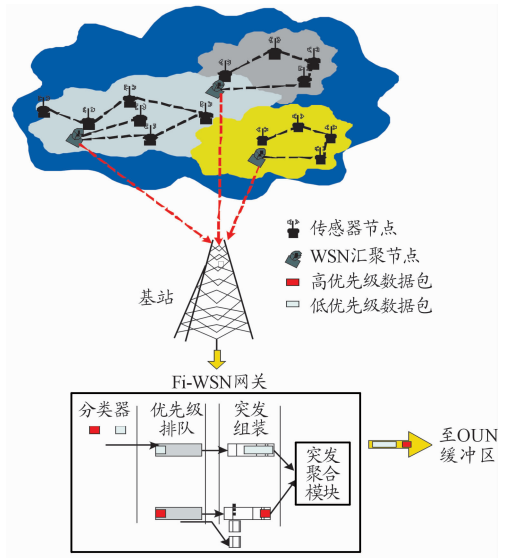


图 2 本文模块化的 Fi-WSN 网关架构

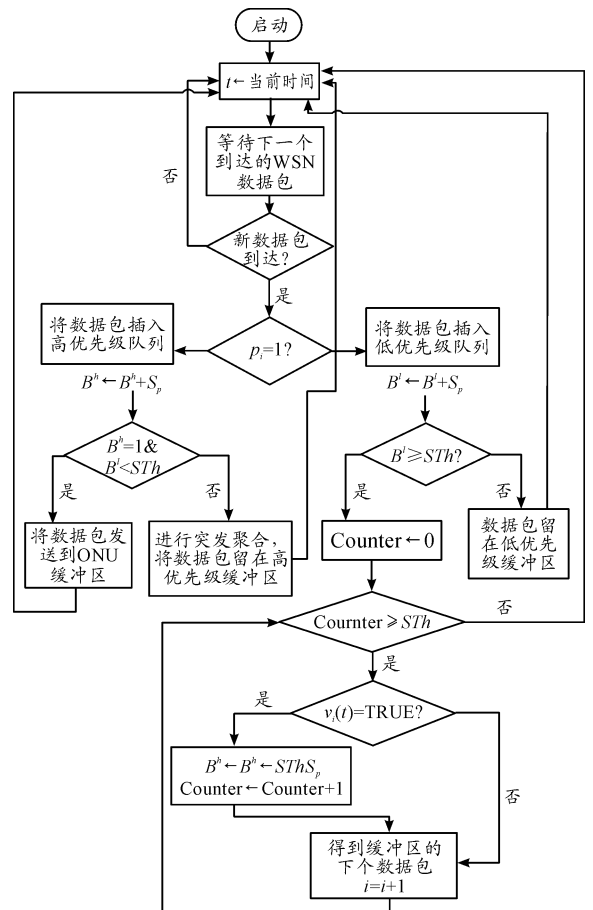


图 3 Fi-WSN 网关的突发组装程序流程

表1 仿真中使用的符号及其解释

符号	解释
t_d^l	低优先级数据包在其源节点的发送时间
t_d^h	高优先级数据包在其源节点的发送时间
STh	低优先级队列的规模阈值
MP	相应资产的检测周期
B^l	低优先级队列占用
B^h	高优先级队列占用
ρ_i	数据包 i 的优先等级
$v_i(t)$	数据包 i 在时间 t 的有效性
S_p	数据包大小

无论上述哪种情况,到达的数据包都必须存储于高优先级队列中,如果高优先级队列解除正在进行,则该数据包将会被立即移出队列。否则,数据包将在低优先级突发数据聚合过程中被移出队列。由于低优先级数据包中并没有携带延迟敏感性数据,为了不对当前的 FTTX 流量造成中断,低优先级数据包将被放在缓冲区,直到响应的队列长度超过 STh 。

突发组装^[13]是一个持续不断的过程,在任何时间 t ,突发聚合器的决定都预示着新突发的形成,或者等待新数据包的到来。该过程表示如下:

$$S_b(t) = \begin{cases} Sth - [\sum_i (1 - v_i(t))] \cdot S_p, & B^l \geq STh \\ B^h \cdot S_p, & B^h \geq 1 \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (1)$$

