

基于哈希图的虚拟机实时迁移方法

田俊峰* 屈雪晴 何欣枫 李珍

(河北大学网络空间安全与计算机学院 保定 071002)

摘要: 跨广域网的虚拟机实时迁移是多数据中心云计算环境的重要技术支撑。当前跨广域网的虚拟机实时迁移受到带宽小和无共享存储的限制而面临着技术挑战,如镜像数据迁移的安全性和一致性问题。为此,该文提出基于哈希图(HashGraph)的跨数据中心虚拟机实时迁移方法,运用去中心化的思想,实现数据中心之间可靠和高效的镜像信息分布式共享。通过HashGraph中Merkle DAG存储结构,改善了重复数据删除在跨数据中心迁移虚拟机镜像时的缺陷。与现有方法相比,该文方法缩短了总迁移时间。

关键词: 云计算; 虚拟机实时迁移; 跨数据中心; 哈希图; 重复数据删除; 3层镜像结构

中图分类号: TP302

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)03-0712-08

DOI: 10.11999/JEIT190200

The Method of Virtual Machine Live Migration Based on HashGraph

TIAN Junfeng QU Xueqing HE Xinfeng LI Zhen

(School of Cyber Security and Computer, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: Live migration of Virtual Machines (VMs) across WANs is an important support for multi-datacenter cloud computing environments. The current live migration of VMs across WANs faces many technical challenges due to the limitations of small bandwidth and no shared storage, such as ensuring the security and consistency of image data migration. Therefore, a method for VM live migration across data centers based on HashGraph is proposed in this paper, decentralized ideas are used to achieve reliable and efficient image distribution between data centers. The Merkle DAG of HashGraph improves the deficiencies of deduplication when migrating images across data centers. Compared with existing methods, it can reduce total migration time.

Key words: Cloud computing; Virtual Machine (VM) live migration; Across data center; HashGraph; Data duplication; Three-layer image structure

1 引言

随着云计算技术和应用的不断发展,学术界和业界越来越关注如何联合多个云提供商共同提供服务来保证服务的高可用性。为了节省云服务商的能源成本,推动云提供商之间的互相合作以解决个别数据中心的固有缺陷,使运行多个数据中心的云提供商实现高效的跨平台管理,多云环境下跨数据中心进行实时迁移虚拟机的需求日益增加。相较于单数据中心的虚拟机迁移,跨数据中心的虚拟机迁移不存在共享存储系统,因此在迁移过程中不仅要迁移内存数据,还要迁移虚拟机镜像、设备镜像、配

置文件等。镜像文件通常数十GB大小,这种大规模数据传输的效率受到网络体系结构的异构性、间歇性以及低带宽链路的影响,会严重依赖于网络性能。在网络拥挤的情况下,镜像文件在传输过程中可能会存在数据丢失等问题。因此如何保证存储数据完整并且高效地迁移成为当前该领域亟待解决的关键问题。

自文献[1]提出虚拟机实时迁移的概念之后,对此的研究就不断进展。文献[2-4]利用动态DNS和搭建IP隧道,提高了网络链路的利用率并缩短迁移时间和停机时间。但每次虚拟机迁移都需要重新搭建高速链路,占用了大量计算资源,给宿主机带来负担,因此实用性不高。Yang等人[5]将VM基本镜像和快照的任务外包到目标服务器的备份服务器,减少了迁移时间并提高了源服务器VM的性能,但大量快照的存储占用较大的存储空间,需要过多的硬件资源。Mugisha等人[6]提出基于纠删码的可靠多

收稿日期: 2019-03-29; 改回日期: 2019-08-04; 网络出版: 2019-08-26

*通信作者: 田俊峰 tjf@hbu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61802106)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61802106)

云存储架构, 利用较少的存储成本保证丢失数据的可恢复性, 然而纠错码的计算成本较高, 影响了镜像传输效率。Riteau等人^[7]首次提出了基于内容寻址的方式提高虚拟机迁移的效率, 然而他们的工作仅将此思想应用在静态迁移过程中。Riteau等人^[8]还实现了基于分布式内容寻址系统来实时迁移虚拟机内存和磁盘数据, 但对于镜像文件没有涉及。Uchibayashi等人^[9]提出一种基于区块链技术的实时迁移控制机制, 防止在云上迁移VM期间出现对数据的恶意篡改行为, 解决了迁移控制和数据保护方面的问题。文献^[10-12]提出3层镜像架构, 有效提升了数据共享能力, 减小了存储空间。但是数据中心间的迁移需对镜像进行重复数据删除, 当站点之间镜像相似度较小时重复数据删除操作延长了总的迁移时间。此外, 在WAN低带宽的环境下, 镜像的传输也面临着数据丢失的问题。

