

混合云中的一个高效协调器

王宗江¹ 郑秋生¹ 曹健²

(中原工学院计算机学院 郑州 450007)¹ (上海交通大学计算机系 上海 200031)²

摘要 云计算提供了4种部署模型:公有云、私有云、社区云和混合云。通常,一个私有云中可用的资源是有限的,因此云用户不得不从公有云租用资源。这意味着云用户将会产生额外的费用。越来越多的企业选择混合云来部署它们的应用。在混合云中,为了实现用户的利益最大化,必须满足使用资源的费用最小化和用户的QoS,为此为混合云用户提供了一个既能最小化资源费用又能保证满足QoS的资源分配方法。实验结果表明,该算法在保持低操作成本的同时还满足了用户的QoS。

关键词 云计算,混合云,资源分配,服务质量,调度

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.1.022

Efficient Coordinator in Hybrid Cloud

WANG Zong-jiang¹ ZHENG Qiu-sheng¹ CAO Jian²

(School of Computer Science, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)¹

(Department of Computer Science, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200031, China)²

Abstract Cloud computing provides four deployment models: public cloud, private cloud, community cloud and hybrid cloud. Generally, resources available in a private cloud are limited, thus the cloud users have to rent resources from public clouds. This requirement means that cloud users will incur extra costs. More and more enterprises choose the hybrid cloud to deploy their applications. In the hybrid cloud, in order to minimize the cost of using resources, it is also important to satisfy QoS for user. Therefore, this paper proposed resources allocation algorithm for hybrid cloud users who want to minimize the resource cost and ensure QoS satisfaction. The empirical results demonstrate that resources can be allocated by our algorithm in a way that satisfies the user QoS and keeps low operational costs.

Keywords Cloud computing, Hybrid cloud, Resource allocation, Quality of service, Scheduling

1 引言

云计算是近年来的一个研究热点。它将计算机的各种资源例如架构、平台和软件以服务的形式交付,使得用户可以用随用随付的方式订阅这些服务。这些服务有架构即服务(IaaS)、平台即服务(PaaS)和软件即服务(SaaS)^[1]。云计算提供了4种开发模型:公有云、私有云、社区云和混合云^[2]。

图1显示了Yahoo视频网站上46天周期的一个动态负载数据^[3]。从这个图可以看出,负载的尖峰不可能预测。最高负载远远大于平均值,但是很短暂。在私有云中,如果要满足所有的负载,短暂的尖峰负载需要额外的硬件设施,从而增大企业的开支。在大多数时间,这样会造成硬件设备的浪费以及操作成本的增加。公有云有许多优点,例如动态配置、灵活、可扩展性和所用及所付。公有云的特点能够帮助我们在不需要额外资源的情况下处理不可预测的短暂负载。这种情况下,只有在公有云处理过负载的时段会带来额外的花费,从而避免了在私有云下的部署和操作费用的浪费。

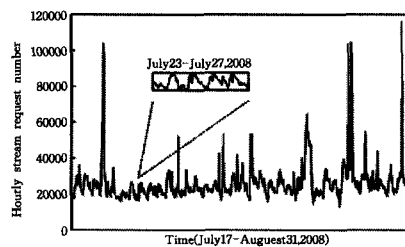


图1 Yahoo! Video上的视频流负载

目前,越来越多的企业选择混合云作为企业应用部署的平台。在混合云中,一个企业维护它自己的私有云,例如一个虚拟数据中心,并且当需要的时候缩放到一个公有云上。从一个传统数据中心迁移到一个混合云会给企业带来许多好处。在混合云环境中,资源管理是核心问题。从云计算资源管理的相关研究现状可以看到^[4],目前主要有以降低云计算数据中心能耗为目标的云资源管理^[5,6]、以提高系统资源利用率为目标的云资源管理^[7,8]和基于经济学的云资源管理的相关理论和方法^[9]。下一步研究的几个重要方向有:面向不

到稿日期:2013-12-26 返修日期:2014-03-15 本文受国家自然科学基金(61073021),河南省科技攻关项目计划(122102210397),河南省教育厅科学计算研究重点项目(12A520052)资助。