从该流程图可以观察到:首先对低优先级数据包的有效性进行检查,然后再将其组装到突发中。由于低优先级数据包中携带了环境数据,因此与高优先级数据包相比,低优先级数据包的缓冲时间较长。这一策略可能会造成向 CO 发送过期数据的风险。因此,突发组装缓冲区必须立即丢弃过期消息,且突发聚合程序继续处理缓冲区中的下一个数据包。由于高优先级数据包报告意外现象或紧急消息,在 CO 处的 OLT 接收到该数据包之前,其始终被视为有效。由此,在 WSN 中路由延迟较高的情况下,一个高优先级数据包中可能会携带过期消息,但可以通过一个上层协议

来处理响应消息的有效性。突发组装程序的有效性函数表示如下:

$$v_i(t) = \begin{cases} 1 & t - t_d^l \leq MP \wedge \rho_i = \text{'LOW'} \\ 0 & t - t_d^l > MP \wedge \rho_i = \text{'LOW'} \\ 1 & \rho_i = \text{'HIGH'} \end{cases} \quad (2)$$

由于相应数据包的生成大于预定义的检测周期 MP ,因此若时间已经过去,则该低优先级数据包将被标记为无效。否则,相应的低优先级数据包将被标记为有效。

前端网络的异构性不仅由被监控资产的多样性表示,而且由 WSN 使用的协议栈表示。一般,根据应用来选择不同的协议栈(例如 Zigbee 协议栈^[14]、WiFi^[15]等)。举例来说,Zigbee 的功耗较低,因此适用于功率受限型应用,而 WiFi 则适于实施比特率要求较高的应用。本文所述设计能够为异构 Fi-WSN 网络提供一种通用网关实现。

3 实验结果与分析

本文将 WSN 仿真融入 EPON 模拟器中,在不同场景下对提出的 Fi-WSN 网关进行了性能评价。为了体现所提方法的优越性,在仿真实验中,将未集成 WSN 的基准 EPON^[16-17],以及 EPON 结合 WiMAX 技术^[7]作为对照组。另外,本文还对 Fi-WSN 网关所区分的低优先级消息和高优先级消息所提供的服务质量进行性能比较。

3.1 仿真设置与说明

仿真设置如表 2 所示。Fi-WSN 的后端为一个 EPON,其分割比例为 1:16,其中每个 ONU 均与一个 WSN 相关联。假定每个 WSN 的覆盖面积为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$,其中随机部署了 50 个传感器节点。由于传感器节点通常会报告环境测量数据,因此每个传感器节点生成恒定比特率(constant bit rate, CBR)流量,且本文在各种比特率下对所提方法进行测试。

事实上,高优先级数据包的生成成为事件驱动型。与环境测量数据的生成相比,某个时间所导致的报警消息预计将以较低的频率出现。因此,一个 WSN 节点生成的数据包被标记为高优先级

消息的概率相对较低,而高优先级数据包和低优先级数据包之间的比例($H:L$)根据场景不同而变化。

表2 仿真设置

WSN 覆盖面积	50 m × 50 m
传感器数量	50(单个汇聚节点)
传感器缓冲区容量	20 个数据包
WSN 流量	CBR, $1/\lambda \in \{500, 750, 1\ 000\}$ ms
WSN 数据包大小	128 B
$H:L$	1:9
S_{Th}	560、640、720 个数据包
WSN 路由方案	地理信息路由
R_d, R_u	100 Mbps, 1 Gbps
ONU-OLT 距离	10 ~ 20 km
FTTX 用户流量	自相似 $H=0.8$
后端中的 DBA	IPACT 有限服务
仿真过程持续	10^6 个 FTTX 数据包
ONU 缓冲区容量	1 MB
ONU/WSN 的数量	16
为 WSN 流量保留的 ONU 缓冲区容量	0.1 MB
后端最大传输单位	15 500 B

提出的网关架构对于 WSN 中的路由方案是透明的。将 ONU 的缓冲区容量的 10% 预留给 WSN 流量,但 FTTX 数据包可以利用缓冲区中任何未使用的空间。通过仿真实验对 FiWSN 网关设计的性能进行评价时,平均端到端(E2E)延迟、最大延迟、数据包延迟变化和数据包丢失概率是关键的性能度量。值得一提,最大延迟指的是在整个仿真过程中一个给定类型的数据包所经历的最高延迟的数值。对于 FTTX 数据包,其 E2E 延迟为在 ONU 处的排队延迟,以及 OLT 产生的轮询延迟和准入延迟之和;而 WSN 数据包所经历的 E2E 延迟则是 WSN 中的路由延迟、汇聚节点处的缓冲延迟、ONU 处的排队延迟以及 OLT 产生的轮询延迟和准入延迟的总和。图 4 ~ 6 中每个点代表十轮仿真实验得出的均值,其中置信区间为 95%。

