

国产化混合云平台建设与性能优化的研究

徐 扬, 张 静, 尚真真, 赵宇帆

(中国电子科技集团有限公司 第 15 研究所, 北京 100083)

摘要: 为了验证实时性业务迁移至国产化混合云平台的可行性, 采用国产化主机、虚拟化云平台软件、容器化云平台软件搭建混合云平台, 对时统和组播两个具有代表性的实时业务模型迁移进行了研究; 为了保证混合云平台测试范畴的完整性, 硬件普适性, 实验设计了 4 种混合云模式, 并适配两个品牌主机, 对时统和组播两个业务模型按照组合方式进行了 8 个云模型的迁移实践; 实验针对不同混合云模式综合采用了软件和硬件调优技术, 达到了同时满足时统业务模型满足时延不大于 8 ms 和组播业务模型满足数据包丢包率不大于 10^{-6} 个/s 的两个性能指标; 得出时敏性业务可以迁移到国产化混合云平台的结论, 并通过分析混合云 4 种模式优劣势, 对时敏性业务和通用业务的云平台部署模式提供了决策支持。

关键词: 混合云; 云平台; 国产化; 性能调优

Research on Construction and Real-time Performance Tuning of Domestic Hybrid-cloud Platform

XU Yang, ZHANG Jing, SHANG Zhenzhen, ZHAO Yufan

(15th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to verify the feasibility of migrating real-time application to domestic hybrid-cloud platform, the domestic server, virtualized cloud platform, and containerized cloud platform used to establish a domestic hybrid-cloud platform, and investigate the migration of two representative real-time simulation models, namely the time synchronization and data packet multicasting; In order to ensure the completeness of test and universality of hardware in the hybrid-cloud platform, the experiment with four types of hybrid-cloud mode and two brands of server are designed to migrate both the time synchronization and data packet multicasting onto eight kinds of hybrid-cloud scenarios; The software and hardware optimized techniques are used to integrate different hybrid-cloud models, which meets both performance indicators simultaneously, its time synchronization is not greater than 8 ms and data packet losing rate is not greater than 10^{-6} /s; As a result, the experiment not only proves that the real-time application can be migrated to domestic hybrid-cloud platform, but also analyzes the advantages and disadvantages for four types of hybrid-cloud modes, it provides a support for the cloud platform deployment of time sensitive or general business applications.

Keywords: hybrid-cloud; cloud platform; domestication; performance tuning

0 引言

混合云平台搭建实践的有两个: 1) 适配验证使用全栈国产化软硬件产品构建混合云平台的可行性; 2) 验证时敏性业务迁移到国产化混合云平台的可行性, 研究针对 4 种混合云模式, 即“物理机”“物理机+容器”“物理机+虚拟机”“物理机+虚拟机+容器”, 探索并综合使用多种调优技术, 以达到提高云平台实时性的目的^[1-2]。目前, 使用全栈国产化软硬件产品搭建混合云平台比较普遍, 但是鉴于迁移工作量大、难度高, 严格将业务运行在国产化虚拟机操作系统, 或者经容器服务化后仍旧运行在国产化操作系统上便具有较大的挑战性, 加之满足时敏性业务的高吞吐、低延时的指标要求, 与同类研究相比, 验证过程积累的针对提高国产化云平台实时性的实战经验与成果更具

突破性和借鉴意义^[3-5]。

1 混合云平台的结构及原理

云平台可以解释为云计算平台, 是可以提供计算服务、网络服务和存储服务的平台。与传统的计算机系统平台不同, 云平台将数据中心中的计算资源、网络资源、存储资源先进行池化, 然后再以服务的方式提供给最终用户^[6]。云平台不仅融合异构服务器、异构网络设备和异构磁盘阵列, 还打破地域的限制使得最终用户可以在全球各地, 使用各种终端, 借助多种网络通信技术, 随时访问自己想要的信息。而混合云平台则在此基础上, 融合多种资源池化技术形成的云, 例如: “物理云”“虚拟云”“容器云”, 灵活部署在一个云平台上, 统一向用户提供云服务^[7-8]。混合云平台使用多种池化技术的目的, 是为了提高云服务的能