为避免跨数据中心迁移时重复数据删除的问题, 减少总迁移时间并保证镜像数据的安全传输, 本文使用3层镜像结构对虚拟机的基本镜像进行存储, 提出了一种基于哈希图(HashGraph)的跨数据中心虚拟机实时迁移方法(MIGration based on HashGraph, H-GMIG)。将数据中心间基本镜像以3层结构分布式的存储在各自的共享存储池中, 并实现了基于内容的寻址模式, 利用HashGraph的快速共识机制将镜像散列实时全网同步。支持镜像信息以内容寻址方式的分布式存储, 迁移时无需进行重复数据删除而减少总的迁移时间; 同时, 引入迁移代理主机(Migration Agent, MA)对跨数据中心实时虚拟机迁移提供统一的管理服务并负责镜像的传输。

2 哈希图(HashGraph)

HashGraph^[13]是由Swirls团队提出的一种分布式记账技术, 通过自身分布式节点进行网络数据的存储、验证、传递和通信。本文利用哈希图为各数据中心存储池中的基本镜像保留副本, 解决了跨数据中心虚拟机实时迁移的许多难点, 如重复数据删除, 恶意数据篡改, 带宽瓶颈等问题。

2.1 八卦协议(gossip protocol)

八卦协议是哈希图用来传播信息的协议, 哈希图中每个节点都会将自身事件随机传播给邻居。邻居将接收到的事件与从其他节点收到的信息汇聚成新的事件, 随机地传播给其他邻居节点。由于八卦协议的快速收敛性, 每条信息都可以快速传播给哈希图中每个节点。各成员在本地进行虚拟投票达成成员间的共识, 内容更新信息存储在哈希图各节点的数据库中。

2.2 HashGraph的存储结构

哈希图的文件系统允许用户存储信息, 并就存储的内容达成共识, 最终哈希图中的每个节点都存储相同的文件。文件以Merkle DAG的结构存储。这意味着如果两个文件有相同的字节, 只存储1个公共字节的副本即可。此外, Merkle DAG基于内容寻址, 因此通过查询就可以得到镜像信息之间的不同散列。综上, 使用哈希图即可避免跨数据中心迁移VM时对镜像数据的重复数据删除操作。

3 基于HashGraph的实时迁移

3.1 架构设计

本文架构H-GMIG如图1所示。镜像文件部署在本地数据中心的共享存储池(storage pool)内, 用户下载并使用其作为基本镜像来部署虚拟机。使用3层镜像架构^[10]进行存储, 即软件栈(software stack)或应用程序部署在工作环境层(WE层), 操作系统层(OS层)作为WE层的基本镜像运行, WE层作为用户数据层(UD层)的基本镜像运行。以此来存储虚拟机的基本镜像, 尽可能地减少基本镜像的重复存储。

H-GMIG为每个数据中心配有一台迁移代理主机(Migration Agent, MA), 专门负责提供跨数据中心迁移虚拟机的服务。数据中心之间在迁移虚拟机或共享虚拟机镜像时都需通过各自的MA通信。MA的功能由存储模块和迁移模块两部分实现。MA存储模块用于存储基本镜像散列存储, 存储形式为Merkle DAG, 并记录各镜像散列的相似度。迁移模块从存储模块中获得需传输的镜像数据块, 再将其发送至目标主机。

3.2 基于HashGraph的VM镜像分布式存储

H-GMIG中对虚拟机基本镜像进行分布式存储。虚拟机的创建请求可称之为一次事件, 当有新的VM建立时, 宿主机便向MA发送请求, MA的存储模块提供存储服务。镜像一旦上传到存储池, 基本镜像在其生命周期内设置为只读, 对基本镜像的修改则存放在UD层。数据中心的共享存储池中基本镜像的副本、各基本镜像的散列和它们之间的映射关系以及各基本镜像之间的相似度信息存放在MA的存储模块中。仅MA有权限对虚拟机镜像进行上传操作。

MA的存储模块的工作流程如下:

步骤1 主机中创建了1台新的虚拟机, 记为1次事件。

步骤2 查看本地镜像存储池中是否有相应的基本镜像, 若存在则转至步骤3, 若不存在便在本

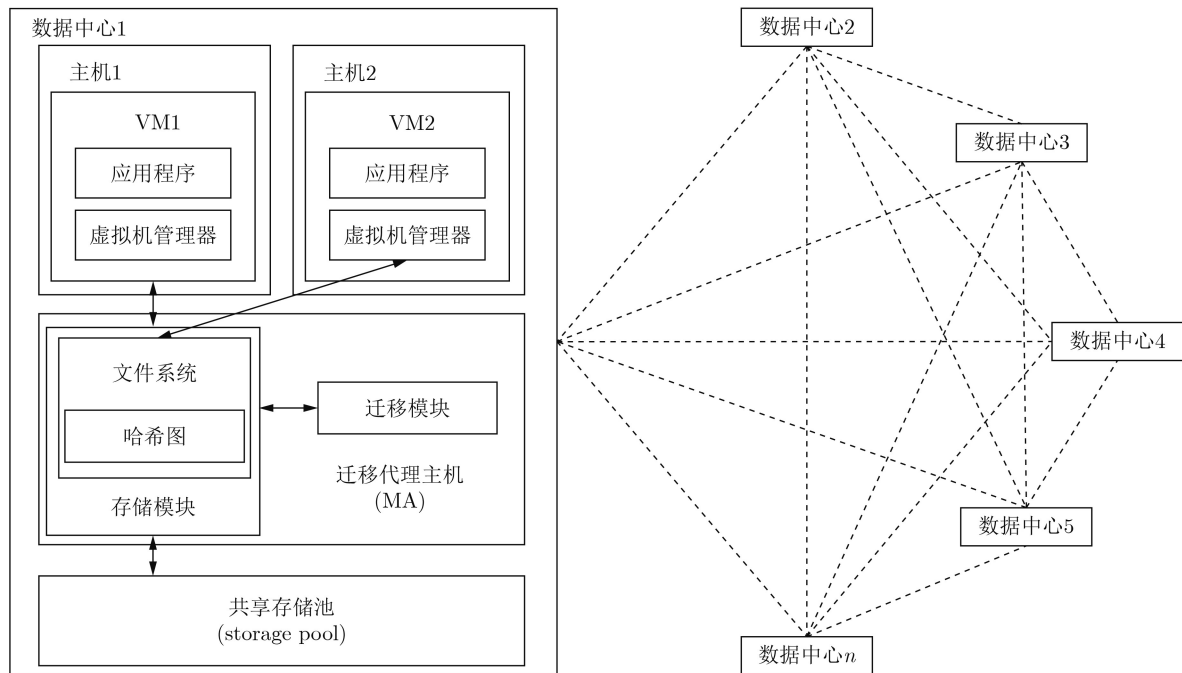


图1 H-GMIG的结构

地部署本镜像并向MA发送请求，将基本镜像上传到存储池中，并且设定其是否公开；

步骤3 主机向MA发送请求，MA计算上述基本镜像的散列值，并在本地进行保存；

步骤4 向其他数据中心的MA发送事件，即对基本镜像的哈希值进行八卦传播；

步骤5 事件在哈希图网络中最终会达成一致，各MA节点定期更新本地哈希图。

3.3 VM实时迁移过程

3.3.1 迁移请求阶段

MA的迁移模块主要负责数据中心间的通信以及镜像数据传输。云平台提出跨数据中心迁移请求后，由MA确定需发送的镜像数据，过程如下：

步骤1 源主机收到迁移请求后，先向本地MA发送查询请求，MA遍历哈希图底层文件，将待迁移虚拟机的镜像散列与目标数据中心的镜像散列进行比较；

步骤2 为待迁移VM的镜像散列的每个块创建1个临时标志位来存放重复信息，若与目标数据中心已有的镜像散列重复，则将VM镜像中的该块标记为1，否则标记为0。向源主机返回标记结果和两者之间的相似度信息；

步骤3 主机将标记结果及相似度信息反馈给目标主机，得到目标主机的确认信号后，再进行迁移。反馈的目的是对需要迁移的镜像达成一致，由于各数据中心MA之间的哈希图副本是一致的，因此迁移双方得到的标记结果相似度信息是一致的；

步骤4 迁移开始后由MA将标记为0的镜像数据块与标记为1的镜像散列发送至目标主机。

3.3.2 迁移过程

在H-GMIG中，迁移VM时首先传输存储数据，然后传输内存数据。基本镜像和用户数据并行迁移。迁移过程如图2所示。

步骤1 基本镜像迁移：如3.3.1节步骤4所述；

步骤2 用户数据迁移：由于UD层为用户提供可写权限，用户的写操作和迁移过程中的读操作必须适当协调，以确保目标站点的数据正确性。为了避免通过协调算法输入新的开销，本文使用快照的方式完成对用户数据的迁移；

在迁移过程中，步骤1和步骤2同时进行；

步骤3 内存数据迁移：在完成用户数据传输后，内存数据以预复制方式迁移^[1]；

步骤4 切换：当迭代副本满足结束阈值时，VM在源站点暂停并在目标站点恢复运行，释放源站点的资源。

4 实验结果与分析

4.1 实验设置

实验模拟了3个数据中心，每个数据中心包含2台服务器，其中一台作为VM的宿主机，另一台作为MA。每台服务器的CPU为3.6 GHz, 16 GB RAM, 数据中心之间以1 Gbit交换机(SW1, SW2, SW3)连接。半虚拟化环境中配置1个VCPU, 1 GB内存的虚拟机，运行内核为3.13.0的Ubuntu(包含KVM模块)，QEMU版本为2.0.0。

