

DOI: 10.7667/PSPC180073

基于回声状态网络的电力 EPON 业务感知技术

李 钟

(北京大学动力中心, 北京 100871)

摘要: 配用电是智能电网建设的重要环节, 智能配用电新业务的多样化对其通信网络的支撑能力提出了更高的要求。为了进一步提高配用电以太无源光网络(EPON)系统对业务的支持匹配能力, 提出了一种基于回声状态网络的电力 EPON 业务感知算法, 采用回声状态网络模型对电力通信业务进行识别感知, 以实现 EPON 对电力通信业务的高效匹配。在此基础上通过 OLT 与 ONU 的交互, 优化电力 EPON 系统的资源调度与分配能力。以配用电通信 EPON 作为典型业务, 对基于回声状态网络的业务感知算法进行验证。仿真验证表明, 该机制能有效改善丢包率和时延等性能, 提高了 EPON 系统对配用电通信本地接入业务的主动支持能力。

关键词: 以太无源光网络; 业务感知; 回声状态网络; 配用电; 智能电网

Echo-State-Network based service-awareness technology of EPON for smart power grid

LI Zhong

(Power Center of Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Aimed to improve the ability of EPON (Ethernet Passive Optical Network) to support multiple services brought by smart power grid, an Echo-State-Network based traffic-awareness algorithm in EPON system is proposed for smart power grid. The proposed mechanism is able to be aware of characteristics of multi-services and to match their requirements with better quality, through the echo-state-network algorithm. Thus, resources allocation optimization of EPON system is enabled by the proposed algorithm through cooperation between OLT and ONUs. Simulation evaluation of this proposed scheme is conducted and takes smart power grid services as typical application. Simulation results show that this proposed approach can greatly improve the supporting ability for multiple services of smart power grid, in terms of packet loss rate and time delay performances.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707197).

Key words: EPON; traffic awareness; Echo-State-Network; power distribution and utilization; smart power grid

0 引言

随着能源互联网与智能电网建设的稳步推进, 智能配用电通信的本地接入业务流量日益庞大, 以太无源光网络(Ethernet Passive Optical Network, EPON)以其高带宽、大容量的优势, 成为电力通信接入网的主流技术之一^[1]。以 EPON 为代表的光接入网技术既要保障电力通信业务带宽和实时可靠性, 还要具备对智能电网新业务多样化的支持匹配能力^[2-3]。因此, 电力 EPON 的智能感知能力尤为重要。

业务感知通常定义为识别感知通信网络中业务流所属的业务类型、业务的 QoS 要求、业务优先级

以及其带宽和实时性。目前通信网络的业务感知技术大多采用检测数据帧所包含的协议标示字、端口号以及 IP 地址等方法。但是随着智能电网新业务的多样化和复杂性与日俱增, 传统方法越来越难以适应业务的发展。因此, 利用业务流的传输特征进行业务感知成为新的研究方向^[3-9]。文献[4-5]的研究表明网络业务流的统计特性和业务应用协议之间存在着一定的对应关系, 但这些机制对于业务类型感知的准确性存在不足。文献[5]提出了业务流的特征集提取方法以实现业务流的感知识别。文献[6]进一步对业务流中 IP 包长度、数据包到达间隔和次序等特征进行提取, 再通过神经网络算法实现业务流感知识别, 但上述方法的复杂度较高且运算量较大。

为了实现对多样化业务的高效支持, 准确率较高且复杂度适中的业务感知技术尤为重要。回声状态网络(Echo State Network, ESN)是一种新型的递归神经网络, 近年来引起诸多学者的关注, 对回声状态网络的研究也逐步深入^[10-14]。因此, 本文提出一种基于回声状态网络的电力 EPON 业务流感知机制, 在发挥电力 EPON 技术的容量带宽优势的同时, 提高其对多样化业务的区分支持能力。

1 面向配用电业务的 EPON 系统

配用电作为智能电网的重要环节, 其通信网络运行环境复杂, 接入的终端数量庞大并且业务类型繁多。配用电通信既要满足各类业务带宽需求, 还应该保证安全性、可靠性和经济性等要求^[15-19]。