王宗江(1970-),男,博士,讲师,主要研究方向为分布式计算、并行处理技术, E-mail: wangzongjiangmicro@gmail.com; 郑秋生(1965-),男,硕士,教授,主要研究方向为计算机安全; 曹健(1972-),男,博士,教授,主要研究方向为分布式计算、服务计算。

同类型应用负载的云资源管理测量与机制^[10]、能耗与性能折衷的云资源调度^[11,12]、基于预测的云资源调度^[13-15]、面向计算能力(CPU、内存)和网络带宽的综合云资源分配^[16-18]、多目标优化的云资源管理与调度^[19,20]。

因此,为了实现云用户的目标,既满足用户的任务请求 QoS 又最小化租用公有云资源的费用,提出了一个混合云中的综合资源调度算法。该方法属于多目标优化的云资源管理与调度。实验结果表明,该算法在大多数情况下能够提供比基准算法更好的性能。

2 问题描述

2.1 系统模型

本文使用 InterCloud 作为混合云模型^[21-23]。图 2 描述了 InterCloud 模型的通用组织。InterCloud 是一个能使代理和提供商提高弹性应用性能、可用性和可扩展性的市场。它将资源放到多个云中,然后在不同的数据中心进行缩放,从而无缝地满足应用的 SLA。

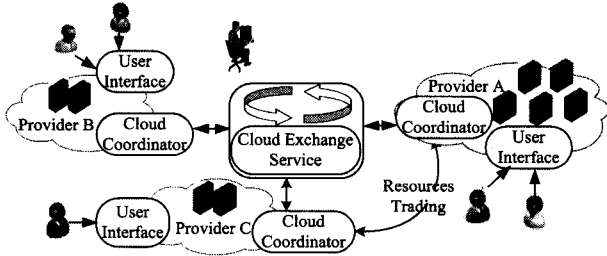


图 2 InterCloud 部件和它们在体系中的角色

在 InterCloud 模型中,有 3 个关键部件:云交换 (CEx)、云协调器(CC)和云代理。

这个模型的中心是云交换。InterCloud 的这个部件起了一个市场发起者的作用,它提供了注册、协商和发现服务这些功能。它支持基于竞争的经济模型,例如商品市场和拍卖的云服务交易。云交换允许参与者(云协调器和云代理)定位提供商和消费者。

云协调器服务根据基于市场的交易和协商协议,负责领域中特定企业和它们成员的管理。

云协调器通过对资源管理实施基本的功能,将一个云的服务输出到联盟。这些功能包括调度、分配、工作和性能模型、市场、虚拟化、动态感知\监控、发现和应用组合。

云代理通过云交换为云服务提供商找到合适的用户。通过和云协调器的协商,对满足用户 QoS 需求的资源进行分配。云代理包括 4 个部件:用户接口、核心服务、执行接口和持续化。

本文专注于云协调器的体系结构和设计,将它作为一个 agent 来支持混合云中的弹性应用。

2.2 模型中的云协调器

图 3 显示了在混合云环境下使用的本文所提系统的体系结构图。用户通过接口请求资源,允许各种应用性能优先,例如截止时间和预算花费。调度的主要部分位于主节点,包括在私有云中。当一个新任务到来,调度部件将被触发。它请求各种信息,如数据大小、代码大小和数据的位置。信息被提供到调度器。在调度算法帮助下,任务被分发到私有云或者公有云上^[24-27]。

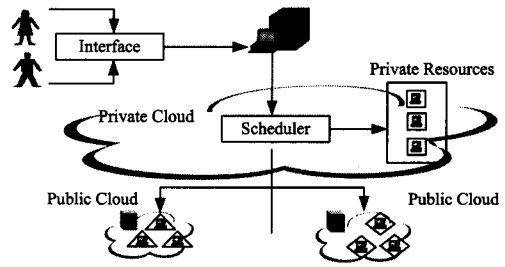


图 3 混合云环境的部件视图 Resource Pool 资源池

本文有 4 种云资源:虚拟机、网络、存储和内存。每种资源用一个资源池存储。对于虚拟机,根据类型的不同分为不同的资源池,例如虚拟机类型 1 资源池、虚拟机类型 2 资源池等。