3.2 $H:L=1:9$ 的场景

在该场景中,本文假定只有 10% 的 WSN 数据包携带高优先级消息。图 4 给出了在不同的 FTTX 负载等级和 WSN 中到达间隔时间下,每个数据包的 E2E 延迟,其中 HP 表示高优先级数据包,LP 表示低优先级数据包。为证明所提 Fi-WSN 网关设计能够实现可靠的数据传递和协作式上行链路调度,将其与未集成 WSN 的传统 EPON(基准),以及 EPON 结合 WiMAX 技术^[7]进行比较。

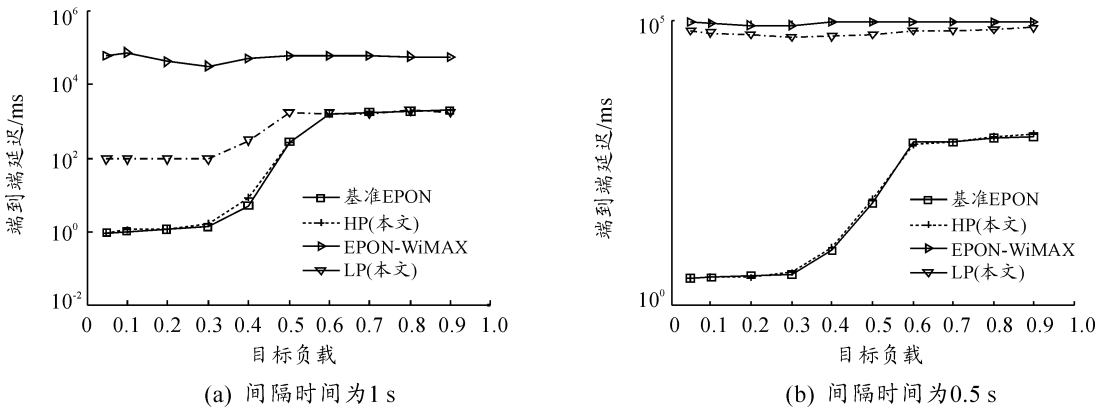


图4 平均 E2E 延迟与目标负载关系

图 4(a) 给出了当 WSN 中数据包到达间隔时间为 1 s 时得到的仿真结果,由图可知,WSN 的集成并没有增加数据包的 E2E 延迟。此外,由于 Fi-

WSN 网关中的分级化机制,与低优先级数据包相比,高优先级数据包的传递延迟要低得多,优于 EPON-WiMAX。这主要得益于所提 Fi-WSN 网关

设计通过面向服务级别的突发机制,将非紧急数据与紧急数据的传递区分开,而 EPON-WiMAX 主要使用动态带宽分配方案解决端到端延迟问题,将紧急和非紧急数据共同对待,缺乏对突发事件的处理机制。

图 4(b)中,WSN 数据包的到达间隔时间被降低到 0.5 s,由于 WSN 信息到达的更加频繁,使得每个高优先级数据包与 FTTH 数据包的 E2E 延迟较为接近。因为高优先级数据包不需要经过缓冲阈值的突发组装程序,所以更频繁的 WSN 信息对高优先级数据包造成的延迟较少。另外,本文设计的高优先级数据包的生成为事件驱动型。某个时间所导致的报警消息将以较低的频率出现。

基于图 4 可以得出两个结论:

1) Fi-WSN 网关处的突发组装程序将使高优先级数据包的延迟低于低优先级数据包;

2) 较长的 WSN 数据包到达时间间隔,将使得低优先级和高优先级数据包的延迟均显著降低。

图 5 给出了当 WSN 数据包到达间隔时间为 0.5 s 时,在 2 个不同的 Sth (缓冲区规模分别为 640 个数据包和 720 个数据包)数值下,每个数据包的最大延迟。从图 5(a)中可以观察到:从中等负载等级至高负载等级,高优先级数据包与 FTTH 数据包的变化趋势相同,而在图 5(b)中,用于突发机制的 Sth 数值增加到 720 个数据包,增加了高优先级数据包所经历的最大延迟。该结果符合预期,因为更高的 Sth 数值将导致低优先级数据