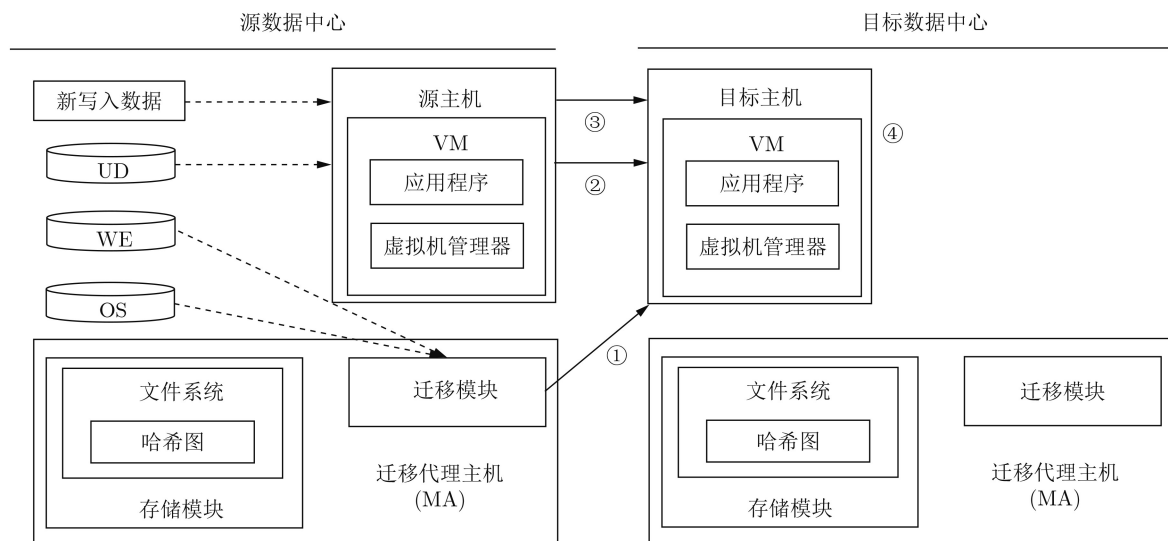


图2 跨数据中心迁移虚拟机的过程

实验通过以下3种迁移方式来进行。所有测试进行5次，取平均值作为最终结果。

NSS^[10]：在迁移过程中对虚拟机基本镜像进行重复数据删除，没有基本镜像的中央存储库；

SS^[12]：在迁移过程中对虚拟机基本镜像进行重复数据删除，基本镜像存放在中央存储库中。迁移时，源站点与中央存储库并行传输数据；

H-GMIG：本文提出的架构。

实验中迁移VM之间基本镜像的相似度表示为 (m, n) ， m 和 n 分别表示3层镜像结构下迁移的VM的OS镜像和WE镜像之间的相似度。在目标站点生成相同的块以模拟不同的相似度。实验分别在相似度分别为 $(5\%, 5\%)$ ， $(20\%, 20\%)$ ， $(40\%, 40\%)$ ， $(60\%, 60\%)$ 条件下进行比较。对4种不同的工作负载情况下的总迁移时间和网络流量进行测试。

IDLE：虚拟机的闲置状态，这类虚拟机作为本实验的基准。

STATIC：该虚拟机拥有静态Web应用程序，用户在该Web服务中迭代下载文件，直至迁移结束，以此来保证Web服务在迁移过程中持续运行。

DYNAMIC：TPC-W运行在虚拟机中。TPC-W是一项交易性网络电子商务网站，是动态Web应用程序。与静态Web应用程序相比，TPC-W需要处理服务器逻辑，占有更多的CPU计算资源以及更多的内存。

COMPILATION：Linux内核4.8.1在此虚拟机中编译，是CPU密集型应用程序。本实验组测试CPU密集型应用在虚拟机迁移中的效果。

4.2 单一迁移

如图3所示，从模拟实验结果中可以看出，相似度为 $(5\%, 5\%)$ 时，传输的镜像数据相对较多，

H-GMIG的总迁移时间与SS相近，这说明本文的加密传输策略没有带来额外的性能开销。相比于NSS，SS的总迁移时间在4种不同的相似度下分别平均降低了33.7%，33.3%，36.6%和38.0%。这是由于NSS需要通过源主机传输镜像文件，配置文件和内存信息。而SS中源主机只需要传输配置文件和内存信息即可，镜像文件可直接从共享库中下载，减小了源主机的负担。

H-GMIG的总迁移时间相对于NSS在4种不同的相似度下分别平均降低了39.3%，37.9%，43.7%和43.5%，这归功于哈希图的快速共享机制，虚拟机建立后迅速将本地共享池的镜像散列与全网其他节点共享，并且利用基于Merkle DAG内容寻址分布式框架进行存储，从而在迁移时无需进行重复数据计算即可得到去重后的镜像散列数据，加快了迁移的进程。此外，分布式的点对点文件传输分担了各个链路的压力。在计算密集型的虚拟机迁移过程中，点对点的文件传输方式相比于C/S架构的传输方式更加充分地利用了带宽资源，迁移时间更短。

