

基于层次回声状态网络的电力 EPON 业务流感知

王雨竹, 黄敬华

(湖北大学 计算机与信息工程学院, 武汉 430062)

摘要: 为了进一步提高电力 EPON (Ethernet Passive Optical Network) 对智能电网多业务的支持能力, 文章提出了一种层次基于回声状态网络的电力 EPON 业务流感知技术, 采用离散回声状态网络算法对电力通信业务流进行识别感知, 以实现 EPON 对业务的高效匹配能力; 在此基础上通过 OLT 与 ONU 的交互, 优化电力 EPON 的资源调度与分配能力; 为了验证所提出的业务流感知机制, 以配用电通信 EPON 作为典型业务, 对基于回声状态网络算法的业务感知进行仿真, 仿真结果表明该机制能有效降低丢包率和缩短时延, 提高了 EPON 系统对电力通信多业务的支持能力。

关键词: 以太无源光网络; 业务感知; 回声状态网络; 智能电网

Hierarchical Echo—State—Network Based Service—Traffics Awareness in EPON for Smart Power Grid

Wang Yuzhu, Huang Jinghua

(School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: Aimed to improve the ability of EPON (Ethernet Passive Optical Network) to support multiple services brought by smart power grid, a Hierarchical Echo—State—Network Based Traffic—Awareness Mechanism in EPON system is proposed for energy internet. 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 mechanism 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.

Keywords: EPON; traffic awareness; echo state network; smart power grid

0 引言

随着能源互联网与智能电网的稳步发展, 电力通信本地接入业务流量日益庞大, 电力以太无源光网络 (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。随着该技术的演进, 业界已实现容量甚至达到 10G 的 EPON^[1]。

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。随着光接入网业务的日益复杂, 为了获得较好的 QoS (Quality of Service) 保障, 对业务识别和分类是实施相关网络行为, 进一步提高业务端到端 QoS 的前提和基础。在分析业务性能时往往需要获悉单个业务的流量、性能以及网络承载的并发流的统计特征, 用于指导流量工程策略制定与实施的业务流感知方法因此应运而生。业务流感知是一种更高层的流量监测方法, 把数据包按照不同的业务流定义进行分类识别, 并进行相应的资源优化调度, 提高光接入网对多业务的支持能力。因此, 电力 EPON 的智能感知能力尤为重要。业务感知通常被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^[2-3]。

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趋势。因此, 利用业务流的传输特征进行业务感知成为了新的研究方向^[3-9]。文献 [4-5] 的研究表明网络业务流的统计特性和应用协议之间存在着一定的对应关系, 但这些机制在对于业务类型感知的准确性方面存在不足。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, 但该方法的复杂度较高, 运算量较大。

在光接入网的业务流感知技术中, 基于业务流特征的模式识别算法起到了日益重要的作用, 而且模式识别算法的性能直接影响业务感知的准确度和效率。因此, 高准确率且复杂度适中的业务感知方法尤为重要。为此, 本文提出一种基于层次回声状态网络 (Echo State Network, ESN) 的电力 EPON 业务流感知机制, 采用离散回声状态网络算法对电力通信业务流进行识别感知, 以实现 EPON 对业务的高效匹配能力。在此基础上通过 OLT 与 ONU 的交互, 优化电力 EPON 的资源调度与分配能力。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 QoS 的区分支持能力。

1 面向电力业务的 EPON 系统

配用电网络覆盖面广, 运行环境复杂, 除了满足各类业务

收稿日期: 2017-12-13; 修回日期: 2018-01-30。

作者简介: 王雨竹 (1997-), 女, 湖北宜城人, 主要从事通信工程专业方向的研究。

通讯作者: 黄敬华 (1968-), 女, 湖北武汉人, 硕士, 副教授, 主要从事通信与信息工程方向的研究。

通道要求之外，还必须符合以下原则：

1) 安全性：电力二次系统的安全防护必须达到“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的要求。其中，纵联保护、配网自动化、变电站监测、用电负荷控制业务属于生产控制大区范畴，必须由电力通信专网承载，以满足《电力二次系统安全防护规定》以及《电力二次系统安全防护总体方案》的要求。

2) 可靠性：智能配用电网的通信系统必须部署具有自愈功能的备份通道，通信设备要求具有工业级的可靠性，其他基础设施建设必须考虑可靠性保障的原则和要求。

3) 经济性：配电网终端设备往往规模庞大，海量的业务接入要求智能配用电通信网应全面考虑各类业务特性，通信节点部署必须兼顾可靠保障和全面覆盖、设计合理经济的实施方案。