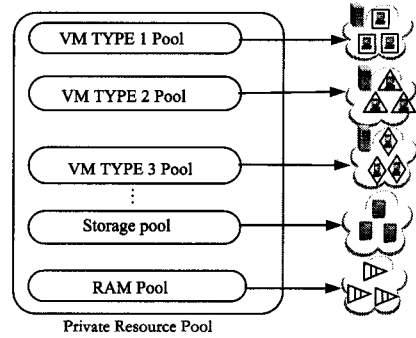


图 4 私有资源池

3 算法设计

在这个部分,首先定义在本文的模型中使用的资源,然后将问题形式化。

3.1 资源定义

定义 1(公有虚拟机) 公有虚拟机 q 被标记为 PuV_q , 由公有服务提供商动态建立。公有虚拟机有以下参数: $PuV_q = \{Puu_q, x_q, y_q, dti_q, dto_q\}$ 。公有虚拟机的计算能力用 Puu_q 表示,单位是 MIPS(Million Instructions Per Second)。虚拟机 q 的计算价格 q 由 x_q 表示,代表每百万指令执行的价格($\$/MIs$)。虚拟机 q 的存储价格由 y_q 表示,代表在磁盘上存储每兆字节的价格,存储价格的单位是($\$/MBs$)。在虚拟机 vm 中数据传输的价格由 dti_q 表示,对数据在虚拟机磁盘中传输进行收费。数据传输的单位是($\$/MBs$)。在虚拟机 vm 外部数据传输的价格由 dto_q 表示,对数据从虚拟机磁盘中传输到目标数据进行收费。数据传输的单位是($\$/MBs$)。

定义 2(私有虚拟机) 私有虚拟机 k 由 PrV_k 标识,从私有云中的机器节点产生。每个私有虚拟机有以下参数: $PrV_k = \{Pru_k, L_k\}$ 。私有虚拟机 vm 的计算能力用 Pru_k 表示,单位是 MIPS (Million Instructions Per Second)。在私有虚拟机 k 中的任务 t_i 的数据复制信息由 $L_k = \{t_i\}$ 标识。当一个任务到达,数据被自动复制并随机部署到私有虚拟机上。

定义 3(任务) 任务 t_i 是一个用户请求的一个单位。一个虚拟机一次处理一个任务。一个任务表示为 $t_i = \{D_i, SC_i, SD_i, M_i\}$ 。每个参数定义如下:

截止 D_i : 每个任务有一个完成截止,称为 QoS 命令。任务在截止之前必须完成,并且把结果返回给用户。如果超出了截止时间, QoS 约束将会触发。

任务 t_i 的代码大小 SC_i 代表任务需要操作的执行代码

大小。代码大小的单位是 MI(Million Instructions)。

任务 t_i 的数据大小 SD_i 代表任务需要的信息数据。它会影响数据传输时间,它的单位是 MB。

金钱花费 M_i 代表从公有云租用资源的花费。

为了有效使用资源池,将任务根据它们需求资源的不同类型分成不同队列。每个队列包含的任务需要的是相同资源。例如,队列 1 需要的是类型 1 的虚拟机。图 5 的例子表示了任务队列。

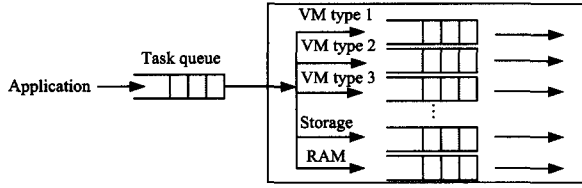


图 5 任务队列

3.2 问题形式化

服务的质量是对不同应用、用户或者数据流提供的不同优先权的能力,或者保证了一定水平性能的数据流。QoS 有时被用做一个质量测量,而不是保留资源的能力。在云服务中最通用的 QoS 如下:

- (1) 执行时间
- (2) 可靠性
- (3) 可用性
- (4) 持久性
- (5) 价格

本文模型专注于执行时间(截止时间)和价格(花费值)。

为了提供实时 QoS 要求,主要的目标是保证混合云模型的任务请求 QoS 截止时间。此外要考虑低花费,主要是最大化私有云的利用率和最小化租用公有云资源费用。将我们的问题建模为一个多维度多选择 knapsack 问题(MMKP),这个问题已经被证明为一个 NP 完全问题。基于我们的系统定义和策略,将问题用数学进行形式化。

knapsack 问题是这样一个组合优化问题:给定一组项目,每个项目有一个花费和值,决定集合中每个项目的个数,使得花费小于一个给定的极限,并且值的大小尽可能大。

定义 4(截止约束) 截止约束: $\sum_{k=1}^m \frac{SC_k}{Pru_k} \leq D_i$ 。对于用户输入的任务 t_i ,它们的 SC_k 应该在用户的实时要求,截止 D_i 之前完成。计算能力 u_k 是从 $vm=1$ 到 m ,虚拟机被分配到任务 t_i 上。