包的突发更大,而这又将使得高优先级数据包在汇聚节点处和 ONU 处的缓冲时间增加。因此,在 Fi-WSN 网关设计中应该选择较小的 Sth 数值,以向高优先级 WSN 数据包提供更好的服务质量。

3.3 较大高优先级突发的场景

该场景中,本文增强了在 Fi-WSN 网关处高优先级数据包的突发组装机。高优先级消息的 Sth 数值设置为 70 个数据包,低优先级消息的 Sth 数值设置为 640 个数据包。

图 6 给出了当低优先级消息 Sth 为 640 个数据包时,WSN 数据包到达间隔时间分别为 0.5 s 和 1 s 时的 E2E 延迟。如图 6 所示,在高优先级数据包中引入突发组装过程会增加这些数据包的 E2E 延迟,因为高优先级数据包必须在 Fi-WSN 网关处的高优先级队列中等待。此外,当 WSN 数据包到达间隔时间增加到 1 s 时,高优先级数据包的 E2E 延迟显著增加,该延迟甚至超过了当 WSN 消息之间无差异时的 WSN 数据包的 E2E 延迟。这是因为高优先级数据包在缓冲区中的时间更长,WSN 消息到达的频率较低。

由此可知,仅在 WSN 数据包的到达频率较高的情况下,在 Fi-WSN 网关处对高优先级数据包实施突发组装机才会带来延迟方面的收益是有限的。这里说明一下该场景的数据包丢失概率,由于数据包丢失概率随不同的流量密度而变化,高优先级数据包突发不会增加汇聚节点处的 WSN 流量密度,因此光后端处的数据包丢失概率不受影响。

