

移动云: 架构、机制、挑战

张锋辉^{1**}, 包学才², 刘伟荣³, 符茂胜¹

(1. 皖西学院 电子与信息工程学院, 安徽 六安 237012; 2. 南昌工程学院 信息工程学院, 江西 南昌 330099;
3. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:随着通信和计算机技术的发展, 移动云计算的内涵不断扩大, 目前由邻近移动设备通过自组织网形成的移动云成为新研究热点. 由于移动云为其网络中设备提供的服务具有更少带宽占用、更低价格、更小延迟等特点, 因此在移动云计算中具有重要地位. 该文总结近年移动云的相关研究, 并针对架构、机制、挑战3方面展开研究和论述. 首先, 根据计算节点分布及通信和控制架构, 将其分为集中式移动云和分布式移动云, 并针对两类架构及其组件展开论述; 其次, 分析移动云形成、运行和维持的特点, 从激励机制、任务分配和调度机制、隐私安全机制和质量保障机制4个方面进行讨论; 最后, 总结现有文献对移动云研究的不足, 在框架、形成、运行和发展4个方面对未来的研究提出展望, 进一步明确了移动云的研究方向.

关键词: 移动云; 激励机制; 卸载; 服务质量; 架构; 安全

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-7971(2019)03-0484-13

随着计算机和通信技术的不断发展, 移动设备的数据处理及存储能力逐渐增强, 使得过去只能在PC端处理的应用程序也能够移动端进行处理. 但由于移动设备体积小、移动性等特点, 相比传统计算机其处理能力、内存和电池寿命等方面仍有较大的差距, 在处理一些计算密集型任务时需要耗费较长时间和较多电量^[1-2]. 而移动云计算允许设备将任务卸载到云服务器执行, 降低了移动设备的负担并提高了计算能力, 因此移动云计算得到越来越广泛的研究和应用^[3-6].

移动云计算能够减少移动端的电能损耗、提高任务执行效率、增强用户体验^[7-9], 因此被广泛应用于多种移动应用程序, 如图像视频处理^[10-11]、游戏应用^[12]、汽车自动驾驶^[13]和智能交通^[14]等领域, 并且越来越多的应用领域开始使用该技术. 鉴于移动云计算这种巨大的产业潜力, 世界上各大公司也纷纷基于该技术开发了自己的产品, 如苹果公司的Siri、Google公司的Google Map、微软公司的Office365等, 中国的阿里巴巴、腾讯、百度、华为等产业巨头也开发了基于移动云计算的产品, 希望

在未来的云计算产业中抢占领先地位.

在移动云计算中, 移动端可将任务卸载至远程云计算中心、本地微云或由附近移动设备组成的移动云中执行, 其体系架构如图1所示. 但卸载任务至远程云计算中心会造成较长的时间延迟, 如文献[5]指出从全球260个接入点将任务卸载至亚马逊EC2的平均延迟时间为74 ms, 一些任务延迟时间甚至为成百上千毫秒, 因此在实际应用中移动设备多将任务卸载至本地微云或移动云. 而移动云是由附近移动设备通过自组织网络形成^[15-16], 相比微云其具有建设投资少、耗电率低、资源利用率高等优点^[17-22], 且不需要依靠通信基础设施, 能有效降低运营成本^[23], 因此移动云逐渐成为移动云计算中的研究热点.

1 移动云

移动云由附近移动设备(节点)组成, 这些节点通过激励机制提供资源, 采用自组织网形成计算实体, 为附近设备提供云计算资源^[24-25]. 由于计算服务就近快捷、组织形式灵活多样等特点, 可有效应

收稿日期: 2018-06-21; 接受日期: 2019-02-12; 网络出版日期: 2019-04-23

基金项目: 安徽省自然科学基金(1908085MF213); 安徽省教育厅重点项目(KJ2018A0411, KJ2018A0414); 安徽省高校自然科学研究重大项目(KJ2015ZD44).