定义 5(预算控制约束) 预算控制约束: $\sum_{q=1}^m (x_q * SC_i + y_q * SC_i) \leq M_i$ 。预先定义的花费数量 M_i 应该满足公有云的所有计算资源。任务的所有代码 SC_i 和信息数据 SD_i 在公有虚拟机资源 $q \in \{PuR_1, PuR_2, \dots, PuR_m\}$ 上执行,计算价格为 X_q ,存储价格为 Y_q 。

我们考虑的主要花费是租用公有云提供商的资源。根据在本节中假定的参数,采用一个花费函数代表整个花费的值。

定义 6(花费函数) 花费函数: $CostF = SC_i * x_k + SD_i * y_k + SD_i * (\frac{1}{dti_k} + \frac{1}{dto_k})$ 。通常,一个公有云服务商例如亚马逊的 EC2 或者谷歌的 App Engine,根据 3 方面收费:计算、存储和数据传输。花费函数根据代码大小 SC_i 和计算价格 x_k 计算了计算花费;根据数据大小 SD_i 和存储价格 y_k 计算了存储

花费;根据数据大小 SD_i ,用传输价格 dti_k 和外部传输价格 dto_k 计算了数据传输花费。

对于总共在虚拟机资源池中的 n 个任务和 n 个截止约束,有 m 个私有虚拟机和 g 个公有虚拟机,将调度选择问题映射到了 0-1 多维多选择 knapsack 问题(MMKP)。多维多选择 knapsack 问题定义如下:

假设有 N 个对象组,每个有 $I_i (1 \leq i \leq N)$ 个对象。每个对象有权益 p_{ij} 和需要的资源 $r_{ij} = (r_{ij}^1, \dots, r_{ij}^m)$ 。在 knapsack 中可用资源的数量是 $R = (R^1, \dots, R^m)$ 。MMKP 就是在 knapsack 中找到一个确切的组,使得使用的资源小于可用资源的同时权益最大化。

因为我们的问题形式化是对每个虚拟机选择任务,从而构建一个满足用户 QoS 约束和最大化利用率并且最小化花费值的计算。资源选择问题被映射到 MMKP 如下:

- (1) 每个虚拟机被映射到 MMKP 中的一个对象组;
- (2) 每个任务被映射到 MMKP 中的一个对象;
- (3) 每个任务的 QoS 属性被映射到 MMKP 中的对象需要的虚拟机资源;
- (4) 花费函数被映射到对象的收益;
- (5) 一个用户的截止约束被考虑为 knapsack 中的可用的虚拟机资源。

上面的问题用数学形式化为:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^m CostF_i[k] \quad (1)$$

$$\text{Subject to} \sum_{k=1}^m \frac{SC_k}{Pru_k} \leq D_i \quad (2)$$

$$\sum_{q=1}^m (x_q * SC_i + y_q * SC_i) \leq M_i \quad (3)$$

其中, $k=1$ 到 m 。

MMKP 已经被证明为 NP 完全问题。通过将我们的问题映射到 MMKP,使用了一种近似优化推理算法 SqS 来降低时间复杂度。

4 实验分析

尽管我们已经开始在混合云计算环境下实施云协调器,但是仍然是初期。因此,在本节展示了使用 CloudSim 框架对所提出的方法进行的实验和评估。

CloudSim 是一个能够对云计算环境进行建模和模拟的、可以扩展的模拟工具的开放源代码软件^[28,29]。CloudSim 有下面主要特点:

- (1) 支持大规模云计算数据的建模和模拟;
- (2) 支持虚拟服务器主机的建模和模拟;
- (3) 支持能量感知的计算资源的模拟和建模;
- (4) 支持云联合的模拟和建模;
- (5) 支持模拟元素的动态插入、停止和模拟的重启;
- (6) 支持将主机到虚拟机的用户定义分配策略和主机资源到虚拟机的分配策略。