相对于NSS，SS和H-GMIG均实现了基本镜像和用户数据的并行传输，因此缩短了总的迁移时间。在相同的网络负载下，随着镜像之间的相似度的增高，单个虚拟机迁移所需的时间越来越短。

图4所示为不同负载下的单虚拟机迁移的网络流量。图4(a)—图4(c)条件下，H-GMIG中网络流量与SS相比有所降低，这证明了哈希图共识的带宽开销相对较小。图4(d)条件下，H-GMIG与SS之间的网络流量差异明显，这是因为Linux内核编译的磁盘脏率较高，H-GMIG的总迁移时间比SS少，因此用于同步污染的磁盘数据的网络流量比SS少。

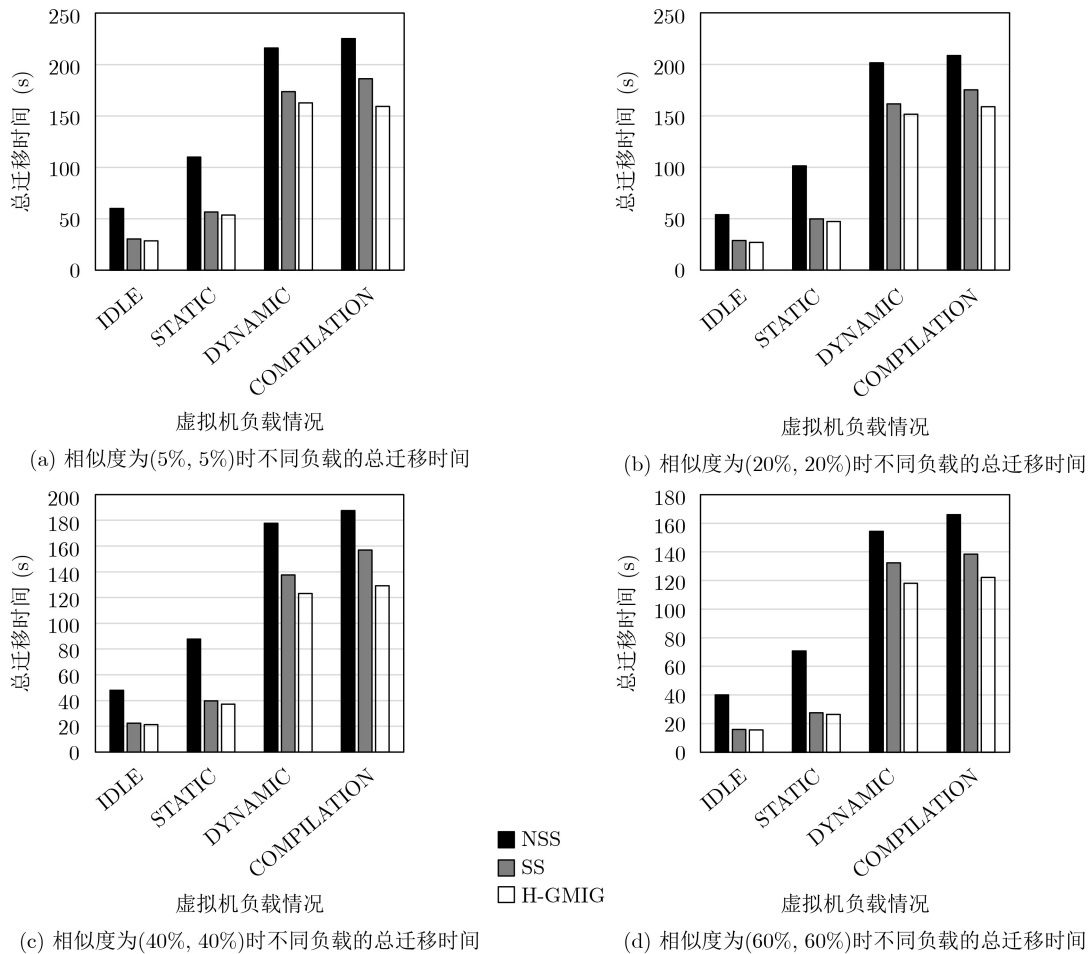


图3 不同相似度下单次VM迁移所需的总迁移时间

4.3 多虚拟机迁移

本节展示了5台虚拟机同时进行迁移的模拟实验结果,实验只测试了相似度为(5%, 5%)和(40%, 40%)两种情况下的总迁移时间和网络流量。结果如图5和图6所示,多虚拟机的迁移会使NSS传输的数据量增多,SS的单一共享存储池负载过高,而H-GMIG会将负载均摊于全网,因此H-GMIG迁移性能最好。

