

文章编号: 2095-4980(2019)02-0315-07

面向数据中心网络的分布式负载均衡网关架构

兰亚柱¹, 孙征征^{1,2}, 梁冬¹

(1.中国科学院 计算技术研究所, 北京 100190; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为满足数据中心网络在高并发量、低尾延时等性能上的需求, 提出一种面向数据中心网络的分布式负载均衡网关架构。该新型网关架构主要包括资源池化汇聚算法、优先调度算法和动态负载均衡算法等 3 个核心算法模型。基于该架构, 借助现场可编程门阵列(FPGA)实现智能网关的整体设计。通过第三方测试, 基于分布式负载均衡网关架构的智能网关可针对数据包的关键信息实现灵活、可扩展的负载均衡, 线速可达 9.4 Gbps(不丢包), 线速为 10 Gbps 的丢包率约 5%, 端口时延为 2 μ s。与通用的负载均衡方案(软件负载均衡与硬件负载均衡)相比, 分布式负载均衡网关架构采用基于数据包优先调度的负载均衡策略和硬件存储资源智能“池化”的流量管理, 保障了数据中心网络系统中百万级数据流的高效分发, 提升高并发量、低时延应用的性能。在面向百万条并发情况下, 网络链路响应尾延时小于 60 ms。

关键词: 数据中心网络; 负载均衡; 高并发; 低延时; 现场可编程门阵列

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0315

Efficient distributed load balancing gateway architecture based on data center networks

LAN Yazhu¹, SUN Zhengzheng^{1,2}, LIANG Dong¹

(1.Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A load balancing framework for distributed data center network is proposed in order to improve the data center network with high concurrency and low latency performance. Aiming at the distributed load balancing architecture, the whole design of the customized intelligent gateway is realized on the basis of Field Programmable Gate Array(FPGA). Third party testing based on custom gateway can package information based on load balancing, with line speed up to 9.4 Gbps(no packet loss), and the packet loss rate of 10 Gbps is 5%, the port delay is 2 μ s. Compared to load balancing scheme(universal software load balancing and hardware load balancing), the distributed load balancing architecture adopts customized intelligent gateway information packet load balancing strategy and intelligent traffic management based on pool, which guarantees the efficient distribution of millions of data flow in server system, and improves the performance of high concurrency applications. In the case of millions of concurrent scenarios, the TCP link response delay is less than 60 ms.

Keywords: data center network; load balancing; high concurrency; low latency; Field Programmable Gate Array

随着第五代(5G)移动通信技术的到来, 人们将很快进入以人工智能和物联网为基本核心的万物智慧互联时代^[1-3]。在此背景下, 为了满足网络信息量和用户访问量日益增长的需求, Google、Facebook、阿里巴巴、腾讯等国内外互联网巨头不断扩建自己的数据中心^[4-6]。然而, 在高并发、低时延的数据中心网络中, 仅靠简单地提升服务器性能并不能有效解决高并发, 反而经常会导致宕机问题。一般情况下, 通用方法是采购高性能服务器并在前端部署硬件负载均衡设备。通过采购更高性能的服务器确实可在一定程度上解决问题, 但除开访问高峰, 其

收稿日期: 2017-11-02; 修回日期: 2018-05-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB1000401); 计算机体系结构国家重点实验室 2017~2018 年度室创新课题资助项目(CARCH3509)

他时段资源空闲造成浪费,且随着系统用户类型及数量增加,逐渐达到服务器能力上限,只能继续购买新服务器。

负载均衡将是大型网站解决高负荷访问和大量并发请求采用的高端解决办法^[7-14]。负载均衡技术主要有以下 2 种架构: a) 硬件四层交换: 第四层交换使用第三层和第四层信息包的报头信息, 根据应用区间识别业务流, 将整个区间段的业务数据流分配到合适的应用服务器进行处理。b) 软件四层交换: 基于开放系统互连(Open Systems Interconnection, OSI)模型实现的软件四层交换, 具有更强的灵活性, 不过性能稍差。硬件负载均衡虽被广泛采用, 但价格高, 支持协议有限, 同时也是一个可能故障点。而采用灵活伸缩、具有高可靠性的软架构是比较可行的办法。在国内外相关研究及案例中, 软均衡负载有基于域名服务器(Domain Name System, DNS)、客户端、负载均衡服务器等多种方式。随着数据中心网络规模的不断扩大, 分布式负载均衡越来越具有优势。