配用电通信网络通常分为骨干层和接入层，配电主站和配电子站之间的通信网络为骨干层，配电主站、子站至配电网终端的通信网络为接入层。骨干层可合理利用主网资源，依托 EPON 等光通信技术。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，电力 EPON 系统架构如图 1 所示。

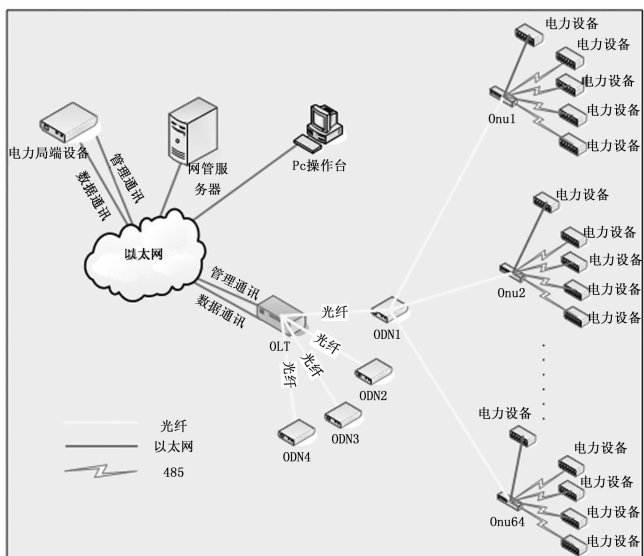


图 1 电力 EPON 系统架构

以太无源光网络（EPON）技术以其高可靠性、高带宽、高传输效率以及长期成本低的特点，在智能配用电通信系统中具有极大的优势和良好的适用性。EPON 系统由局侧的光线路终端（OLT）和用户侧的光网络单元（ONU）组成，OLT 到 ONU 下行方向采用广播传播的方式，OLT 发送的数据通过 ODN 到达各个 ONU。ONU 到 OLT 上行方向采用 TDMA 多址接入方式，ONU 发送的数据会依次汇聚到 OLT 设备上，再由 OLT 通过三层交换机接入光纤专网上联到主站平台。

在用电领域，EPON 技术与传统的无线通信和电力线载波通信技术相比，在可靠性和实时性等方面有着明显优势；未来随着用电信息采集业务向更精细化管理方向的发展，要求其通信系统具备对精细化业务的支持能力。EPON 作为最重要的通信方式之一，已被纳入国家电网公司的用电信息采集的新增标准规范中。

在配电领域，EPON 作为配电自动化主要的通信方式之

一。EPON 网络拓扑与 10kV 配电线路的物理拓扑具有极高相似度；EPON 系统通常可采用树型、星型等各种拓扑结构，支持电力手拉手保护方案。由于 EPON 技术的稳定性和实时性远远高于无线通信，在配电自动化中采用 EPON 技术，可有效解决工业以太网多点故障问题。因此，在国家电网公司制定的《配网通信总体设计》标准规范中，EPON 也被列为主要通信技术之首。

2 层次回声状态网络分类算法

2.1 回声状态网络原理

回声状态网络（ESN）算法是一种可用于模式识别的新型神经网络算法。ESN 采用由随机稀疏连接的神经元组成的储备池作为隐层，用以对输入进行高维、非线性的表示。储备池的生成过程独立于回声状态网络的训练过程，因此，只需采用线性方法训练储备池至输出层的权值，使网络的训练过程得以简化，并保证权值确定的全局最优性以及良好的泛化能力，避免了传统神经网络中存在的训练算法复杂、易陷入局部最小等问题。上述优点使得回声状态网络在业务量感知中具有极大的应用潜力。回声状态网络的典型结构如图 2 所示，由输入层、核心层和输出层组成^[10-14]。

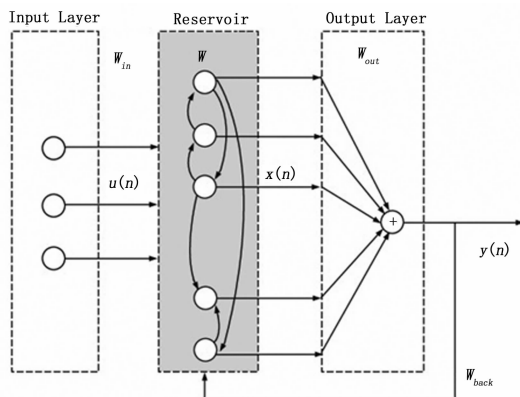


图 2 回声状态网络结构图

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。回声状态网络的基本方程为公式 (1) 和公式 (2)：