可靠性方面, 智能配用电网应考虑通道备用且具有自愈功能, 通信设备的可靠性应为工业级, 电源、机房环境等基础设施也应有一定的可靠性保障。安全性方面, 根据《电力二次系统安全防护规定》及《电力二次系统安全防护总体方案》的要求, 电力二次系统安全防护工作应坚持安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证的原则。经济性方面, 配电网设备总量庞大, 智能配用电通信网应根据业务发展情况, 区分保障和覆盖两种类型的通信节点, 合理选择经济的通信方式。

配用电通信网络通常分为骨干层和接入层(如图 1 所示)。其中, 配电主站和配电子站之间的通信网络视为骨干层, 配电主站、子站以及配电终端的通信网络作为接入层。骨干层可依托光通信技术充分利用主网现有资源。目前, EPON 主要应用于用电信息采集和配网自动化等电力业务的承载。

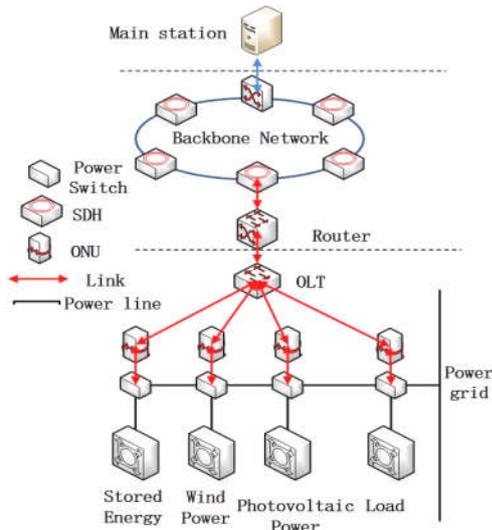


图 1 配用电通信系统架构

Fig. 1 Communication system architecture of smart power grid

在用电环节, EPON 技术与主流的无线通信、电力线载波通信等技术相比, 在可靠性、实时性和抄表成功率等方面都有着明显的优势。随着智能用电业务向精细化方向的发展, EPON 技术将成为该领域最重要的通信方式。目前, 国家电网公司的用电信息采集标准修订中已将 EPON 远程信道的通信方式列入新增的标准规范中。

在配电环节, 配电自动化系统中 EPON 是最重要的通信方式之一。EPON 技术与 10 kV 配电线路的网络拓扑吻合度极高, 支持树型、星型各种拓扑结构, 支持电力手拉手保护方案。在配网中应用, EPON 技术的稳定性和实时性明显优于无线通信, 同时也避免了工业以太网多点故障问题。国家电网公司发布的《配网通信总体设计》明确将 EPON 作为配网自动化首选的通信技术。

2 回声状态网络分类算法

回声状态网络的结构如图 2 所示, 由输入层、核心层和输出层组成^[10-14]。假设回声状态网络由 K 个输入单元、 N 个储备池处理单元和 L 个输出单元构成。

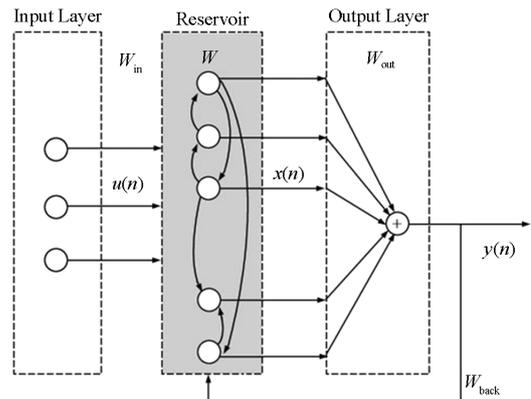


图 2 回声状态网络结构图

Fig. 2 Structure of the ESN

回声状态网络的基本方程为式(1)和式(2)。

$$x(n+1) = f(W^{in}u(n+1) + Wx(n) + W^{back}y(n)) \quad (1)$$

$$y(n+1) = f^{out}(W^{out}u(n+1) + Wx(n+1) + W^{back}y(n)) \quad (2)$$

式中: $u(n)$ 为 ESN 的输入变量; $x(n)$ 为状态变量; $y(n)$ 为输出变量; 另外, f 和 f^{out} 可分别视为 ESN 模型中处理单元和输出单元的激励函数。输入变量通过 W^{in} 与 ESN 的处理单元连接, W 为 ESN 内部处理单元之间的权值, W^{back} 表示输出层与核心层的连接权值, W^{out} 为核心层与输出层的连接权值。