现场可编程门阵列(FPGA)作为专用集成电路领域中的一种半定制电路结构, 与其他硬件平台相比, 具有高速、高可靠性、开发周期短等特点^[15-19]。针对数据中心网络中的高并发请求与及时响应等性能特点, 结合 FPGA 的硬件结构特点, 本文提出一种面向数据中心网络的分布式负载均衡网关架构。

基于数据中心网络中的数据流特征, 本文提出分布式负载均衡架构中, 数据流处理分为 3 个阶段执行(分别对应 3 个核心算法): 首先, 通过资源池化汇聚算法, 利用两级阈值调节策略, 对数据流进行高效的汇聚处理; 其次, 为了提高负载均衡调度的效率, 利用优先调度算法区别处理不同种类的数据信息, 从而保证通过汇聚算法处理后的高优先级数据信息可以得到高效调度处理; 最后, 根据动态负载算法, 完成对数据流信息到数据中心服务器集群的处理。

利用 Xilinx VC709 硬件平台, 基于 XC7VX690tffg1761-1 FPGA, 该分布式负载均衡架构支持高速网络环境下的大容量高并发需求。分布式负载均衡网关架构基于动态负载均衡策略, 能够将所有的并发请求高效分发给后台服务器集群中相应的特定服务器, 从而节省用户访问请求的响应时间。分布式负载均衡网关架构的性能主要由高并发访问的响应速度反应来体现。基于百万级并行访问的系统验证结果表明, 本文提出的面向数据中心网络的分布式负载均衡架构有效降低了高并发网络中响应尾时延, 提高了网络流量处理系统的效率。

1 核心问题

基于 Internet 的统计分析表明, 现有网络中超过 80% 的用户经常访问的是 20% 的网站的内容。在这个规律下, 缓存服务器可以处理大部分客户的静态请求, 而原始的服务器只需处理约 20% 左右的非缓存请求和动态请求, 可加快客户请求的响应速度, 并降低原始服务器负载。如何实现一种有效的高速缓存, 成本较低, 适用于静态内容。在此情况下, 如何有效地实时识别数据流中的各类信息, 并实施以流水线式的异构加速处理, 成为分布式负载均衡网关架构面临的关键核心问题。

如图 1 所示, 在数据中心网络中, 如果分布式负载均衡网关架构可以通过提取数据流中有效的特征信息, 并利用基于 FPGA 的加速器引擎处理模型对数据流进行优化加速, 实时识别并基于优先级对不同数据包进行相应处理, 便可以有效解决数据中心网络中的高并发引发的性能下降问题。由于在高并发常链接环境下, 绝大多数的请求包及响应包均为短包, 因此提升服务器集群并发处理能力的途径是采用流水线结构和并行运算。

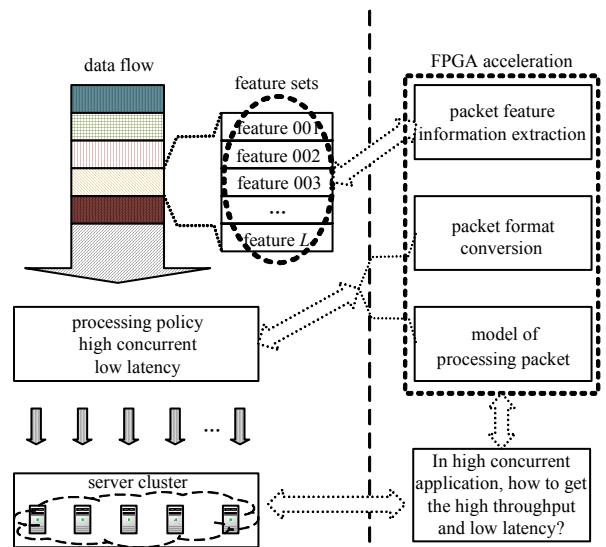


Fig.1 Problem statement

图 1 问题定义

2 关键算法

2.1 资源池化汇聚算法

资源池化汇聚算法负责对网络中的多路数据流进行参数化选择性汇聚, 汇聚进程中被选中的数据流将被转发到下一级相应的处理模块。资源池化汇聚算法中的资源是指硬件结构中的存储资源, 其中心思想是通过将硬件逻辑存储资源进行“池化”处理, 并依据池化存储资源的大小, 借助网关架构对应的系统软件通过 PCI-E (Peripheral Component Interconnect Express)接口设定的相关参数, 并将相关参数传递给硬件架构平台。资源池化汇聚算法模