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

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

其中： $u(n)$ 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} 通常被设置为常数，通过一定的训练可获得 W^{out} 。

在 ESN 的训练中，样本数据通过随机生成的权值矩阵 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化。

2.2 回声状态网络分类算法

回声状态网络分类方法的基本原理如公式 (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^[15]。

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

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 基于层次回声状态网络算法的业务感知

3.1 基于层次 ESN 的业务分类感知原理

为了进一步提高电力 EPON 的业务感知能力, 本文提出了基于层次回声状态网络算法的业务感知。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, 其本质是根据条件属性 (业务特征) 确定决策属性 (业务类型) 的分类过程。

针对 EPON 系统的主从式架构, 本文提出一种分层 ESN 模型。分层 ESN 模型分为规则层、主控层和代理层 (如图 3 所示)。

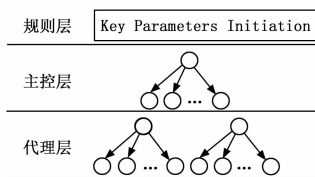


图 3 分层 ESN 模型结构图

主控层由 ESN 主控模块和训练样模块构成。主控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, 主控模块将 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。代理层由众多的 ESN 代理模块构成。各代理模块都从主控层获得相同的 ESN 分类器, 并使用相同的分类器进行业务流分类感知。

基于层次回声状态网络算法的业务感知过程分为三部分: 业务特征参数提取、ESN 训练和 ESN 判决。ONU 对收到的双向业务流 P_i 提取其主要特征参数, 主要包括帧长度、业务流持续时间和业务包流时间间隔, 形成业务流的特征集 $u = \{u_1, u_2, \dots, u_k, \dots\}$ 。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 业务流特征参数的提取与预处理

在基于分层 ESN 模型的业务流感知中, 业务流特征是进行分类感知的输入信息。因此, 首先需要对业务流特征进行提取, 业务流特征主要包括: 数据包长 $P_{SIZE}(i)$ 、数据包到达间隔 $P_{INTERVAL}(i)$ 、业务持续时间 $P_{DUR}(i)$ 和 ONU 节点的负载程度 $P_{LOAD}(i)$ 。其中, 为了充分考虑 ONU 节点的业务负载程度对业务流影响, 特别引入了负载程度 $P_{LOAD}(i)$ 作为特征参数之一。

主控层和代理层都需要对业务流的特征参数进行预处理。

主控层在进行 ESN 训练之前, 需要将样本集里的特征参数进行归一化预处理; 而代理层同样需要对到达的业务流提取特征参数进行归一化预处理。预处理方法见公式 (4)。

$$\begin{cases} U(i) = (x_{i,1}, x_{i,2}, x_{i,3}, x_{i,4}) \\ x_{i,1} = \frac{P_{SIZE}(i)}{P_{SIZE_MAX}} \\ x_{i,2} = \frac{P_{INTERVAL}(i)}{P_{INTERVAL_MAX}} \\ x_{i,3} = \frac{P_{DUR}(i)}{P_{DUR_MAX}} \\ x_{i,4} = \frac{P_{LOAD}(i)}{P_{LOAD_MAX}} \end{cases} \quad (4)$$

其中: P_{SIZE_MAX} 为统计的最大包长, $P_{INTERVAL_MAX}$ 为最大的到达间隔, P_{DUR_MAX} 为最大的业务持续时间, P_{LOAD_MAX} 为 ONU 节点最大的负载率。

主控层将训练样本集提供的业务流的特征集根据公式 (4) 进行训练前的预处理。代理层中, 各个贝叶斯代理模块也根据公式 (4) 对提取到的业务流特征数据进行 ESN 分类运算之前的预处理, 便于 ESN 分类器计算出该业务流所属的优先级类型。

3.3 业务感知机制的实现

在业务感知机制的实现方式上, 本文根据 PON 系统中 OLT 与 ONU 之间的主从式架构, 提出了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 4 所示。

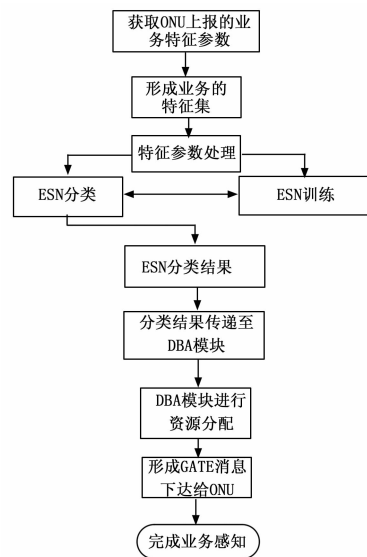


图 4 电力 EPON 的业务感知处理流程

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 对获得的 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。