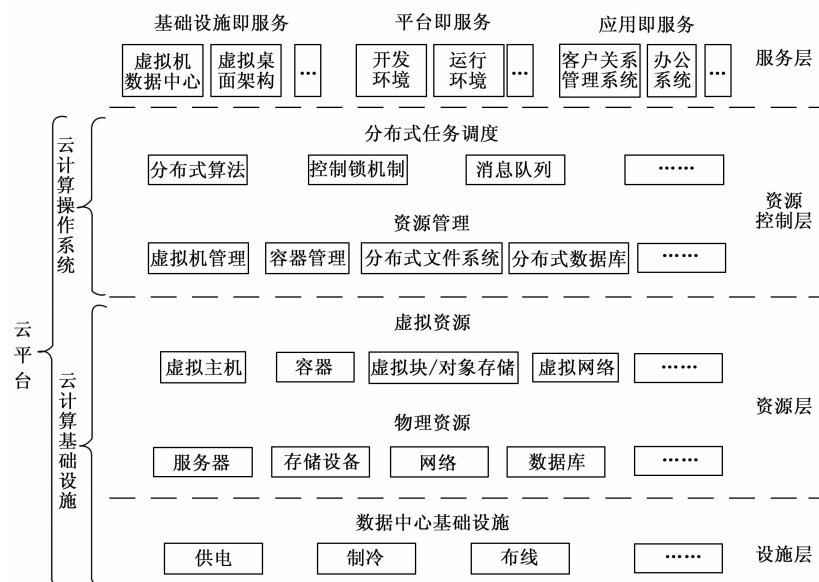
收稿日期: 2023-06-06; 修回日期: 2023-06-13。

作者简介: 徐 扬(1974-), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 徐 扬, 张 静, 尚真真, 等. 国产化混合云平台建设与性能优化的研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(2): 244-249, 255.

力, 不同云适用于不同类型的应用, 比如并发量高类型、复杂分析类型和综合类型。其中综合类型应用是本次搭建云平台进行迁移上云的验证对象, 这种类型应用既要求非常高的实时性, 又有较大的数据吞吐量负载^[9-11]。

本次实验搭建的云平台技术架构如图 1 所示。



云平台技术架构由“云计算基础设施”层和“云计算操作系统”层组成, 前者实现硬件资源的池化, 后者实现池化后虚拟资源的管理, 并为迁移至混合云平台的应用提供“云操作系统”。这两层也是在本实验中国产化的关键技术攻关重点^[12]。

在搭建国产化混合云平台时, 服务器选用基于进阶精简指令集 (ARM, advanced risk machine) 技术的处理器, 资源虚拟化选用基于内核的虚拟机 (KVM, kernel-based virtual machine) 和 OpenStack 的云平台, 应用服务化选用基于 Docker 和 Kubernetes 的容器云平台、“云操作系统”及宿主机操作系统均选用基于 Linux 内核的服务器版等使用国内主流软硬件开源技术研制的产品, 且为较成熟、有一定市场占有率的国产品牌^[13-14]。

为提升基于国产化混合云平台数据实时传输性能, 解决时统应用要求延时不大于 8 ms, 组播应用丢包率 (含数据包乱序情况) 要求不大于 10^{-6} 个/s 的不达标问题, 提出了一种基于混合云平台的数据实时处理方法。主要从以下 3 个方面考虑:

1) 实时性。在虚拟机和容器中综合使用了基于直接内存访问 (DMA, direct memory access) 和系统内存管理单元 (SMMU, system memory management unit) 的内存地址映射透传技术, 实现网卡和时统卡等外部设备不通过处理器而直接与虚拟机或者容器内的系统内存交换数据, 从而缩短网口传输数据的等待时间和时统卡延时, 提高数据访问实时性。

2) 稳定性。在虚拟机和容器的云资源管理平台上, 使用绑核技术, 即时敏性业务所在的虚拟机或者容器可以独占处理器 (CPU, computer processor unit) 资源, 实现核调度策略的自主可控, 优化云资源管理的调度机制, 提高时敏性等关键业务的稳定性^[15-16]。