型可动态预设阈值,对数据流的汇聚进行相应的动态控制。

资源池化汇聚算法模型如图2所示。通过软件系统预设的自定义两级阈值 β 与 γ ,网络中的多路数据流可在正常转发和丢弃之间动态地实时切换,从而完成对网络中海量数据流的高效调节。其中, β 为针对数据流优先级定义的阈值,针对不同种类的数据流具有精准的调节功能。 γ 为针对资源池化定义的阈值,针对所有的数据流具有快速反应和及时调节的功能。在此情况下, β 值的获取与实际应用中的数据流种类有很大关系, γ 值一般采用的系统阈值范围则为0.8~0.9。

2.2 优先调度算法

优先调度算法主要负责在面对数据流中不同类型的数据包(指令包、心跳包和背景包)时,如何保证指令包和心跳包优先调度,保证不丢包。关于不同类型的数据包,本文定义如下:

指令包:携带关键指令的数据包,长度固定;

心跳包:负责监测数据流连接是否正常的数据包,长度固定;

背景包:存在于网络中的大量数据包。

优先调度算法采用静态调度结合动态调度的两级调度模型。静态调度采用目标地址散列调度(Destination Hashing, DH)和源地址散列调度(Source Hashing, SH)相结合的方式,分别基于目标地址哈希算法和源地址哈希算法进行静态调度。动态调度采用加权最少连接(Weighted Least Connection, WLC)算法,根据后端服务器集群的连接数及权重进行分发。同时,动态调度算法还可以采用资源池化汇聚算法提供的共享缓存的优势,增加动态调度的灵活性,进而提升调度效率。通过针对不同类型的数据包,优先调度算法可有效利用静态和动态两级调度的优势,设计特定的优先调度机制,从而可以有效实现针对不同的网络服务需求和服务器配置使用不同的调度算法。

2.3 动态负载均衡算法

动态负载均衡算法主要负责将具有高优先级的数据包高效转发到后台服务器集群中的特定服务器。其中,需重点保证来自同一用户的高优先级数据包优先发送到同一台服务器。

面对数据中心网络对高性能分布式负载均衡特性需求,动态负载均衡算法模型考虑的核心原则有2条:a)采用轮询的方式,发送指令包;b)考虑用户识别码,相同的用户识别码需要被优先发送到相同服务器中,从而避免跨服务器之间的复杂通信,提升数据中心网络系统的整体响应速度。

动态负载均衡算法模型如图3所示。面向数据中心网络的服务器负载均衡是在网络结构中部署多台服务器提供相同的服务。负载均衡控制器根据提供服务器负载真实情况,通过某种算法将负载合理分配到多台节点设备上进行处理,以保证服务的高可靠性和高性能。当动态负载均衡架构中的一台或几台服务器出现故障时,动态负载均衡控制器会自动将用户请求切换到其他可用服务器上,在很短的延迟内选择性能最佳的服务器响应客户请求,减少用户等待响应时间和提高系统处理能力,保证用户访问质量可靠性及高效性。

为了满足易配置、低成本,以及不同要求等需求,动态负载均衡算法模型为独立于服务器的硬件设备,具备高性能、多样化的管理策略。

3 系统架构

基于资源池化汇聚算法、优先调度算法和动态负载均衡算法,本文实现面向数据中心网络的分布式负载均衡网关架构,采用动态自适应的思想来优化整体系统架构,从而具有出色的高效性、灵活性及普适性。