4.1 实验建立

实验中使用了基于 Java (JDK 7u0)平台的 CloudSim 3.0。使用的机器是 Core 2 Duo CPU, E7500 @ 2.93GHz, 2GB RAM。用 CloudSim 创建了一个数据中心环境。数据中心代表私有云,包括 1000MIPS 计算能力、5GB 内存、1TB 存储和 10GB 带宽,带有 x86 体系、linux 操作系统和 Xen 虚拟机。

在下面实验中,将数据中心分布到 100 个虚拟机,每个虚

拟机 5GB,512MB 内存,1GB 带宽,1CPU 核和[10,50]MIPS 计算能力。表 1 列出了虚拟机环境设置。建立了用户使用的输入任务(cloudlet),每个文件大小为[200,400]MB,输出大小为[20,40]MB,代码大小[400,1000]MI。表 2 列出了任务建立参数。

表 1 虚拟机环境设置

vm experiment setup	
Image size	5GB
RAM	512MB
BW	1GB
CPU number	1
Computing ability	[10,50]MIPS

表 2 任务建立

Task experiment setup	
File size	[200,400] MB
Output size	[20,40] MB
Code size	[400,1000]MI

4.2 实验

在这个测试中,使用公有虚拟机来支持所提算法 SqS,保证 QoS 截止能够全部完成。在公有虚拟机上的费用是分析的目标。这个实验使用了 200 和 500 个任务,实施了由松到紧的有限制的截止。使用了 Fair 和 FIFO 方法作为基准方法。如图 6 所示,为了完成 QoS 要求,Fair 和 FIFO 方法需要付出比 SqS 更多的费用。图 7 说明了 500 个任务下,SqS 也比其它方法花费便宜。图 6 和图 7 也说明了在严格的截止时间下费用几乎是相同的,这是因为在不足的时间截止下由于资源有限,不能处理任务,所以需要把所有的任务都发布到公有云上。没有私有云,只使用公有云,导致相同数量的任务有相同的花费数值。

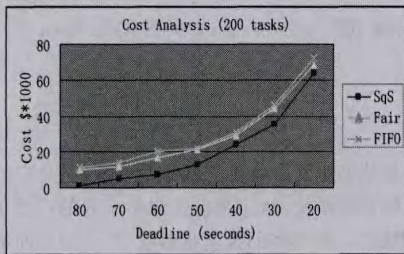


图 6 花费分析(200 个任务)

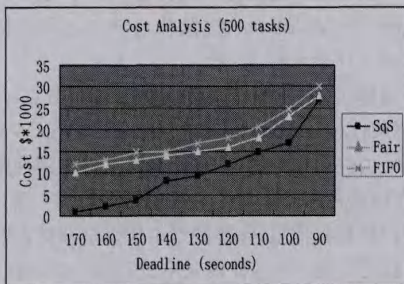


图 7 花费分析(500 个任务)

结束语 随着云计算的快速发展,越来越多的企业选择混合云作为构建企业应用的首选。如何保证既满足用户 QoS 又保证较低操作花费成为每个企业的主要考虑。本文提出了在混合云环境中一个云协调器的有效调度方法。它既保证了用户的 QoS 需求,又保证了任务响应时间。此外,这个方法最大化了私有云资源的利用率且最小化了公有云资源的租用

费用。

如实验所示,调度算法在减少等待时间、任务执行时间和任务完成时间方面,比现有调度算法获得了更好性能。在未来,我们的目标是考虑其他类型资源,例如磁盘存储和网络带宽。此外,将考虑未来资源的可用性预测,从而可以更好地对资源使用进行决策。