4.4 DDOS攻击测试

文献[14,15]指出,目前跨数据中心迁移多个虚拟机的安全问题仍是当前虚拟机迁移领域的一个悬而未决的问题。SS使用第三方存储服务,然而无论在学术界还是工业界,第三方存储都被认为是不可信的,当中央存储库被恶意攻击或镜像下载量很大时,就可能出现宕机事故从而导致迁移服务无法继续。在H-GMIG架构中,镜像数据是基于哈希图进行分布式存储的,可保证云联盟下基本镜像的高度共享和安全存储。

对此本节进行了模拟实验测试,实验在4.1节所述条件下增加了1台虚拟机H1。假设主动攻击者H1控制云上迁移的多个虚拟机。另外,实验还假

设H1拥有云外部的资源并对其可用的计算资源不加限制,且受害者具有一些可公开访问的服务,如虚拟机的基本镜像可公开访问,攻击者可通过这些服务与受害虚拟机进行交互。H1通过hping3工具发送TCP数据分组以模拟对MA1的洪泛式DDOS攻击,攻击密度为105个/s。

本次实验进行5次,每次同时迁移5台虚拟机,选定基本镜像之间的相似度为(5%, 5%),因为在此相似度条件下需要迁移的镜像数据量最大,最能体现H-GMIG抵御DDOS攻击的效果。为体现攻击效果,在迁移开始的50 s后开始发送攻击流量。由于其他数据中心的MA存有基本镜像的冗余备份,增加的迁移时间为MA之间的通信延迟。由图7可见,总迁移时间的增加量均保持在900 ms上下,而正常情况下5台虚拟机在相似度为(5%, 5%)时的迁移时间为445.12 s,可见H-GMIG中虚拟机的总迁移时间受DDOS攻击影响很小。