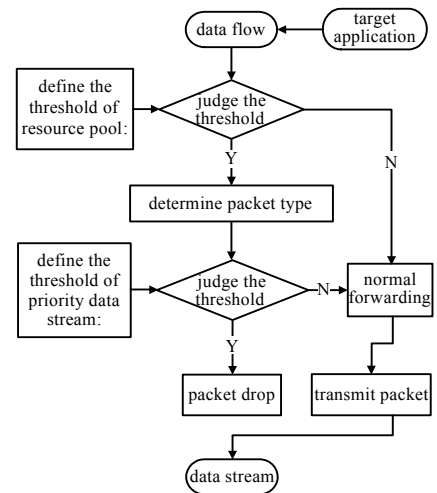


Fig.2 Resource pooling algorithm model
图2 数据流资源池化汇聚算法模型

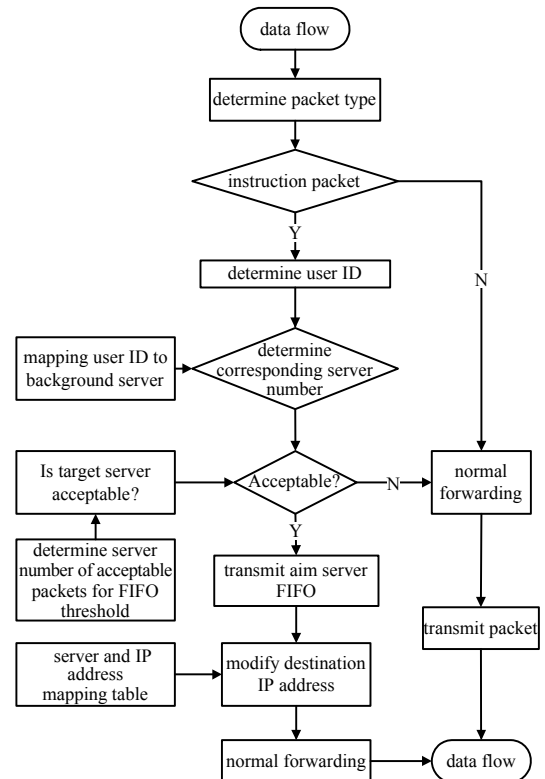


Fig.3 Dynamic load balancing algorithm model
图3 动态负载均衡算法模型

基于动态自适应优化的系统架构如图 4 所示。按照系统功能划分,分布式负载均衡网关架构主要由 4 部分组成: 10GE 接口模块、数据包信息处理模块(Packet Process Module, PPM)、数据包信息解析转化模块(Packet Transform Module, PTM)以及 PCI-E 接口模块。针对不同模块在网关系统数据链路中的不同位置,图 4 中深浅不同阴影部分标识不同模块。