参考文献

- [1] Armbrust M, Fox A, Griffith R, et al. Above the Clouds; A Berkeley View of Cloud Computing[R]. Department, University of California, Berkeley, Feb 2009
- [2] Mell P, Grance T. The NIST Denition of Cloud Computing[R]. <http://csrc.nist.gov/groups/SNS/cloud-computing/>, 2009
- [3] Kang X, Zhang H, Jiang G, et al. Measurement, modeling, and analysis of internet video sharing site workload; A case study[C]// IEEE International Conference on Web Services (ICWS), 2008; 278-285
- [4] 林伟伟, 齐德昱. 云计算资源调度研究综述[J]. 计算机科学, 2012, 39(10): 1-10
- [5] Von L G, Wang L, Younge A J, et al. Power-Aware Scheduling of Virtual Machines in DVFS-enabled Clusters[C]// Proc of IEEE international Conference on Cluster Computing 2009, 2009. New Orleans, LA, USA, 2009; 1
- [6] Mezma M, Melab N, Kessaci Y, et al. A parallel bi-objective hybrid metaheuristic for energy-aware scheduling for hybrid cloud computing systems[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing(JPDC), 2011, 71(11): 1497-1508
- [7] Hermenier F, Lorca X, Menaud J-M, et al. Entropy: a consolidation manager for cluster[C]// Proc. of the 2009 International Conference on Virtual Execution Environments (VEE'09), Mar. 2009; 41-50
- [8] Wei Gui-yi, Vasilakos A, Zheng Yao, et al. A game-theoretic method of fair resource allocation for cloud computing services [J]. The Journal of Supercomputing, 2010, 54(2): 252-269
- [9] Buyya R, Yeo C S, Venugopal S, et al. Cloud computing and emerging IT platforms; vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility[J]. Future Generation Computer Systems, 2009, 25(6): 599-616
- [10] Srikantaiah S, Kansal A, Zhao F. Energy aware consolidation for cloud computing[C]// Proceedings of the 2008 Conference on Power Aware Computing and Systems, 2008. 2008; 1-10
- [11] Liu Liang, Wang Hao, Liu Xue, et al. GreenCloud: a new architecture for green data center[C]// Proceedings of the 6th International Conference Industry Session on Autonomic Computing and Communications industry Session, 2009. 2009; 29-38
- [12] Ferreira A M. An energy-aware approach for service performance evaluation[C]// The International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking, 2010
- [13] Van H N, Tran F D, Menaud J-M. Sla-Aware Virtual Resource Management for Cloud Infrastructures[C]// Ninth IEEE International Conference on Computer and Information Technology, 2009. 2009, 1; 357-362
- [14] Van H N, Tran F D, Menaud J-M. Autonomic Virtual Resource Management for Service hosting platforms[C]// ICSE Workshop on Software Engineering Challenges of Cloud Computing, 2009. 2009; 1-8

(下转第 105 页)

法 SMR,即通过对 WSANs 进行分割、编码、计数,使得 actor 可与邻居节点通信以获取其它区域 sensor 节点信息,通过算法求出失效区域附近的 actor 节点的近似最佳位置,然后进行移动。仿真结果表明,SMR 算法在保证 WSANs 正常工作的情况下,相对于现有算法增加了剩余 actor 节点对 sensor 节点的覆盖数,并减少了节点的移动消耗。

参 考 文 献

[1] Ren Y, Zhang S D, Zhang H K. Theories and algorithms of coverage control for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2006, 17(3): 422-433

[2] Liu W, Cui L, Huang C C. EasiFCCT: A fractional coverage algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(8): 196-204

[3] Alaiwy M H, Alaiwy F H, Habib S. Optimization of Actors Placement within Wireless Sensor-Actor Networks[C]// 12th IEEE Symposium on Computers and Communications, 2007 (ISCC 2007). July 2007: 179-184

[4] Melodia T, Pompili D, Gungor V C, et al. A distributed coordination framework for wireless sensor and actor networks[C]// Proceedings of ACM Mobihoc. Urbana-Champaign, IL, May 2005

[5] Akkaya K, Younis M. COLA: A coverage and latency aware actor placement for wireless sensor and actor networks[C]// Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC). Montreal, CA, September 2006: 1-5

[6] 沙超,王汝传,黄海平,等.一种基于多目标遗传优化的无线多媒体传感器网络节能覆盖方法[J].电子学报,2012,40(1):19-26

[7] 班冬松,温俊,蒋杰,等.移动无线传感器网络 k-栅栏覆盖构建

算法[J].软件学报,2011,22(9):2089-2103

[8] Zhang H, Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2005, 1(1/2): 1-15

[9] 车楠,李治军,姜守旭. WSANs 中基于实时性约束的 actor 节点优化部署策略[J].软件学报,2011,22(6):1361-1372

[10] Hounbadji T, Pierre S, Cast S. A distributed addressing and routing system for large scale wireless sensor and actor networks[J]. Computer Networks, 2009, 53(16): 2840-2854