4.5 性能开销

4.5.1 时间开销

H-GMIG的时间开销主要可以体现在以下两个方面。

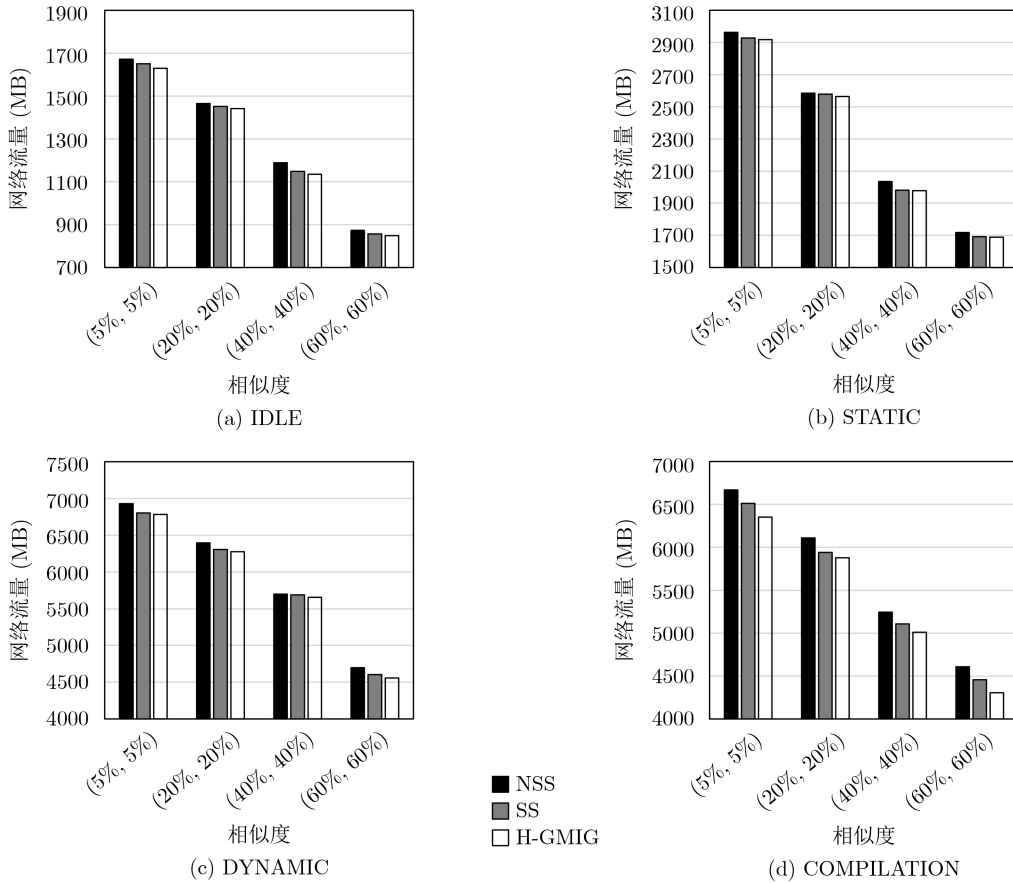


图4 不同负载下单虚拟机迁移的网络流量

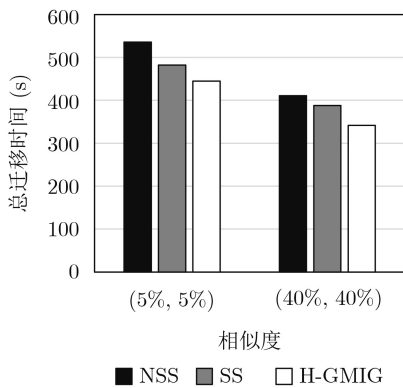


图5 多虚拟机同时迁移所需的迁移总时间

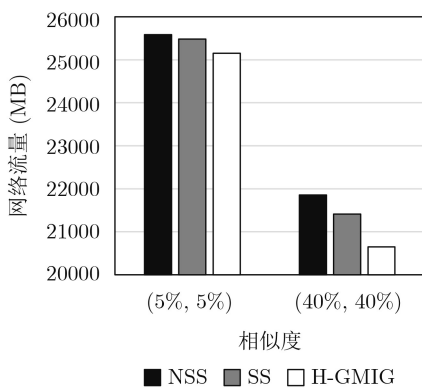


图6 多虚拟机迁移的网络流量

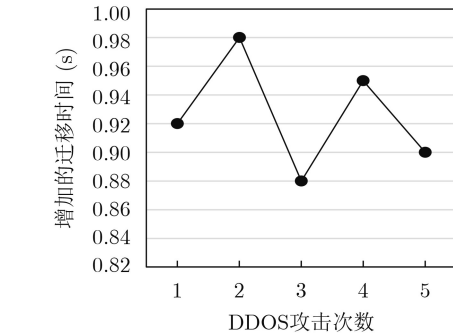


图7 DDOS攻击测试下总迁移时间的增加量

(1) 哈希图共识开销及其对迁移过程的影响：跨数据中心迁移虚拟机时要考虑距离的影响。本次实验模拟了不同距离的3台服务器，每台服务器的CPU为3.6 GHz, 16 GB RAM。对哈希图的官方SDK¹⁾加以改进并进行100次共识实验测试。分别记录了最大共识时间、最小共识时间和平均共识时间，实验结果如表1所示。

距离相同时，共识时间存在波动，这种波动性是由八卦协议随机性造成的。随着距离的增大，平均共识时间有所增加，但增幅并不大。

¹⁾ <https://docs.hedera.com/docs/hedera-sdks>

实验还模拟了不同距离下的共识时间对虚拟机迁移时间的影响,实验条件设置同4.1节。选取负载状态为Idle且基本镜像相似度为(5%, 5%)的虚拟机进行测试。实验结果如表2所示。

表 1 不同距离下的共识时间

距离(km)	最大共识时间(s)	最小共识时间(s)	平均共识时间(s)
10	0.057	0.011	0.019
1000	0.751	0.138	0.590
3000	1.654	0.548	1.050

表 2 不同距离下的总迁移时间和共识时间对比

距离(km)	10	1000	3000
总迁移时间(s)	25.52	26.84	27.03
共识时间(s)	0.032	0.261	0.751

随着数据中心之间距离的增加,哈希图达成共识的时间与虚拟机的迁移时间均有所增加。3种距离下,共识时间占总迁移时间的比例分别为0.125%, 0.972%, 2.778%,与虚拟机的总迁移时间相比,哈希图达成共识的时间开销很小。

(2) MA的时间开销: H-GMIG中虚拟机开始迁移时,源数据中心的MA需遍历本地哈希图副本,查找哈希图中其他的可以向目标数据中心传输镜像的MA,并与其进行通信。虽然H-GMIG增加了MA之间的通信成本,但与NSS和SS相比, H-GMIG节省了迁移过程中对镜像进行重复数据删除的时间开销。由图3与图5可得,无论是单一迁移还是多虚拟机迁移过程, H-GMIG的总迁移时间都是最少的。

4.5.2 存储开销

使用SHA-1加密散列函数将每4 KB镜像数据块映射到20字节散列值,其大小减少超过200倍^[8]。H-GMIG中,各MA的哈希图副本中存放数据中心基本镜像数据的散列。与NSS和SS相比,数据中心增加的存储为MA中基本镜像的备份与哈希图副本中的散列值。与SS相比, H-GMIG虽为各数据中心引入了本地基本镜像的备份的存储开销和镜像散列值的存储开销,却节省了中央存储库的开销。H-GMIG中最主要的存储开销为本地镜像存储池中的基本镜像在MA中的备份。

5 结束语

实验从总的迁移时间、网络流量和镜像安全性3个方面对实验示例进行评估,SS和本文提出的H-GMIG在前两个方面均优于NSS。H-GMIG相较于SS,在总迁移时间中有明显优势,且抵御DDOS