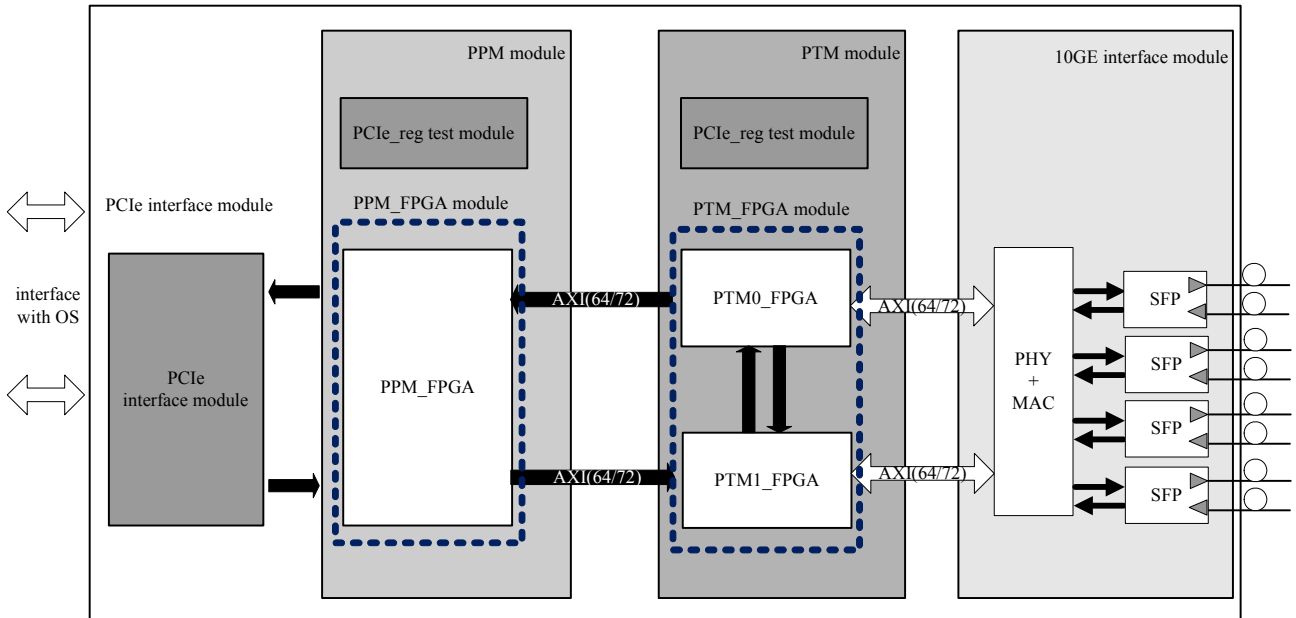


Fig.4 Architecture diagram of gateway

图 4 网关结构框图

10GE 接口模块把 10GE 光信号进行光电转换、串并转换、把数据帧交给 PTM 模块、进行相应的数据信息统计。同时, 10GE 接口模块把 PTM 模块传来的以太网数据帧进行并串转换、电光转换发送到光纤链路上。

PTM 模块从 PPM 模块接收数据包, 并高效封装为以太网帧。同时, 根据数据包的相应处理信息, 按照需求进行转发操作。转发策略可以直接发送给某一个 10GE 接口, 也可以备份后分发给多个 10GE 接口。

PPM 模块接收 PTM 模块传来的数据包, 解析数据包后得到相关的关键信息。根据此类关键信息, 采用资源池化汇聚算法、优先调度算法和动态负载均衡算法, 修改相应的包头信息, 并把需要转发的数据包根据算法进行高效的动态负载均衡分发。同时, PPM 模块将处理后的数据帧发送给 PTM 模块, 并进行相应的数据信息统计。

PCI-E 模块接收其他模块传来的相关统计信息, 与软件系统中的相关驱动相配合, 提供分布式负载均衡网关架构的相关运行数据分析。

为保证数据流信息按照流水线并向多轨处理, 同时为了保证动态自适应, 需要硬件逻辑能对各类数据流信息进行并行识别存储。此情况下, 本文采用硬件资源的分布式存储, 使整体分布式负载均衡网关系统时钟得到合理优化, 提高数据信息流水线处理的吞吐率。

3.1 数据信息解析模块

PTM 模块主要负责处理不完整以太网数据帧与网关架构内部数据格式之间的转化及关键信息解析。在此过程中, PTM 模块可以提取出数据包中关键的数据信息以供后续功能模块对数据包进行相应的处理。如图 4 所示, 基于 PTM 模块的内部结构和外围接口情况, 可知 PTM 模块由 PTM0_FPGA, PTM1_FPGA 2 个核心子模块组成。2 个子模块分别负责网关系统中上行和下行数据流的相对应处理功能。

PTM0_FPGA 接收 10GE 模块传递过来的以太网数据帧, 为便于后续 PPM 模块对数据包的转发处理, 需要对数据信息格式进行相应的内部转化。根据数据包前面的自定义字段对数据包进行相应的转发处理, 把需要转发或复制的包分端口发送给相应的 PPM 模块。

PTM0_FPGA 模块的具体操作步骤为: a) 根据头部字段判断数据帧是否为 IP/TCP 数据包, 并根据各层包头的长度判断包格式是否为系统要求的格式; b) 提取数据包类型字段(3-BITS)和 USER ID 字段(77-BITS); c) 将提取的数据和原始数据包存放到 FIFO 中; d) 通过 FIFO 读取控制模块中的相关信息, 将提取的信息放到数据包的最前面, 如图 5 所示, 将数据包格式进行转化, 完成对数据包信息的提取及相应格式变化。