3) 高带宽。首先在网卡上应用单根虚拟化 (SR-IOV, single root-input/output virtualization) 技术, 实现网卡虚拟化由物理网卡自行实现, 而不是依赖其他虚拟化技术实现。SR-IOV 通过让每个虚拟网口都具有固化在网卡上的独立数据缓存空间、中断、内存直接访问数据流, 且不需要虚拟化管理程序 (比如虚拟化技术的中间层) 的协调干预, 实现大幅提升网络吞吐性能。其次应用 MAC 虚拟网卡 (MACVLAN, MAC virtualization) 技术, 实现当在同一块以太网卡虚拟出来的虚拟网口之间进行数据传输时, 不需要先将数据经由这块物理以太网卡传输到外部的交换机, 再由交换机传回到这块物理以太网卡才能送至指定的目标虚拟网口, 而是在这块物理以太网卡内部完成数据的传送。SR-IOV 明显提高同一个物理机内, 不同虚拟机或者容器之间的数据传输速度, 达到缩短延迟的目的^[17-18]。

2 混合云平台硬件设计

2.1 混合云平台硬件环境架构

2.1.1 硬件环境

1) 服务器 A: 7 台, 64 颗飞腾 2000+, 256 GB 内存, 10 G 光纤网卡;

2) 服务器 B: 5 台, 64 颗飞腾 2000+, 256 GB 内存, 1 000 MBaseT 网卡;

3) 交换机: 千兆交换机 4 台和万兆交换机 1 台。网络设备、服务器和访问终端部署如图 2 所示。

其中:

1) “汇聚交换机”实现跨网段访问;

2) “终端接入交换机”提供外接终端访问后端服务器的网段 192.168.2X.X;

3) “核心/业务交换机”提供万兆业务网段 192.168.4X.X;

4) “管理交换机”提供管理网段 192.168.2Y.X;

5) “业务 01 交换机”通过 VLAN 功能提供业务网段 192.168.3X.X 和 192.168.4X.X;

6) “服务器 A 万兆”分别与“核心/业务交换机”“管理交换机”相连, 实现测控业务运行在万兆 192.168.4X.X 网段, 日常管理运行在 192.168.2Y.X 网段;

7) “服务器 B 千兆”分别与“业务 01 交换机”“管理交换机”相连, 实现测控业务运行在 192.168.3X.X 网段, 日常管理运行在 192.168.2Y.X 网段;

8) “服务器 C 千兆”分别与“业务 01 交换机”“管理

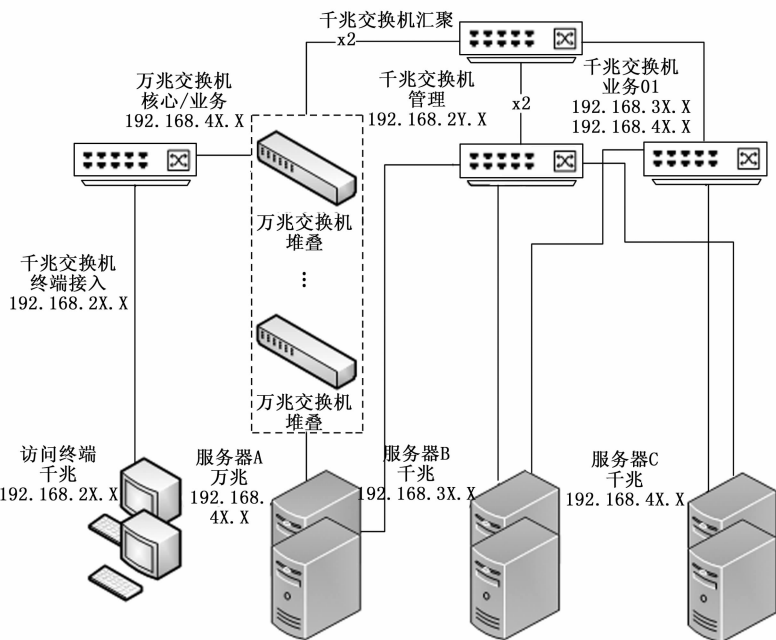


图 2 云平台硬件环境结构图

交换机”相连，实现测控业务运行在 192.168.4X.X 网段，日常管理运行在 192.168.2Y.X 网段；

9) “访问终端”通过 192.168.2X.X 网段，经由“终端接入交换机”“核心/业务交换机”和“汇聚交换机”访问接入各个网段的后端服务器。

2.1.2 操作系统

目前 4 种模型在使用不同的优化措施的前提下，全部通过适配验证。每种模型的操作系统配置如下：

- 1) “物理机”：LINUX 实时操作系统；
- 2) 其他 3 种模型“物理机+虚拟机”“物理机+容器”和“物理机+虚拟机+容器”，LINUX 非实时操作系统。