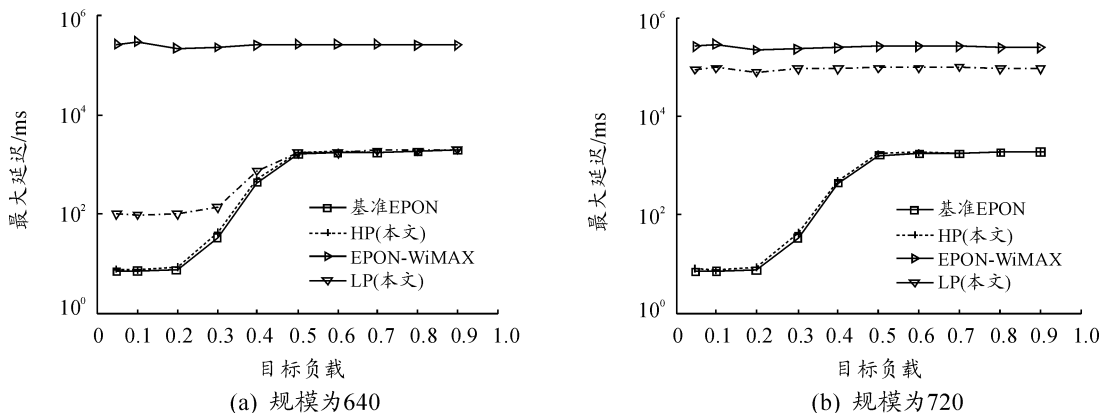


图 5 最大延迟与目标负载的比较

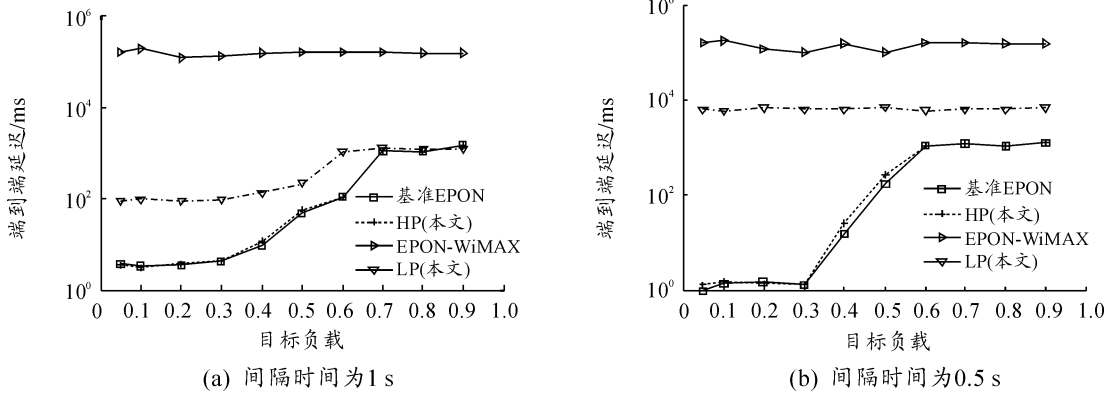


图6 较高优先级突发下,平均E2E延迟与目标负载的关系

4 结束语

光纤-无线传感器网络(Fi-WSN)架构保留了无源光网络的高速率和低延迟的优点,同时具有WSN的高级监测能力、较大灵活性、较低成本和覆盖面积广的特性。本文着重解决Fi-WSN的WSN流量和FTTX流量的服务质量供给问题。所提QoS感知的Fi-WSN网关设计通过面向服务级别的突发机制,将非紧急数据与紧急数据的传递区分开。该方法能够将高优先级智能电网数据的延迟限制在特定范围内,同时向FTTX用户提供较好的QoS水平。在WSN报告消息的频率较为频繁的情况下,能够增强紧急消息的服务质量。

未来,本文将尝试提升关键智能电网应用的WSN性能,并进一步研究阈值的最优选择问题。

参考文献:

- [1] 姚琳元,宋飞,张宏科.无源光网络标准发展及关键技术研究[J].电子学报,2015,43(3):557-567.
- [2] AURZADA F, MAIER M, REISSLEIN M. FiWi access networks based on next-generation PON and gigabit-class WLAN technologies: a capacity and delay analysis[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(4): 1176-1189.
- [3] MAIER M, LEVESQUE M, IVANESCU L. NG-PONs 1&2 and beyond: the dawn of the uber-FiWi network[J]. Fiber Optic Sensors & Systems, 2012, 26(2): 15-21.
- [4] 王阳光,尹项根,游大海.无线传感器网络应用于智能电网的探讨[J].电网技术,2010,34(5):7-11.
- [5] LIU Y J, GUO L, ZHANG L C, et al. A new integrated energy-saving scheme in green Fiber-Wireless (FiWi) access network[J]. Science China Information Sciences, 2014, 57(6): 1-15.
- [6] 李青泽.无源光网络技术在配电自动化中的应用研究[D].北京:华北电力大学,2015.
- [7] SARIGIANNIDIS P, LOUTA M, PAPADIMITRIOU, et al. Alleviating the high propagation delays in FiWi networks: a prediction-based DBA scheme for 10G-EPON-WiMAX systems[C]//International Workshop on Fiber Optics in Access Network. IEEE, 2015: 45-50.
- [8] 刘国军,周静,卢利峰.基于配电网的可靠PON网络规划方法[J].光通信技术,2015,39(10):5-7.
- [9] 孙毅,骆书剑,吴润泽,等.基于EPON的配电通信网的动态带宽分配方案[J].电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 125-130.
- [10] 蒋铭,沈成彬,王成巍,等.基于EPON的FTTx接入网建设关键问题探讨[J].电信科学,2008,24(9):26-29.
- [11] 蒋东.宽带高增益直角反射器天线[J].压电与声光, 2018, 40(3): 404-406.
- [12] 张开宇,闫光,鹿利单,等.预拉伸光纤光栅应变传感器传感性能研究[J].压电与声光,2017,39(5):654-658.
- [13] YAYAH A A, COULIBALY Y, ISMAIL A S, et al. Hybrid offset-time and burst assembly algorithm (H-OTBA) for delay sensitive applications over optical burst switching networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2016, 29(2): 251-261.
- [14] 邓顺华.基于Zigbee技术的智能家居中电器控制的研究[D].重庆:重庆理工大学,2016.
- [15] 仲伟波,李忠梅,石婕,等.一种用于设施农业的ZigBee-WiFi网关研制[J].计算机科学,2014,41(s1): 484-486.
- [16] 王汝言,刘祖奇,吴大鹏,等.消除闲置时间的EPON动态带宽分配算法[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2013,25(6):757-761.
- [17] 裔锐. EPON在电信接入网中的应用[D].南京:南京理工大学,2012.

(责任编辑 陈艳)