在数据包信息解析转化方面，PTM1_FPGA 和 PTM0_FPGA 是一组对偶操作。PTM1_FPGA 的主要功能是从 PPM 模块接收数据包，根据数据包前面的自定义字段对数据包进行相应的转发处理，把需要转发或者复制的包分端口发送给相应的 10GE 对应端口。

除此之外，PTM_FPGA 对进出 FPGA 的数据流分别进行统计，将统计信息上交 PCI-E 调试模块。

3.2 数据包信息处理模块

PPM 模块主要负责从数据流中提取出相应的数据包，并对数据包的包头信息进行相应的数据包信息处理。如图 4 所示，PPM 模块主要包含两部分：PPM_FPGA 和 PCI-E。PPM_FPGA 是 PPM 接口模块的核心。PPM_FPGA 主要负责依据 PTM 模块传递的有关信息，完成对数据包的分布式负载均衡转发处理。

PPM_FPGA 从 PTM 模块接收数据包，根据数据包类型及相关信息进行判断。依据负载均衡策略，根据该策略返回的结果进行相应的处理，将数据包头部分进行修改，把需要转发的包转发到相应的 PTM 模块接口中。PPM_FPGA 对进出 FPGA 的数据流分别进行统计，将统计信息上交 PCI-E 模块。

4 验证与分析

4.1 结构实现

对提出的分布式负载均衡架构进行相应的系统性验证，本文采用基于 Stratix IV 系列 XC7VX690tffg1761-1 FPGA 的硬件平台进行相应的硬件逻辑实现。其中，使用 Vivado 2015.1 进行逻辑综合、布局布线及时序分析、功能仿真。基于 Vivado 2015.1 的相关分析工具，分布式负载均衡网关架构相应的硬件资源占用如表 1 所示。

表 1 硬件资源占用

	Table1 Hardware resource occupation							
	XC7VX690tffg1761-1 FPGA							
	FF	LUT	memory LUT	I/O	BRAM	BUFG	MMCM	GT
available	866 400	433 200	174 200	850	1 470	32	20	45
estimation	18 577	19 274	368	20	60	8	1	10
utilization/%	2.14	4.45	0.21	2.35	4.08	25.00	5.00	22.22

4.2 测试方案

为了有效分析分布式负载均衡网关架构的性能，本文采用网关测试和系统测试相结合的测试方案。该测试方案的核心准则为：对分布式负载均衡网关架构的测试必须是在真实的数据中心网络环境下的真实性能表现。为此，本文采用专业的设备搭建相关测试环境，主要包括：4 个服务器组成服务器集群、1 个负载生成器、1 个数据流监视器和分布式负载均衡网关架构，详细参数如表 2 所示。其中，测试仪采用专业的第三方硬件测试平台 IXIA XM2。智能网关为搭载分布式负载均衡网关架构的 FPGA 硬件平台。

表 2 测试环境

	Table2 Test environment				
	name		performance		
	model	software	CPU	memory	storage
server	16 200	64 800	16 200	64 800	64 800/16 200
tester	IXIA XM2	Windows7 ultimate	Intel(R) Pentium(R)	2 GB	SATA 250 GB
gateway	smart-gateway	XC5VLX155T	XC3S2000	EP3C55U484C8	EP4SGX230

4.3 网关测试

分布式负载均衡网关架构的性能主要体现为数据信息吞吐率的大小。借助 IXIA 公司的标准网络测试工具，对本文提出的新型架构进行性能测试、分析及评估。

网关模块测试分为 3 个阶段：第一阶段：测试回环通路；第二阶段：48 h 压力测试；第三阶段：动态扩展性测试。其中，智能网关的重点测试内容为：针对不同速率的数据流测试保证不丢包的数据流极值，从而得出分布式负载均衡网关架构的最优性能。