此外, W^{in} 、 W 和 W^{back} 为常数, 通过充分的训练可获得 W^{out} 。

在 ESN 的训练中, 样本数据通过随机生成的权重矩阵 W^{in} 和 W^{back} 激励核心层的处理单元, 可以采用线性回归对每一轮训练后的 ESN 内部参数进行修正, 可以将均方误差降低到最小。

回声状态网络分类方法的基本原理如式(3)所示, 其中 n 仅表示不同的样本, 而非时间。在分类训练的过程中, 必须始终保持输入样本不变, 直至储备池状态变量的值趋于稳定, 使得前后两次迭代结果之间的差异最小^[20]。

$$\begin{cases} x(n+1)^{(i)} = W^{\text{in}}u(n+1) + Wx(n+1)^{(i-1)} \\ x(n+1)^{(0)} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

该算法的优点在于只通过储备池处理单元激活函数对状态变量处理之前使其趋于稳定, 并且仍然保持回声状态网络训练过程简捷的特点, 在降低整体复杂度的同时保证运算结果具有全局最优的性能表现。

3 基于回声状态网络的业务感知

3.1 基于 ESN 的业务感知原理

基于层次 ESN 算法的业务感知, 其本质上为业务特征到业务类型的映射, 是根据业务特征参数判定业务类型过程。

针对 EPON 系统的主从式架构, 本文提出一种主从式结构的 ESN 模型, 核心层由 ESN 核心模块和训练样模块构成。核心模块从训练模块输入大量的样本集进行统一的 ESN 训练, 直到形成完备的 ESN 分类器; 所采用的 ESN 训练方法与现有的 ESN 训练方法相同。形成 ESN 分类器之后, 核心模块将 ESN 分类器的参数信息分发给代理层的所有 ESN 代理模块, 以保证各代理模块在进行业务流分类感知时的一致性。代理层由众多 ESN 代理模块构成。各代理模块都从核心层获得相同的 ESN 分类器, 并使用相同的分类器进行业务流分类感知。

基于回声状态网络(ESN)的业务感知过程分为三部分: 业务特征元数据提取、核心 ESN 训练和代理 ESN 判决。在 EPON 系统中, 每个 ONU 对收到的双向业务流提取其业务特征的元数据, 主要包括帧长度、业务流持续时间和业务包流时间间隔等主要元数据并进行一致性处理, 形成业务流的特征集 $u = \{u_1, u_2, \dots, u_k, \dots\}$ 。核心 ESN 将业务流的特征集 u 输入训练后的回声状态网络模型, 通过计算 W^{out} 获得该业务所属的分类类型。本文将业务分为对丢包率敏感业务和对时延敏感业务进行业务感知, 每

种业务又按优先级分为高/低两个等级。

3.2 电力 EPON 业务感知工作流程

根据 PON 系统中 OLT 与 ONU 之间的主从式架构, 在业务感知机制的实现方式上设计了一种与主从式架构相适应的业务感知实现方案。电力 EPON 的业务感知机制的实现流程如图 3 所示。