攻击的能力较强。因此, H-GMIG更适用于跨数据中心的虚拟机迁移工作。后续工作中将继续研究跨数据中心迁移虚拟机的其他方面,包括哈希图在内存数据传输中的应用以及虚拟机迁移过程中的内存数据安全。

参考文献

- [1] CLARK C, FRASER K, HAND S, *et al.* Live migration of virtual machines[C]. Proceedings of the 2nd Conference on Symposium on Networked Systems Design & Implementation, Berkeley, USA, 2005: 273–286.
- [2] BRADFORD R, KOTSOVINOS E, FELDMANN A, *et al.* Live wide-area migration of virtual machines including local persistent state[C]. Proceedings of the 3rd International Conference on Virtual Execution Environments, San Diego, USA, 2007: 169–179. doi: 10.1145/1254810.1254834.
- [3] MASHTIZADEH A J, CAI Min, TARASUK-LEVIN G, *et al.* XvMotion: Unified virtual machine migration over long distance[C]. Proceedings of 2014 USENIX Conference on USENIX Annual Technical Conference, Philadelphia, USA, 2014: 97–108.
- [4] HARNEY E, GOASGUEN S, MARTIN J, *et al.* The efficacy of live virtual machine migrations over the internet[C]. The 2nd International Workshop on Virtualization Technology in Distributed Computing, Reno, USA, 2007: 1–7. doi: 10.1145/1408654.1408662.
- [5] YANG Yaodong, MAO Bo, JIANG Hong, *et al.* SnapMig: Accelerating VM live storage migration by leveraging the existing VM snapshots in the cloud[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2018, 29(6): 1416–1427. doi: 10.1109/TPDS.2018.2790389.
- [6] MUGISHA E and ZHANG Gongxuan. Reliable multi-cloud storage architecture based on erasure code to improve storage performance and failure recovery[J]. *International Journal of Advanced Cloud Computing and Applied Research*, 2017, 3(1): 26–40. doi: 10.23953/cloud.ijaccar.260.
- [7] RITEAU P, MORIN C, and PRIOL T. Shrinker: Efficient live migration of virtual clusters over wide area networks[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2013, 25(4): 541–555. doi: 10.1002/cpe.2861.
- [8] RITEAU P, MORIN C, and PRIOL T. Shrinker: Improving live migration of virtual clusters over WANs with distributed data deduplication and content-based addressing[C]. The 17th European Conference on Parallel Processing, Bordeaux, France, 2011: 431–442. doi: 10.1007/978-3-642-23400-2_40.
- [9] UCHIBAYASHI T, APDUHAN B, SUGANUMA T, *et al.* Toward a secure VM migration control mechanism using blockchain technique for cloud computing environment[C]. The 18th International Conference on Computational

- Science and Its Applications, Melbourne, Australia, 2018: 177–186. doi: [10.1007/978-3-319-95168-3_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95168-3_12).
- [10] ZHANG Fei, FU Xiaoming, and YAHYAPOUR R. LayerMover: Fast virtual machine migration over WAN with three-layer image structure[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2018, 83: 37–49. doi: [10.1016/j.future.2018.01.017](https://doi.org/10.1016/j.future.2018.01.017).
- [11] ZHANG Fei, FU Xiaoming, and YAHYAPOUR R. LayerMover: Storage migration of virtual machine across data centers based on three-layer image structure[C]. 2016 International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, London, UK, 2016: 400–405. doi: [10.1109/MASCOTS.2016.27](https://doi.org/10.1109/MASCOTS.2016.27).
- [12] ZHANG Fei, FU Xiaoming, and YAHYAPOUR R. CBase: A new paradigm for fast virtual machine migration across data centers[C]. The 17th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing, Madrid, Spain, 2017: 284–293. doi: [10.1109/CCGRID.2017.26](https://doi.org/10.1109/CCGRID.2017.26).
- [13] BAIRD L. The swirls hashgraph consensus algorithm: Fair, fast, byzantine fault tolerance[R]. Swirls Technical Report SWIRLDS-TR-2016-01, 2016.
- [14] ZHANG Fei, FU Xiaoming, and YAHYAPOUR R. A survey on virtual machine migration: Challenges, techniques, and open issues[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 1206–1243. doi: [10.1109/COMST.2018.2794881](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2794881).
- [15] VARGHESE B and BUYYA R. Next generation cloud computing: New trends and research directions[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2018, 79: 849–861. doi: [10.1016/j.future.2017.09.020](https://doi.org/10.1016/j.future.2017.09.020).
- 田俊峰：男，1965年生，教授，研究方向为信息安全与分布式计算。
屈雪晴：女，1994年生，硕士生，研究方向为信息安全与分布式计算。
何欣枫：男，1976年生，副教授，研究方向为云计算，可信计算。
李珍：女，1981年生，副教授，研究方向为软件安全，漏洞检测。