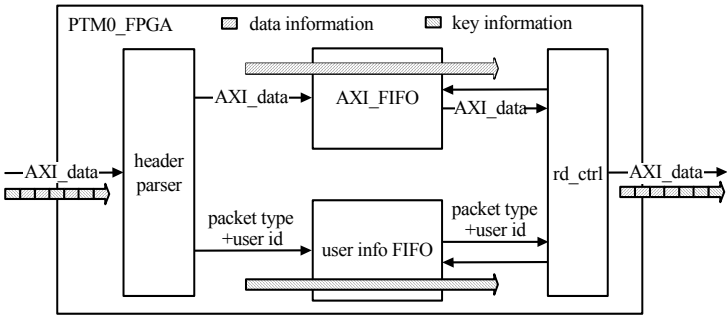


Fig.5 Architecture diagram of PTM0_FPGA
图 5 PTM0_FPGA 结构图

基于上述 3 个阶段的测试数据如图 6 所示,智能网关基于数据包信息的负载均衡,线速可达 9.4 Gbps(不丢包),10 Gbps 丢包率为 5%,端口时延为 2 μ s。

综上测试数据及分析,本文提出的面向数据中心网络的分布式负载均衡网关架构具有并向高效、动态自适应扩展性能强、数据信息吞吐率高等特点。

4.4 系统测试

基于相关测试环境,借助面对万物智慧互联背景下,高并发、低延时查询响应的场景,利用负载生成器模拟海量负载生成器,建立数百万并发连接和服务器,由智能网关进行分布式负载均衡分配,进行相应的系统性能负载测试。

基于高效的分布式负载平衡网关架构,可以测试响应时间以百万计的链接,如图 7 所示。当并发连接数为 160 万级别时,尾部延迟小于 60 ms。

基于以上系统测试可知,与通用的负载均衡方案(软件负载均衡与硬件负载均衡)相比,基于分布式负载均衡网关架构的智能网关基于数据包信息的负载均衡策略和智能池化的流量管理,保障了数据中心网络在面对百万级数据流连接时的高效、低时延响应。

5 结论

为了满足数据中心网络对高并发、低延时的性能需求,本文提出一种新型的分布式负载均衡网关架构。基于资源池化汇聚算法、优先调度算法和动态负载均衡算法,该新型网关架构不仅可以适应多并发、低时延的高效需求,而且便于硬件逻辑实现,进而可以有效满足数据中心网络对灵活性、通用性及稳定性的需求。网关测试和系统测试的相关数据及分析表明:a)与现有实现方法相比,该网关架构便于通过硬件逻辑完成高并发数据流,达到 10 Gbps 量级的数据信息吞吐量。b)通过动态自适应优化设计,该网关架构针对不同速率、不同种类的并发数据流,具备很强的通用性及动态自适应扩展能力。

参考文献:

- [1] LI Shancang,XU Lida,ZHAO Shanshan. 5G internet of things:a survey[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2018(10):1-9.
- [2] AKPAKWU G,SILVA B,HANCKE G P,et al. A survey on 5G networks for the internet of things:communication technologies and challenges[J]. IEEE Access, 2017,5(12):3619-3647.
- [3] CHENG Jiangfeng,XU Lida,CHEN Weihai,et al. Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2018(10):10-19.
- [4] BAHARI H I,SHARIFF S S M. Review on data center issues and challenges:towards the Green Data Center[C]// 2016 6th IEEE International Conference on Control System,Computing and Engineering. Batu Ferringhi,Malaysia:IEEE, 2017.
- [5] OKAFOR K C,ACHUMBA I E,CHUKWUDEBE G A,et al. Leveraging fog computing for scalable IoT data center using spine-leaf network topology[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2017:1-11.
- [6] LI Xiaomin,LI Di,WAN Jiafu,et al. Adaptive transmission optimization in SDN-based industrial internet of things with edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018,5(3):1351-1360.
- [7] GHORBANI S,YANG Z B,BRIGHTEN G,et al. DRILL:Micro load balancing for low-latency data center networks[C]// Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. [S.l.]:ACM, 2017.