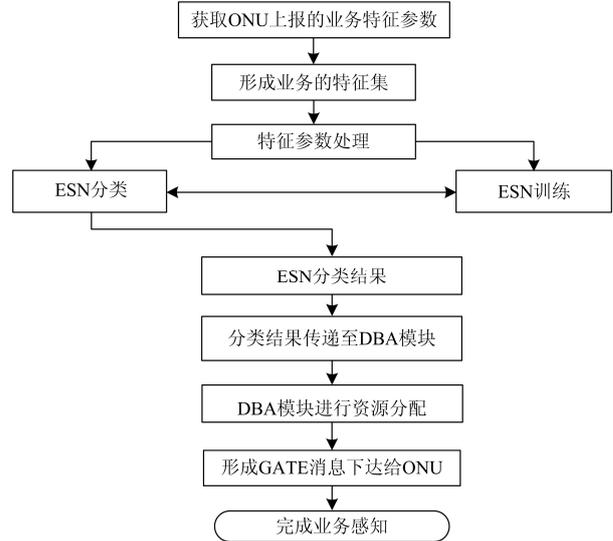


图 3 EPON 业务感知处理流程

Fig. 3 Procedure of service-awareness in EPON

主从式业务感知机制主要由位于 OLT 的 Master-ESN 模块和各 ONU 的 Sub-ESN 模块构成。Master-ESN 模块负责对 ESN 进行初始化配置以及复杂的 ESN 训练, 并将训练完备的 ESN 分类器各参数信息下发给所有 ONU。而每个 ONU 获得 OLT 下发的 ESN 分类器参数进行配置, 并各自独立负责本地业务感知功能。ONU 对业务流特征参数的提取, 根据业务流的 QoS 需求为其分配相应的带宽和队列优先级。

核心层中, ESN 核心模块可采用现有的 ESN 训练方法以生成完备的 ESN 分类器。通过将 ESN 训练统一到 OLT, 保证 EPON 系统中所有 ONU 都具有相同的 ESN 分类器, 保持业务感知结果的全局一致性。此外, ONU 节点统计业务流分类感知的记录, 并周期性地将此记录反馈给核心层 ESN, 不断补充新的训练样本集。而 OLT 中的 ESN 核心模块会周期性地根据样本集重新对核心 ESN 进行训练, 更新 ESN 分类器。

代理层由运行在 ONU 设备中的“ESN 代理模块”实现, 其业务流感知可以分为三个过程: 业务流特征提取、ESN 分类运算和优先级队列调度。根据 OLT 广播的 ESN 分类器信息参数, 代理模块内部通过配置 FPGA 以硬件方式实现并固化 ESN 分类

器。在 ESN 分类器保持一致的条件下，各个 ONU 内的“ESN 代理模块”分别独立工作进行业务流感知。“ESN 代理模块”提取每一个业务流的特征参数进行归一化处理以避免过拟合现象，从而获得描述该业务流的特征集，输入 ESN 分类器进行运算得到分类识别结果，即业务优先级。然后 ONU 中的调度模块根据分类识别结果进行业务优化调度。

复杂度是基于 ESN 的业务感知技术的重要性指标之一。只有高准确率且复杂度适中的核心算法模型，才能使得业务感知技术具备可实现性。采用 ESN 模型为核心，获得业务流识别感知的结果，只需进行一次加法和一次减法及两次乘法运算；故其运算复杂度可视为 $O(1)$ 。此外，复杂度通常与输入参数集的数量成正比关系。输入参数集的成员有 m 类，则 ESN 的运算复杂度为 $O(m) \times O(1)$ ，因此本文所提出的算法模型具有较低的复杂度，并在一定程度上保证 EPON 系统业务感知的准确性。

4 仿真验证

为了验证所提出的电力 EPON 业务感知方法，本文在 NS2 仿真软件平台上构建一个电力 EPON 的仿真系统。仿真系统由一个 OLT 挂载 32 个 ONU 以及 128 个采集器终端构成。以智能用电信息采集本地通信业务作为典型应用场景，通过仿真对具有业务感知机制的 EPON 和不具有业务感知的 EPON 进行比较。仿真验证主要针对配用电典型业务，将业务类型分为两类：丢包率敏感业务和时延敏感业务，每类业务内部优先级又分为两个等级：即高优先级业务和低优先级业务。

图 4 所示为业务感知准确率与训练次数关系。通过对比，可见随着训练次数的增加，业务感知的准确率也随之提高，直到准确率趋于稳定为止。因此，回声状态网络模型只有经过充分训练才能够有效保证业务分类识别的准确度和处理效率。