[11] Doss R C, Chandra D, Pan L. Lease based addressing for event-driven wireless sensor networks[C]// 11th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'06). 2006: 251-256

[12] Zheng Y, Falko D. Dynamic address allocation for management and control in wireless sensor networks[C]// HICSS: 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 2007: 292

[13] Gungor V C, Akan O B, Akylidiz I F. A real-time and reliable transport (RT)₂ protocol for wireless sensor and actor networks [J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2008, 16(2): 359-370

[14] Kemal A, Mohamed Y. Coverage and latency aware actor placement mechanisms in WSANs[J]. International Journal of Sensor Networks, 2008, 3(3): 152-164

[15] 温俊,蒋杰,方力,等.异构无线传感器网络的转发连通覆盖方法[J].软件学报,2010,21(9):2304-2319

[16] 孙超,尹荣荣,郝晓辰,等.异构无线传感器网络支配集拓扑控制算法[J].软件学报,2011,22(9):2137-2148

[17] 章韵,巨德文,陈志,等.基于可预测移动汇聚节点的无线传感网分簇算法研究[J].计算机科学,2012,39(6):89-92

[18] 李洪兵,熊庆宇,石为人.无线传感器网络非均匀等级分簇拓扑结构研究[J].计算机科学,2013,40(2):49-52,77

(上接第 95 页)

[15] 华夏渝,郑骏,胡文心.基于云计算环境的蚁群优化计算资源分配算法[J].华东师范大学学报:自然科学版,2010(1):127-134

[16] VMware Capacity Planner [EB/OL]. <http://www.vmware.com/products/capacity-planner/>, 2011

[17] IBM WebSphere CloudBurst [EB/OL]. <http://www-01.ibm.com/software/webservers/cloudburst/>, 2011

[18] 胡冷非.虚拟机 Xen 网络带宽分配的研究和改进[D].上海:上海交通大学,2009

[19] Tang Q, Gupta S K S, Varsamopoulos G. Energy-efficient thermal-aware task scheduling for homogeneous high-performance computing data centers: A cyber-physical approach [J]. IEEE Trans. Parallel Distribute System, 2008, 19(11): 1458-1472

[20] Moore J, Chase J, Ranganathan P, et al. Making scheduling "cool": temperature-aware workload placement in data centers, ATEC'05 [C]// Proceedings of the Annual Conference on USENIX Annual Technical Conference, 2005. USENIX Association, Berkeley, CA, USA, 2005: 5

[21] Buyya R, Ranjan R, Calheiros R N. InterCloud: utility-oriented federation of cloud computing environments for scaling of application services[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP'10). Springer, Busan, South Korea, 2010: 13-31

[22] Wu L, Garg S. SLA-based resource allocation for software as a service provider (SaaS) in cloud computing environments[C]// 11th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing, 2011

[23] Calheiros R, Vecchiola C, Karunamoorthy D, et al. The Aneka

platform and QoS-driven resource provisioning for elastic applications on hybrid Clouds[J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28(6): 861-870

[24] Vecchiola C, Calheiros R, Karunamoorthy D, et al. Deadline-driven provisioning of resources for scientific applications in hybrid clouds with Aneka[J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28: 58-65

[25] Calheiros R, Nadjaran toosi A, Vecchiola C, et al. A coordinator for scaling elastic applications across multiple clouds[J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28(8): 1350-1362

[26] Buyya R, Garg S, Calheiros R. SLA-Oriented Resource Provisioning for Cloud Computing: Challenges, Architecture, and Solutions[C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Cloud and Service Computing (CSC 2011). 2011

[27] Nadjaran toosi A, Calheiros R, Thulasiram R, et al. Resource Provisioning Policies to Increase IaaS Provider's Profit in a Federated Cloud Environment[C]// 2011 IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC 2011). 2011: 279-287

[28] Calheiros R, Ranjan R, De rose C, et al. CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms [J]. Software: Practice and Experience, 2011, 41(1): 23-50

[29] Buyya R, Ranjan R, Calheiros R. Modeling and simulation of scalable Cloud computing environments and the CloudSim toolkit[C]// Challenges and opportunities, International Conference on High Performance Computing & Simulation, (HPCS'09). 2009: 1-11