4 种模型的软件版本为：

- 1) 固件：最新版本；
- 2) 操作系统：LINUX 非实时服务器版操作系统，“物理机”模型使用实时服务器版操作系统，虚拟云专用服务器版操作系统（部署虚拟机的宿主机器）。

2.2 混合云平台性能硬件调优技术

验证前针对在混合云平台上部署组播、时统这类敏感性应用做了大量的调研工作，经过讨论，将实时性能指标定为时统应用延时不大于 8 ms，组播应用丢包率（含数据包乱序数量）不大于 10^{-6} 个/s，在硬件层面主要应用以下两种关键技术：

1) 外部设备透传技术，即物理机和虚拟机分别支持 DMA 和 SMMU 技术。

外部设备透传技术是指输入/输出设备（如网卡、时统卡）与总线之间的地址转换桥，实现直接内存存取。基于国产化处理器飞腾是 ARM 服务器架构不同于基于英特尔 X86 架构的服务器，在虚拟机中的网卡和时统卡应用 DMA

时，服务器必须嵌入系统内存管理单元 SMMU，并且需要上层的虚拟化技术（如 KVM）支持才能提高虚拟机中虚拟网卡传输速度以及缩短时统卡的延时。DMA 与 SMMU 协同工作的原理描述如下：

(1) DMA 提供网卡和时统卡等外部设备不通过 CPU 干预而直接与系统内存交换数据的接口。外设可以通过调用 DMA 接口，将数据批量直接保存到内存的指定地址，然后再发送一个中断通知 CPU 读取并处理。整个传输存储过程不占用 CPU 时间片，不但可以及时启动数据传输过程，而且减少 CPU 为了等待数据传输而产生的空闲时间，提高了 CPU 使用率^[19]。

(2) 在虚拟化场景中（如图 3 所示），所有的虚拟机都运行在中间层上，每个虚拟机访问的内存地址是虚拟机内存的物理地址，并非实际的物理地址（即宿主机的内存物理地址），导致虚拟机无法正常地将连续的物理地址分给外部设备使用。

因此，引入了系统内存管理单元 SMMU 解决上述问题，支持基于 ARM 架构的飞腾处理器

实现虚拟化扩展。它提供 3 种阶段的内存地址转换：阶段 1 是转换虚拟地址到物理内存地址，阶段 2 是转换虚拟内存地址到中间内存物理地址，或者（阶段 1+阶段 2）转换虚拟内存地址到中间内存物理地址再到物理内存地址^[20-21]。

2) 外部设备支持 SR-IOV 技术：SR-IOV 技术是一种基于硬件的虚拟化解决方案，可以提高性能和伸缩性。SR-IOV 标准将一个快速外设组件互连（PCIe，peripheral component interconnect express）的网络控制器虚拟化成多个 PCIe 设备，并且每个虚拟化设备可以直接分配给一个虚拟机，允许在虚拟机之间高效共享一个 PCIe 设备。由于这个虚拟化过程是在硬件中实现的，可以获得能够与本机性能媲美的 I/O 性能。根据该标准创建的新设备可允许将虚拟机直接连接到 I/O 设备，越过了虚拟化（KVM）的中间层和虚拟交换机层，带来低延迟和接近线缆的速度，非常适用于对延迟敏感的组播应用。单个 PCIe 资源启用 SR-IOV 后可供许多虚拟机共享，每个虚拟化后的设备为所属虚拟机提供独立的内存空间、中断以及 DMA 流，并且还使用共享的通用资源（例如以太网端口）。这样，每个虚拟机都可

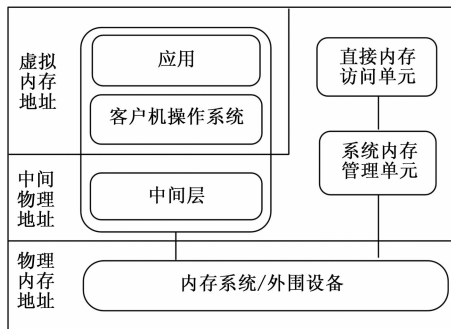


图 3 虚拟化场景

访问唯一的资源, 不需要虚拟化管理程序 (比如虚拟化技术 KVM 的中间层或者容器化技术的 Docker 等) 的协调干预, 从而大幅提升网络吞吐性能。

使用 SR-IOV 需要满足以下条件:

- 1) 处理器需要支持系统内存管理单元;
- 2) 固件需要支持系统内存管理单元;
- 3) 处理器根桥需要支持访问控制服务或者等价特性;
- 4) PCIe 设备需要支持访问控制服务或者等价特性, 否则只能分配给 1 台虚拟机。

在实践验证过程中, 为了应用上述两项技术, 除了在硬件层中选用支持 DMA 和 SMMU 的 CPU 飞腾 2000+, 遵循 SR-IOV 标准的网卡和时统卡; 在软件层对服务器固件、操作系统和虚拟化云平台相关参数进行调试, 并改进时统卡驱动程序以实现其中断越过 KVM 中间层直达虚拟机。因此外部设备透传技术和 SR-IOV 技术尽管隶属于硬件技术, 也需要软件配合才能成功启用, 达到云计算基础设施层降低延时、提高吞吐量的目的。

3 混合云平台软件设计

3.1 混合云平台软件配置

实践验证的混合云平台软件配置如下:

- 1) 虚拟化平台: 基于 KVM 开源虚拟化技术框架;
- 2) 容器云平台: 基于 Docker 开源服务化技术框架;
- 3) 验证工具以及应用: “物理机” “物理机+虚拟机” “物理机+容器” 和 “物理机+虚拟机+容器” 4 种模型支持实时业务运行的验证环境, 运用业务组提供的时统测试程序和组播测试程序作为验证工具模拟真实应用场景、实时监控执行状态、采集测试数据形成验证报告。

3.2 混合云平台软件性能调优技术

经过反复实践验证, 软件层面主要应用以下 3 种关键技术:

1) 虚拟机绑核, 即物理处理器与虚拟处理器固定绑核: 虚拟机绑核基于 KVM 虚拟化技术, 当虚拟机中对单颗 CPU 进行虚拟化形成的逻辑处理器 (vCPU, virtualized-CPU) 数量不是很多时, 可以通过将 vCPU 与指定的 CPU 绑定的方式提高虚拟机性能。基于 KVM 虚拟出来的虚拟机不仅运行在指定的单个或者多个 vCPU 上, 并且独占指定的 CPU 资源, 规避了与其他虚拟机共享 CPU 计算资源, 减少 KVM 调度 CPU 时间片带来的时间耗费, 达到提高虚拟机性能的目的。因此, 虚拟机绑核技术是操作系统级的性能调优技术。

2) MACVLAN 技术: MACVLAN 提供了网卡链路层的虚拟化抽象, 与 SR-IOV 和容器技术结合后, 可以明显提高使用同一块以太网卡虚拟出来的虚拟网口的虚拟机或者容器之间数据传输的速度, 适用于提高组播应用的性能。

基于这种技术虚拟化形成的网口拥有 4 种模式: 桥接模式、虚拟以太网口聚合模式、私有模式和透传模式。

容器云采用的是桥接模式如图 4 所示, 实现了当在同一块以太网卡虚拟出来的虚拟网口之间进行数据传输时,

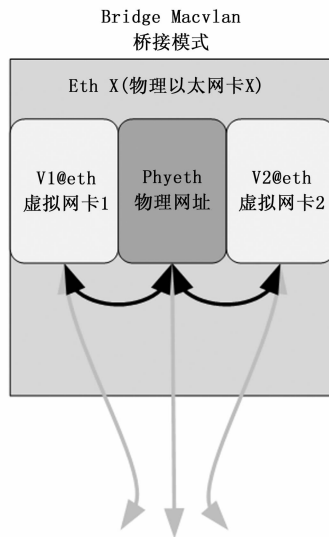


图 4 MACVLAN 桥接模式

不需要先将数据经由这块物理以太网卡传输到外部的交换机, 再由交换机传回到这块物理以太网卡才能送至指定的目标虚拟网口, 而是在这块物理以太网卡内部完成数据从源虚拟网口到目标虚拟网口的传送, 达到缩短延迟的目的。