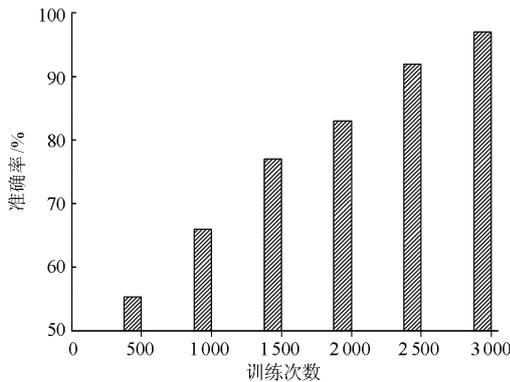


图 4 业务感知准确率与训练次数的关系

Fig. 4 Service-awareness accuracy with training times

在电力 EPON 系统中分别采用本文机制(业务感知)与传统机制(非业务感知)进行仿真对比，仿真比较结果如图 5 和图 6 所示。

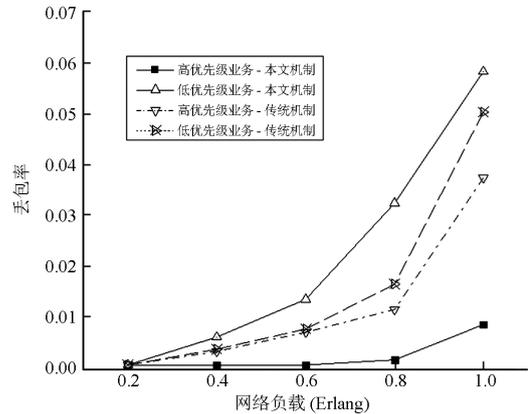


图 5 丢包率比较

Fig. 5 Comparison of packet-loss-rate

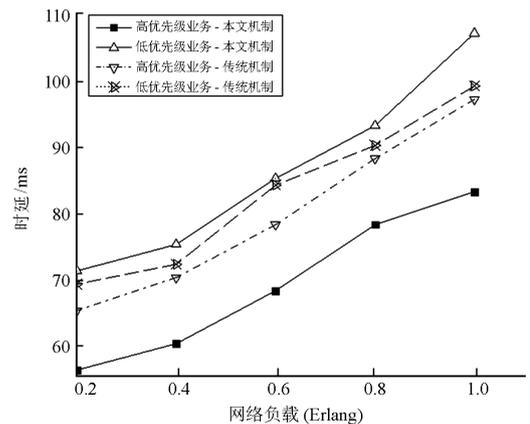


图 6 时延比较

Fig. 6 Comparison of delay time

结合图 5 和图 6 的仿真结果，随着网络业务负载的增加，EPON 的丢包率和实时性都呈现劣化的趋势。在高负载情况下，采用本文机制的 EPON 在高优先级业务的丢包率、传输时延这两大重要指标上，优于传统的 EPON 系统。另一方面，由于低优先级类业务对传输时延和丢包率要求较低，本文机制在某种程度上以降低此类业务性能的代价，换取整体的业务服务质量，尤其保证高优先级业务的 QoS 需求。

基于回声状态网络模型的主从式业务感知方法能够以较低的运算复杂度实现电力 EPON 系统多类型业务与通信服务质量的高效匹配。因此，本文所提的方法能够有效增强电力 EPON 对多业务区分支持的能力，尤其保证高实时性和高可靠性业务的服务质量，全面优化电力 EPON 面向智能电网多业务的资源分配效果。

5 结论

随着智能电网新业务日益多样化和复杂化,传统 EPON 难以有效支持多样化的业务发展趋势,迫切需要高效可行的业务感知技术。本文结合人工智能的典型算法回声状态网络模型,提出了一种基于层次回声状态网络算法的电力 EPON 业务感知方法,以期提升电力 EPON 对新型智能配用电业务的主动支持能力。仿真验证与分析结果表明,基于 ESN 的业务感知技术在保证 EPON 带宽和实时性的同时,可以有效提升 EPON 对智能配用电多业务本地接入的主动承载能力,最终实现电力 EPON 与智能配用电多业务本地通信接入的高效匹配支持。