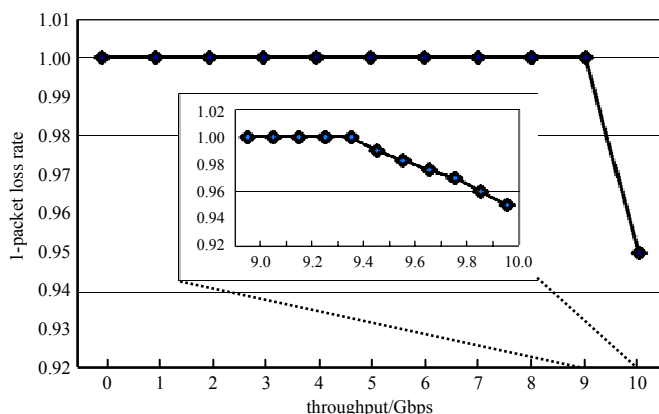


Fig.6 Test of smart-gateway
图 6 智能网关性能测试

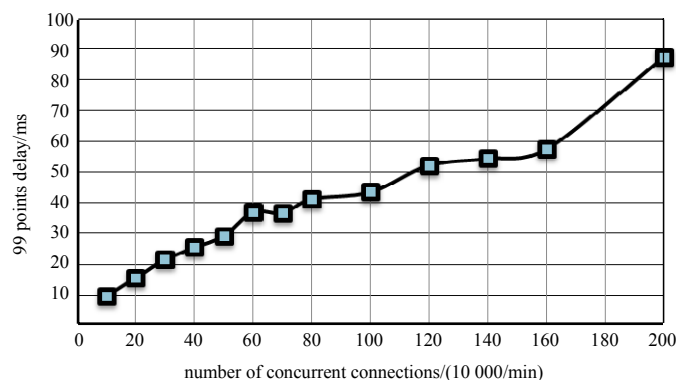


Fig.7 System test of gateway
图 7 网关系统测试

- [8] SHAFIEE M, GHADERI G. A simple congestion-aware algorithm for load balancing in data center networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(6): 3670–3682.
- [9] MAZUMDAR S, SCIONTI A, KUMAR A S. Adaptive resource allocation for load balancing in cloud[M]// ANTONOPOULOS N, GILLAM L. Cloud computing: principles, systems and applications. [S.l.]: Springer International Publishing, 2017: 301–327.
- [10] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401–1407.
- [11] ALIZADEH M, EDSALL T, DHARMAPURIKAR S, et al. CONGA: Distributed congestion-aware load balancing for data centers[C]// Proceedings of the 2014 ACM Conference on SIGCOMM. Chicago, Illinois, USA: ACM, 2014: 503–514.
- [12] JIANG Y. A survey of task allocation and load balancing in distributed systems[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2016, 27(2): 585–599.
- [13] LEE Jeongkeun, MIAO Rui, KIM Changhoon, et al. Stateful layer-4 load balancing in switching ASICs[C]// Proceedings of the SIGCOMM Posters and Demos. Los Angeles, CA, USA: ACM, 2017: 133–135.
- [14] HASSEN F, MHAMDI L. Congestion-aware multistage packet-switch architecture for data center networks[C]// 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Washington, DC, USA: IEEE, 2016: 1–7.
- [15] 兰亚柱, 杨海钢, 林郁. 标准低密度奇偶校验码译码算法中量化结构[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(4): 584–589. (LAN Yazhu, YANG Haigang, LIN Yu. Design of quantitative structure of LDPC decoded algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(4): 584–589.)
- [16] CASELLE M, ARDILA PEREZ L E, CHILINGARYAN S, et al. High-speed low-latency readout system with real time trigger based on GPUs[C]// Real Time Conference. [S.l.]: IEEE, 2016: 1–3.
- [17] CAULFIELD A M, CHUNG E S, PUTNAM A, et al. A cloud-scale acceleration architecture[C]// 2016 49th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO). Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2016: 1–13.
- [18] QU Y R, PRASANNA V K. Fast online set intersection for network processing on FPGA[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2016, 27(11): 3214–3225.
- [19] LI B, TAN K, LUO L L, et al. ClickNP: Highly flexible and high-performance network processing with reconfigurable hardware[C]// Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference. Florianopolis, Brazil: ACM, 2016: 1–14.

作者简介:



兰亚柱(1983–), 男, 山西省临汾市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为大规模集成电路 IP 化技术、信道编码技术、计算机体系结构、高性能路由器及可重构技术、异构加速引擎设计. email: lanyazhu@163.com.

孙征征(1994–), 男, 山东省人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 FPGA 结构、高性能计算.

梁冬(1989–), 女, 河南省人, 高级工程师, 主要研究方向为大数据分析、算法建模.