主控层中, ESN 主控模块可采用当前现有的 ESN 训练方法以形成 ESN 分类器。将 ESN 训练统一到 OLT, 以保证系统

中所有 ONU 都采用相同的 ESN 分类器，从全局角度保持业务感知结果的一致性。此外，ONU 节点统计业务流分类感知的记录（包括特征值和分类识别结果），并周期性地将此记录反馈给主控层，不断补充新的训练样本集。而 OLT 中的 Bayes 主控模块会周期性地根据样本集重新进行 ESN 训练，以形成新的 ESN 分类器。

代理层功能由运行在 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并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 $U(i)$ ，输入 ESN 分类器进行运算得到分类识别结果，即业务流的优先级；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。

3.4 复杂度分析

复杂度是基于层次 ESN 的多业务感知算法的关键性能指标之一。只有高准确率且复杂度适中的核心算法模型，才能使业务感知技术具备可实现性。采用 ESN 算法模型为核心，要获得业务流识别计算的结果，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 $O(1)$ 。

复杂度通常与输入参数集的成员数量成正比。假设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，同时保证了对业务流进行感知的准确性。

4 仿真结果与分析

为了验证所提出的机制，本文在基于 NS2 的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 构成。以智能配用电通信的本地接入作为典型业务场景，主要包括用电信息采集、配电自动化、配电终端监测等业务。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。仿真中将业务类型分为两类：丢包率敏感业务和时延敏感业务，每类业务内部优先度又分为两个等级：即高优先级业务和低优先级业务。

图 5 为业务感知准确率与训练次数关系图。可见随着训练次数的增加，业务感知的准确率也随之提高，经过充分训练的回声状态网络算法能够保证业务分类分级的准确度。

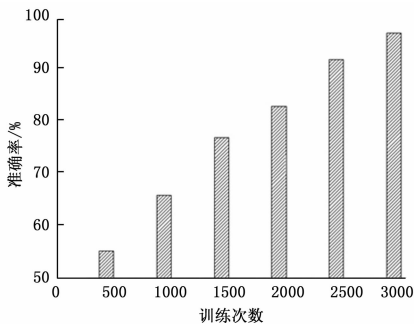


图 5 业务感知准确率与训练次数关系

传统的非业务感知机制进行仿真，图 6 和图 7 为比较的结果。结合图 6 和图 7 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均优于传统的 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。

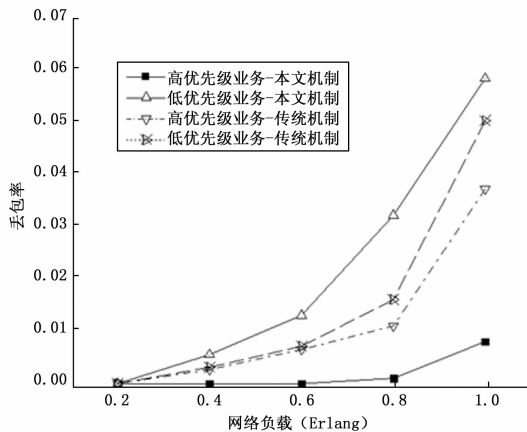


图 6 丢包率比较

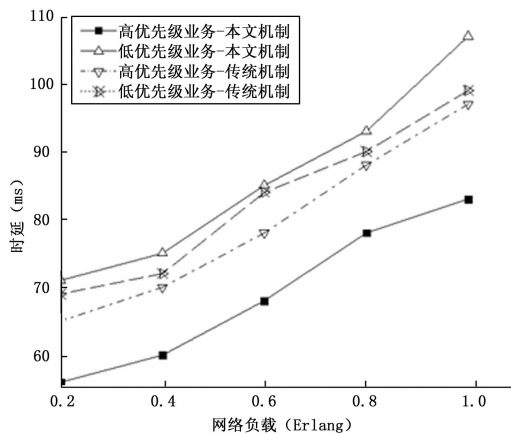


图 7 时延比较

综上所述，本文所提出的业务感知方法在较低的运算复杂度的情况下，能够保证电力 EPON 系统中不同类型及不同优先级的业务能够获得与之相匹配的业务质量，并且保证了对业务的总体服务质量。因此，与不具备业务感知的电力 EPON 相比，本文所提出的机制能够有效增强电力 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 结语

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趋势，迫切需要高准确率、复杂度适中且易于实现的业务感知方法。本文为了提高电力 EPON 对智能电网多业务的主动支持能力，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。根据 PON 系统中 OLT 与 ONU 之