参考文献

- [1] 詹智华, 詹荣荣, 陈争光, 等. 基于 EPON 网络的智能变电站继电保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 102-107.
ZHAN Zhihua, ZHAN Rongrong, CHEN Zhengguang, et al. Research of relay protection technology smart substation based on EPON network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 102-107.
- [2] 凌光, 许伟国, 王志亮, 等. 基于 EPON+ 的高可靠性固定时延网络在智能变电站应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 89-94.
LING Guang, XU Weiguo, WANG Zhiliang, et al. Research on communication architecture of smart substation with characteristic of high reliability and fixed latency based on EPON+[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 89-94.
- [3] 孙家可, 杜科. 面向配电网通信的光载无线系统线性度的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 118-124.
SUN Jiake, DU Ke. Research on the linearity of radio-over-fiber system for distribution network communication[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 118-124.
- [4] Hajduczenia M, Silva H J A D, Monteiro P P. 10G EPON Development Process. In: Proceedings of International Conference on Transparent Optical Networks, Rome, Italy, 2007. 276-282.
- [5] Elbers J.P. Optical access solutions beyond 10G-EPON/电力 PON [C]// Proceedings of 2010 Conference on National Fiber Optic Engineers Conference, 2010, San Diego, United States of America: 1-3.
- [6] Roy R, Kramer G, Hajduczenia M. Performance of 10G-EPON[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(11): 78-85.
- [7] CROTTI M, GRINGOLI F, PELOSATO P, et al. A statistical approach to IP-level classification of network traffic [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications, 2006, Istanbul, Turkey: 170-176.
- [8] Moore A W, Zuev D. Internet traffic classification using bayesian analysis techniques[J]. Acm Sigmetrics Performance Evaluation Review, 2005, 33(1): 50-60.
- [9] BAI Huifeng, LI Mingwei, WANG Dongshan. Bayesian Classifier based service-aware mechanism in 10G-EPON for smart power grid[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(6): 668-673.
- [10] Jaeger H, Lukosevicius M, Popovici D, et al. Optimization and applications of echo state networks with leaky-integrator neurons[J]. Neural Networks the Official Journal of the International Neural Network Society, 2007, 20(3): 335-352.
- [11] Jaeger H. Echo state network[J]. Scholarpedia, 2007, 2(9): 1479-1482.
- [12] Jaeger H, Maass W, Principe J. Special issue on echo state networks and liquid state machines. Neural Networks, 2007, 20(3): 287-289.
- [13] Rodan A, Tino P. Minimum complexity echo state network[J]. Neural Networks IEEE Transactions on, 2011, 22(1): 131-144.
- [14] Jaeger H. Reservoir riddles: suggestions for echo state network research. In: Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks. Montreal, Canada: IEEE, 2005. 1460-1462.
- [15] 雷煜卿, 李建岐, 侯宝素. 面向智能电网的配用电通信网络研究[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 14-19.
LEI Yuqing, LI Jianqi, HOU Baosu. Power distribution and utilization communication network for smart grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 14-19.
- [16] 徐志强, 陆俊, 翟峰, 等. 智能配用电多业务汇聚的通信带宽预测[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 712-716.
XU Zhiqiang, LU Jun, ZHAI Feng, et al. Communication bandwidth prediction of aggregation of multi-services for smart power distribution and utilization[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 712-716.
- [17] 国家电网公司. 国网信通部关于印发变电站、办公场所典型通信需求分类及建设要求的通知[R]. 2013.
- [18] 蒋康明. 电力通信网络组网分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 54-55.
- [19] 赵江河, 王立岩. 智能配电网的信息架构[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 26-29.
ZHAO Jianghe, WANG Liyan. Information structure of smart distribution network[J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 26-29.
- [20] Alexandre L A, Embrechts M J, Linton J. Benchmarking reservoir computing on time independent classification tasks. In: Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, Atlanta, Georgia, United States of America, 2009: 89-93.

收稿日期: 2018-01-03

作者简介:

李 钟(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行、电气建筑等。E-mail: 67050@163.com

(编辑 张爱琴)