

基于 OPNET Modeler 的变电站层通信网络实时性能仿真

汪哲民, 张帆

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对嵌入式以太网在变电站自动化通信网络应用的实时性问题, 分析了变电站网络通信时延的构成, 采用 OPNET Modeler 建立了变电站层通信网络的仿真模型, 对变电站嵌入式以太网的实时性能进行了详细分析。仿真结果证明, 嵌入式以太网在变电站网络通信中具有可行性。

关键词: 变电站自动化; 嵌入式以太网; 实时性; 网络通信

中图分类号: TM743

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)21-0049-03

Real-time performance simulation of communication network of substation layer based on OPNET Modeler

WANG Zhe Min, ZHANG Fan

(School of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: At First, to solve the problem of real-time performance of embedded Ethernet in substation automation communication network, the composition of substation communication network delay is analyzed, then a modeler of network delay of embedded Ethernet in station layer is built and studied based on OPNET Modeler. The real-time performance of substation communication network simulation model is analyzed. The results of simulation shows the feasibility of embedded Ethernet in substation communication network.

Key words: substation automation; embedded Ethernet; real-time performance; communication network

变电站自动化通信系统是变电站自动化系统的关键组成部分, 它直接影响着整个系统的性能。近年来随着变电站自动化的功能变得越来越强大, 所有功能的实现都需要依靠通信网络, 都需要快速通信和数据共享, 这对站内通信提出了更高的技术要求。变电站自动化系统的几种网络通信模式各有特点, 但各种协议统一到以太网上是网络通信发展的一大趋势^[1]。

变电站自动化设备大多建立在嵌入式系统平台上, 为了实现网络化的通信, 变电站自动化设备都需要具备直接的以太网接口。目前以太网应用于变电站自动化系统中的最大问题是网络传输实时性的问题, 且对变电站以太网通信实时性的研究大多建立在计算机平台上, 对于由基于嵌入式系统的变电站自动化设备组建的变电站通信网络的实时性研究较少, 而且缺乏具体的、量化的网络实时性分析。因此, 针对嵌入式以太网在变电站

自动化通信网络应用的实时性研究具有现实性和必要性。本文基于嵌入式以太网, 对变电站自动化网络通信的特点和实时性进行了研究。

1 时延构成分析

变电站自动化系统的功能大多由分布于不同物理设备的两个或多个逻辑节点通过网络传输报文协调完成。例如, 物理设备 IED1 的功能 A 把报文发送到位于物理设备 IED2 中的功能 B, 报文传输过程如图 1 所示^[2]。

在报文传输时, 发送节点的功能 A 将待发送报文按帧格式封装, 通过系统调用功能将报文发送至操作系统。报文首先要经过高层协议进行分层处理, 然后调用 MAC 层的以太网控制器(NIC)驱动程序的发送模块。在 NIC 的发送模块中, 将要发送的报文传送到 NIC 的发送缓冲区。最后, 报文按照串行次序通过物理层的通信接口发送出去。

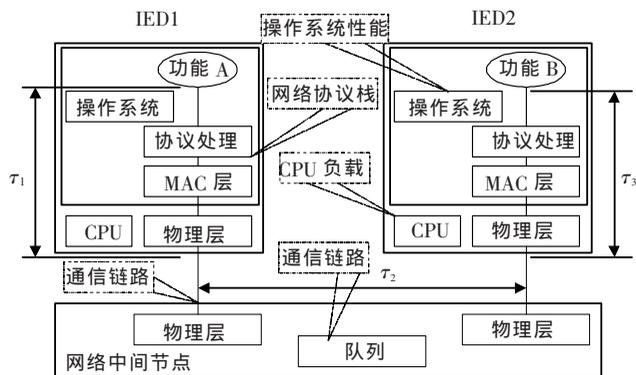


图1 变电站报文传输过程

与发送节点相对应,接收节点也需要类似的过程。报文到达时,首先由NIC产生中断信号触发CPU中断,CPU响应中断后进入中断服务程序。在中断服务程序中,将报文从MAC层NIC的接收缓冲区复制到内核空间,并同时产生高层协议处理任务。然后,操作系统调用高层协议处理任务,由该任务将报文从内核空间复制到用户空间。最后,功能B从用户空间提取报文。

从上述过程可以看到,报文传输过程的实质是由发送节点的某功能产生发送报文,经过各层协议的封装解析并通过网络到达接收节点的某功能,网络时延就是在这个过程中产生的。根据时延的产生过程和影响因素的特征,将报文的端到端时延分成三部分:发送处理延迟 τ_1 、网络链路延迟 τ_2 及接收处理延迟 τ_3 。

发送处理延迟 τ_1 是以发送节点的功能A将应用数据交给协议栈进行协议封装开始,到通信控制器实际开始报文发送之间所经历的延迟。接收处理延迟 τ_3 是从接收节点的通信控制器开始报文接收,到协议栈进行协议拆封并最终将应用数据提交给端系统的功能B之间的延迟。可以看出, τ_1 、 τ_3 与通信控制器的性能、操作系统的性能以及所采用的通信协议的性能有关。因此,设计中应采用合适的微处理器、实时操作系统以及高效的通信协议。