3) 容器资源绑定技术, 即容器与 CPU、内存固定绑定: 容器资源绑定技术与虚拟机的绑核技术类似, 将容器与 CPU、内存资源进行捆绑, 容器被设置运行在指定的 CPU 或 vCPU 上、使用指定的内存空间, 避免与其他多个容器竞争计算资源。为了充分发挥基于 ARM 架构的处理器性能, 通常使用非均匀内存访问 (NUMA, none-uniform memory access) 架构加快 CPU 访问内存的速度。在 NUMA 架构中, CPU 访问本地内存的速度比非本地内存 (即通过 NUMA 总线, 跳转到其他 CPU 的本地内存) 明显快一些。NUMA 架构通常采用环形总线, 鉴于同一时刻只能一颗 CPU 占用总线, CPU 需要得到 Token 令牌才允许占用总线传输数据, 数据传输结束后释放 Token。在频繁访问非本地内存的情况下, CPU 会因等待 Token 令牌而造成内存读写延时。通过容器化技术, 将 CPU 与本地内存固定捆绑, 形成相对独立的运行环境, 为实时性业务提供独占的计算资源。容器资源绑定技术相对虚拟机绑核而言, 是进程级调优技术。

4 实验结果与分析

4.1 实验步骤和方法

支撑实时业务的混合云平台测试目标应满足以下指标要求:

- 1) 时统业务延时 < 8 ms, 并持续运行 48 h;
- 2) 组播业务丢包率 $< 10^{-6}$ 个/s, 并持续运行 48 h;
- 3) 云平台在硬件层面具备普适性, 即两个品牌的服务器均支持;
- 4) 云平台在软件层面具备版本一致性, 即固件、操作系统 (含内核) 版本统一。

实验按照从低到高分层适配的原则，采取递进式测试方法推进。从低到高的层级为：硬件、操作系统、虚拟机、容器和业务应用，性能优化技术在每个层级上的验证路径如图 5 所示。实验步骤如下：

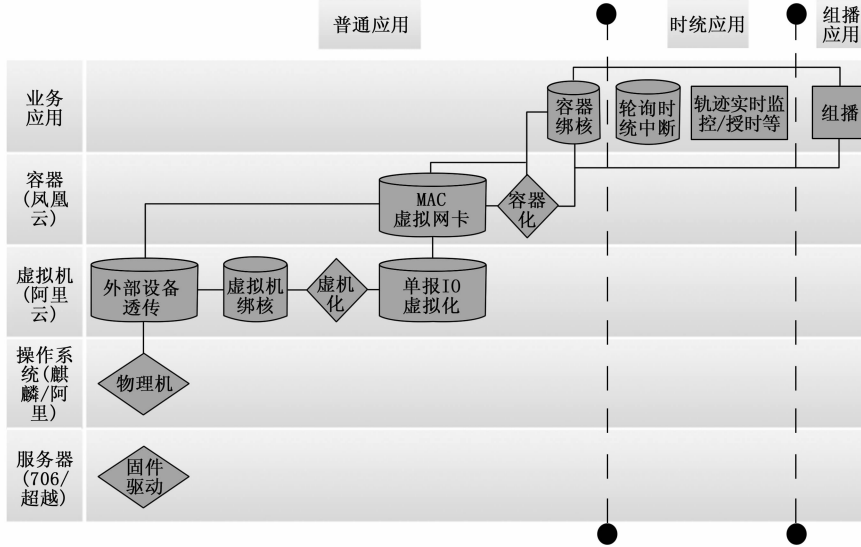


图 5 混合云平台性能优化技术路径

表 1 8 个混合云测试模型关键软硬件配置

服务器	物理机	物理机+容器	物理机+虚拟机	物理机+虚拟机+容器
厂商 A	Linux 实时版 时统卡驱动 标配万兆网卡	Linux 企业版 容器云 时统卡驱动 标配万兆网卡	宿主机 Linux 企业版 虚拟机 Linux 企业版 虚拟云 时统卡驱动 新飞腾 万兆网卡	宿主机 Linux 企业版 虚拟机 Linux 企业版 虚拟云 容器云 时统卡驱动新飞腾 万兆网卡
品牌 B	Linux 实时版 时统卡驱动 标配千兆网卡	Linux 企业版 容器云 时统卡驱动 标配千兆网卡	宿主机虚拟云专用系统 虚拟机 Linux 企业版 虚拟云 时统卡驱动(新) 千兆网卡	宿主机虚拟云专用系统 虚拟机 Linux 企业版 虚拟云 容器云 时统卡驱动(新) 千兆网卡

- 1) 排查硬件故障，保证主机、交换机、网线等硬件要素的正常工作；
- 2) 在两个品牌服务器上分别按照“物理机”“物理机+虚拟机”“物理机+容器”和“物理机+虚拟机+容器”顺序搭建混合云平台模式；
- 3) 在每个混合云平台模式上单独测试组播业务模拟程序

序和时统业务模拟程序；

- 4) 在每个混合云平台模式上组合测试组播业务模拟程序和时统业务模拟程序。

按照上述步骤开展实验可以提高排查效率，快速锁定故障点所在的层级，进而对该层级的调优技术执行有针对性的修正。

实验模拟实时业务场景如图 6 所示，部署 3 个业务节点 A、B 和 C。节点 A 模拟组播发包业务，节点 B 模拟组播同时接收与发送业务，节点 C 配置时统卡模拟时统和组播接收业务。组播吞吐量为单路 680 Mbps，验证时模拟组播业务峰值情况，即节点 A 并发 30 路，节点 B 接收 30 路的同时发送 30 路，节点 C 接收 30 路。

在测试过程中对上述场景测试了多个用例，这些用例覆盖了两个品牌服务器，4 个混合云模式，共 8 个混合云测试模型，其关键软硬件配置描述如表 1 所示。

4.2 实验数据

经过应用上述 5 种软硬件调优技术，8 个混合云模型的测试结果均满足指标要求，监测结果示例如图 7 所示。

3 个节点均在同一网段

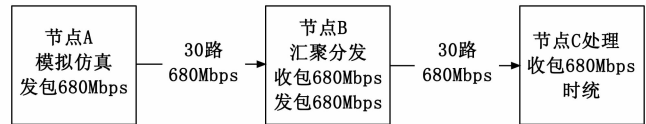
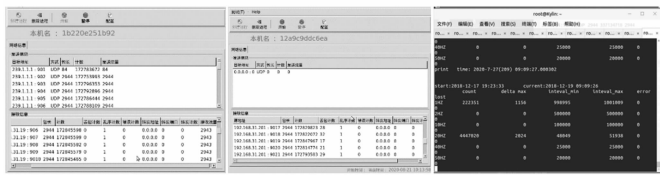


图 6 模拟实时业务场景



(a) 节点B组播收发数据 (b) 节点C组播接收数据 (c) 节点C时统延时数据

图 7 监测结果示例

实验数据总结如表 2 所示。

表 2 实验数据总结

类别	物理机	物理机+容器	物理机+虚拟机	物理机+虚拟机+容器
时统 (延时)	1 Hz: ≈1 ms	1 Hz: ≈1 ms	1 Hz: ≈1 ms	1 Hz: ≈1 ms
	20 Hz: ≈1 ms	20 Hz: ≈2 ms	20 Hz: ≈1 ms	20 Hz: ≈4 ms
组播 (丢包率)	收发: ≈0	收发: ≈0	收发: ≈ 5.2E-07	收发: ≈0
	单收: ≈0	单收: ≈0	单收: ≈ 4.6E-07	单收: ≈ 5.8E-07

4.3 实验结果与分析

可以看出“物理机”和“物理机+容器”两种模式的测试结果优于其他两种模式,而且4种模式都满足实时性能指标要求且优于指标要求,得出时敏性业务可以迁移上国产化混合云平台的结论。