链路延迟 τ_2 是报文从发送节点的网络接口,到达最终的接收节点的网络接口期间所经历的全部延迟,主要包括传输时延、排队时延和传播时延。 τ_2 的大小主要取决于通信网络的介质访问控制方法、数据传输的波特率、报文的长度以及传输的距离等因素。其中,排队时延是造成网络时延不确定的主要因素。

2 OPNET Modeler 的应用

OPNET公司起源于麻省理工学院(MIT),1986年成立,1987年OPNET公司发布了其第一个商业化的网络性能仿真软件,提供了具有重要意义的网络性能优化工具,使得具有可预测性的网络性能管理和仿真成为可能。OPNET公司1998年进入中国,并快速发展。由于OPNET公司其出众的技术而成为了当前业界领先的智能化网络仿真、分析、管理解决方案的提供商。本文使用

OPNET公司的第一个商业化产品——OPNET Modeler,它是当前业界领先的网络技术开发环境,以其无与伦比的灵活性应用于设计和研究通信网络、协议、设备中。OPNET Modeler为开发人员提供了建模、仿真以及分析的集成环境,大大减轻了编程和数据分析的工作量^[3]。

OPNET Modeler为通信网络和分布式系统的建模及性能评估提供了一个综合的开发环境和分析平台。OPNET Modeler由许多工具组成,每一个工具关注建模任务的一个具体方面,对应于项目建模和仿真流程的三个阶段:规范说明阶段、数据收集阶段、仿真分析阶段。这些工具也可划分为三个主要类别:规范说明工具、数据收集工具和仿真分析工具。项目建模和仿真流程的三个阶段按序执行,通常形成一个环,在这个环中规范说明实际上被分为两部分:初始化定义和重定义。初始化定义执行后进入环中循环,经过数据收集、仿真及分析,最后回到规范说明的重定义部分继续循环。其项目仿真流程如图2所示。



图2 OPNET Modeler 项目仿真流程图

3 站级网络模型的建立

站级网络在多数时间里只有报告报文,网络负荷低,但保护动作、控制等随机事件和突发事件发生后会产生事件报告、控制命令、变位信息及文件传输等报文,网络负荷短时增大^[4]。站级网络传输的报文除了具有周期性和随机性的特点外,还具有突发性数据流的特点。

考虑到站级网络设备可以与远程监控中心通信,因此,站级网络上的报文应该能在Internet上传输,这样就要求各设备节点的高层协议采用TCP/IP协议。本文的各种仿真节点模型均基于OPNET Modeler的TCP/IP模板来建立,站级网络节点的基本模型如图3所示。

站级网络模型的建立以IEC 61850标准中的D2型配电变电站为例^[5]。大多数D2变电站内的总元件数多于5个,少于20个。一个典型的D2型变电站一般有两路为输电电压等级的进线,两台主变电站,低压侧有两段及以上的母线,若干条最高电压等级不超过35kV的馈出线路。本文选择20个IED构成间隔层设备和一个监控主机(图4中的SCADA)。又因站级网络包含突发性数据流,因此本文采用一个文件传输协议FTP(File Transfer Protocol)服务器节点来模拟产生故障录波、文件、定值等大量突发性数据业务^[6],并通过应用配置和配置描述两个模块来设置应用层业务。

根据变电站的实际情况,本文选择网络的基本参数

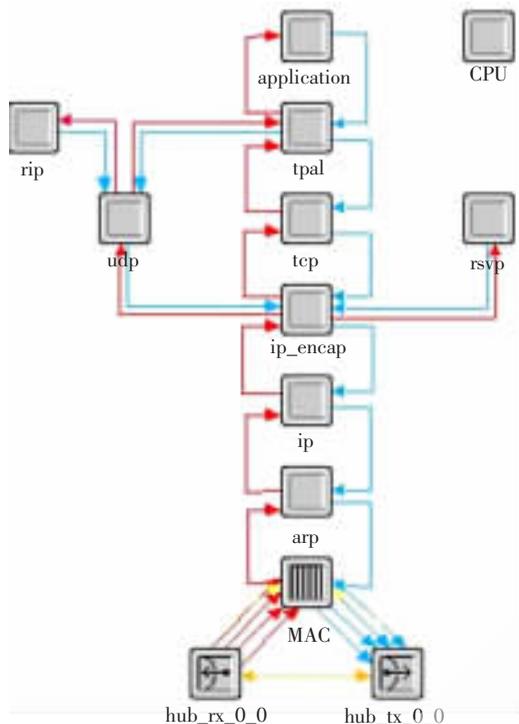


图3 站级网络节点的基本模型

网络的拓扑结构为星型结构,网络半径为 500 m,网络带宽为 10 Mb/s,中间节点选择交换机,构成的站级网络仿真模型如图 4 所示。

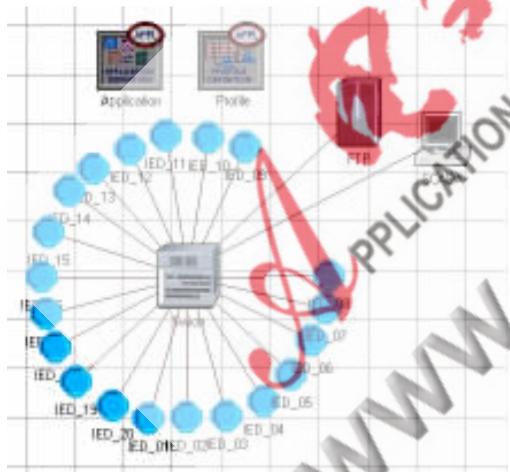


图4 站级网络仿真模型

图 4 中的各节点具体通信行为如下:

(1) 间隔层设备节点,即图中的 IED₁~IED₂₀。这些设备主要向监控主机传输一些报告类型的报文,且传输的数据为周期性数据流。考虑到报文增加了上层协议的封装,报文的长度取 512 B,报文到达的时间间隔取 20 ms。

(2) 监控主机节点,即图中的 SCADA。监控主机向 IED₁~IED₁₀ 随机发送控制报文,应用层数据长度固定为 256 B,报文到达为泊松到达,到达时间间隔服从 $\lambda=0.01$ s 的指数分布。

(3) FTP 服务器节点向网络传送的 FTP 业务数据,用来模拟间隔层设备向变电站层设备上传的突发性数据流。本文模拟 10 个 IED 的突发性数据流,报文长度服从 1 024 B 的常数分布。根据 ON/OFF 数据模型的特点,取 ON 状态持续时间服从 Pareto 分布,其参数为 $k=1$ ms, $\alpha=1.2$ 。OFF 状态持续时间服从参数 $\lambda=0.01$ s 的指数分布。

4 仿真结果

建立的仿真节点模型采用完整的 TCP/IP 协议栈,考虑到 TCP/IP 协议栈较为复杂,网络时延包含报文在发送和接收端处理时间的端到端延时。经过仿真得到的站级网络的端到端信息传递时延的仿真结果如图 5 所示。



图5 站级网络的网络时延仿真结果

从图 5 可以看到,随着大量突发性和随机性数据流的加入,网络时延在 1.6 ms~1.7 ms 之间,网络时延产生一定的波动,同时站级网络的端到端时延比过程网络的链路时延要高出很多。也可以看出,除了网络本身,端节点对协议栈的处理能力也是影响通信性能的重要因素。考虑到间隔层设备大多采用嵌入式系统,对协议封装和拆封的开销不能忽略,在满足系统开放性的基础上,采用精简的 TCP/IP 协议栈是必要的选择。

依据变电站站级网络的实际要求,在对各间隔层设备模型协议栈进行裁剪的基础上,对端对端传递时延进行了仿真,仿真结果如图 6 所示。比较图 5 和图 6 可以看出,经过裁剪的 TCP/IP 协议的嵌入式以太网节点的端对端传递时延要比裁剪前时延要减少 0.3 ms 左右。

本文对变电站自动化网络通信的时延构成进行了分析,采用动态仿真软件 OPNET Modeler 对电站嵌入式以太网的实时性能进行了详细研究,建立了变电站通信网络的仿真模型,具体研究了变电站层嵌入式以太网的网络时延,研究结果证明了嵌入式以太网在变电站网络通信中的可行性。

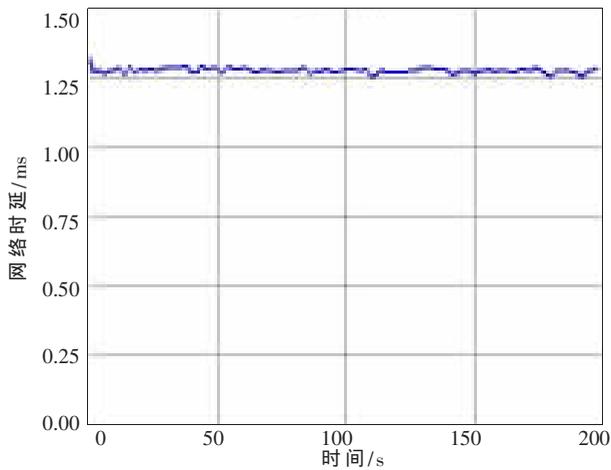


图6 应用裁剪 TCP/IP 协议栈的网络时延仿真结果

参考文献

- [1] 谭文恕. 变电站通信网络和系统协议 IEC61850 介绍[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 8-11.

- [2] 辛建波. 基于以太网的变电站自动化系统时延不确定性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [3] 李馨, 叶明. OPNET Modeler 网络建模与仿真[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- [4] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络性能仿真分析[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 98-104.
- [5] IEC 61850-1. Communication networks and systems in substations-part 1: introduction and overview[R], 2003.
- [6] 韩小涛, 聂一雄, 尹项根. 基于 OPNET 的变电站二次回路通信系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 67-71.

(收稿日期: 2010-06-14)

作者简介:

汪哲民, 男, 1964 年生, 工程师, 主要研究方向: 变电站综合自动化及其应用。

张帆, 男, 1984 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 变电站综合自动化及其应用。

电子技术应用
APPLICATION OF ELECTRONIC TECHNIQUE
www.chinaAET.com