通过分析得出4个混合云模型的优劣势如表3所示。

表3 混合云模型优劣势

	物理机	物理机+容器	物理机+虚拟机	物理机+虚拟机+容器
优势	架构成熟	架构先进	架构较成熟、较先进	架构先进
	固件版本、OS版本均为发布版	资源利用充分	资源利用充分	资源利用充分
	服务器均支持	服务器均支持	自带云管平台实现统一管理	支持弹性(动态)扩展
	支持传统业务软件架构	支持弹性(动态)扩展	支持传统业务软件架构	支持集群高可靠性(秒级)
劣势	资源利用不充分	固件版本、OS版本均为非工程化版	固件版本、OS版本均为非工程化版	固件版本、OS版本均为非工程化版
	高可靠性依赖应用实现	高可靠性不支持毫秒级切换	服务器有限支持宿主机操作系统不同	服务器有限支持宿主机操作系统不同
	不支持弹性(动态)扩展	业务软件需要容器化	由于绑核,不支持弹性(动态)扩展	高可靠性不支持毫秒级切换
	依赖第三方平台进行管理	实施规划难度加大(二层规划)	由于绑核,原集群高可靠性受限	业务软件需要容器化
		需要额外资源部署云管节点	由于性能要求高,必须支持透传,时统卡只能运行一个进程,需要软件应用相应调整	实施规划难度最大(三层规划)
			需要额外资源部署云管节点	需要额外资源部署两种云管节点
			虚拟化层对资源产生一定的耗损	虚拟化层对资源产生一定的耗损

5 结束语

综上所述,实践共验证8个混合云测试模型。这些场景为了达到用户业务实时性的要求,多多少少都需要优化,

比如:调整系统参数,CPU的绑核,容器的绑核、时统卡驱动优化等,对原有云平台的功能会有以下影响:

1)造成了虚拟云的集群高可靠性使用受限。例如:经过CPU绑核后,虚拟机无法迁移而只能依赖容器的集群实现高可用。当一个容器发生故障时,容器集群会在另外一个指定的虚拟机上启动这个容器。承载这个容器的目标虚拟机必须预先绑核而且绑核的数量需与源虚拟机一致,才能在保证性能的前提下实现高可用;

2)对业务应用开发的影响。由于飞腾FT2000+不支持时统卡的中断透传到虚拟层,导致时统业务应用在虚拟机里运行的性能无法达到时延要求。经改进该卡的驱动后虽然满足了性能要求,但是在一个虚拟机中只能运行一个时统业务进程,因此需要软件研发人员做相应调整。

3)对云平台稳定性的影响。目前参加验证的固件、内核的版本,除了“物理机”模型,其他模型的操作系统,如LINUX和虚拟化专用操作系统,均为内测版,固件也是为此验证实践而专门研发的非工程化版本。

4)若需要将实验验证中的性能调优技术大规模推广,需要产品定制化程序。实验中优化相关的步骤大部分是专家现场调配,并未经过反复重现与定型,暂未形成体系化标准化的操作手册或者可发布产品版本。如果实施大规模统一部署,需要服务器厂商进一步固化版本,生成补丁。

参考文献:

- [1] 李娟. 基于Hadoop云平台的空间属性数据挖掘技术研究[J]. 南京理工大学学报, 2022, 46(4): 419-426.
- [2] 叶鑫, 董路安, 宋禹. 基于大数据与知识的“互联网+政务服务”云平台的构建与服务策略研究[J]. 情报杂志, 2018, 37(2): 154-160.
- [3] 周栋. 信创混合云管理平台的设计与实现[J]. 信息系统工程, 2022, 339(3): 52-55.
- [4] 陈智明, 张驰俊, 蔡上, 等. 混合云架构下的云安全最佳实践[J]. 信息技术与信息化, 2022, 263(2): 172-176.
- [5] 李学俊, 吴洋, 刘晓, 等. 混合云中面向数据中心的工作流数据布局方法[J]. 软件学报, 2016, 27(7): 1861-1875.
- [6] 陈天, 陈楠, 黄志兰, 等. 基于OpenStack的异构混合云解决方案[J]. 电信科学, 2015, 31(7): 138-144.
- [7] 陈天, 樊勇兵, 赖培源, 等. 混合云技术架构及应用研究[J]. 电信科学, 2014, 30(s2): 89-97.
- [8] 朱荣鑫. Spring Cloud微服务架构进阶[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [9] 杨保华. Docker技术入门与实战[M]. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [10] 刘俊海. Service Mesh微服务架构设计[M]. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [11] MELL P. The NIST definition of cloud computing[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(6): 1.
- [12] Stamford, Conn. 云计算技术程度曲线报告[N]. 美国: 调研机构Gartner, 2022: 1-2.

(下转第255页)