**通信作者: 张锋辉(1982-), 男, 河南人, 博士生, 副教授, 主要从事移动云计算、机器学习、随机优化方面的研究, E-mail: zfhiwillwin@163.com.

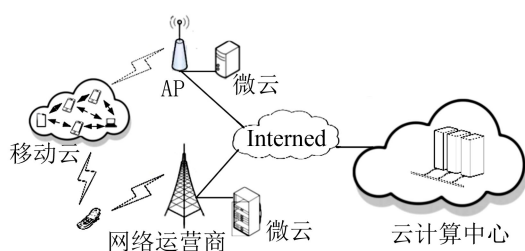


图 1 移动云计算系统

Fig. 1 Mobile Cloud computing system

用于人群密集或无线网络连接弱等环境中,其典型应用如移动环境下的自动视频跟踪、语音识别等[26-27]。与传统云计算不同的是,移动云节点具有移动性且计算资源受限,因此实时位置感知能力与资源高效利用是移动云需要具备的主要特点。另外移动云也要求具有能耗低、容错能力强、安全性能高等特点。鉴于移动云和传统云具有各自的应用特点,且在组织架构、管理机制等方面也存在较大不同,因此国内外研究人员对移动云进行了深入探讨。但关于移动云的研究仍处于初级阶段,在该方面的研究论述目前仅见一篇报道,是Yaqoob撰写的关于移动自组织云综述[28],该研究主要关注分布式移动云,未对移动云架构机制做出分析和总结。

为此,我们对近年来移动云的研究工作进行归类和梳理,把移动云前期成果概括为3个层次,如图2所示。并在讨论中按照这个研究框架逐一进行分析、归纳和总结。首先针对最上层的移动云架构研究进行了分类分析,按照管理方式不同可将其分为集中式和分布式架构,并分析两类架构和组成部件的特点;然后总结组件的功能并按照移动云形成、运行和发展的特点得到各方面的运行机制,分析了关于移动云运行机制相关研究,对现有的机制进行归纳分类,得到激励机制、任务卸载机制、安全及隐私保护机制和质量保障机制;最后分析现有的机制存在的问题以及移动云发展的方向,总结出移动云存在的问题,并对未来移动云研究面临

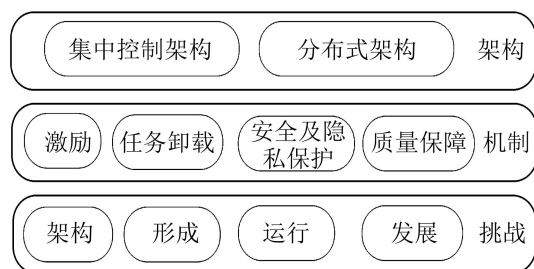


图 2 移动云研究框架

Fig. 2 Research framework of Mobile Cloud

的挑战进行探讨,从移动云架构、形成、运行及发展等4方面进行详细阐述,为将来进一步深入研究提供理论参考。

2 移动云架构

移动云由分散的移动节点组成,按照节点的管理和连接方式可以将其分为分布式架构和集中式架构。在分布式架构中,节点和附近的设备需要进行信息交换,并实时感知周围设备的状态,在进行任务卸载时,根据所处的情景将任务分割并进行卸载。在分布式架构中节点之间具有平等的地位,任何节点都可以向周围节点卸载任务或执行被其他节点卸载的任务。在集中式架构中,移动云中不存在中心控制节点,该节点实时感知周围节点状态,负责管理移动云的资源、记录节点状态,并执行卸载任务的分配和调度,而其它节点进行任务的计算。

2.1 分布式移动云 在分布式移动云中节点的地位相等,且每个节点具有相同的模块,以保证能迅速组成移动云。确保节点能够发现周围节点并进行任务卸载是分布式移动云的基本保证,尽可能高效地完成计算任务是分布式移动云设计的核心。分布式移动云一方面要求各个节点具有相同的任务卸载权力,另一方面需保证计算任务的完成具有低时延、低能耗、高效率的特点。

典型分布式移动云架构由Huerta首次提出[29]。该架构按照组件功能不同分为5个模块,其架构如图3所示。

在这些模块中应用管理模块主要负责本地设备的应用程序分析,判断是否需要进行卸载,并按照需求将该应用划分为不同的任务进行卸载。与卸载到远程云和微云不同,该模块需要根据情景将任务卸载到周围分散的节点上。资源管理模块主要功能是负责本地设备的应用剖析和资源监控,并实时向应用管理模块提供本地资源监控信息。应用剖析用于分析应用程序所需资源量和需卸载的节点数量,当应用管理模块决定进行卸载时,该模块将发挥作用。情景管理模块用于同步情景信息,包含情景感知、情景管理、社交管理3个部分,该模块判断节点所处情景并决定任务卸载策略。P2P通信模块负责本机位置跟踪和附近设备发现,实时感知周围移动设备的状态,并将状态变化实时发送到情景管理模块和卸载管理模块。卸载管理模块负责管理本地任务,将任务卸载到移动云内其他运算节点处

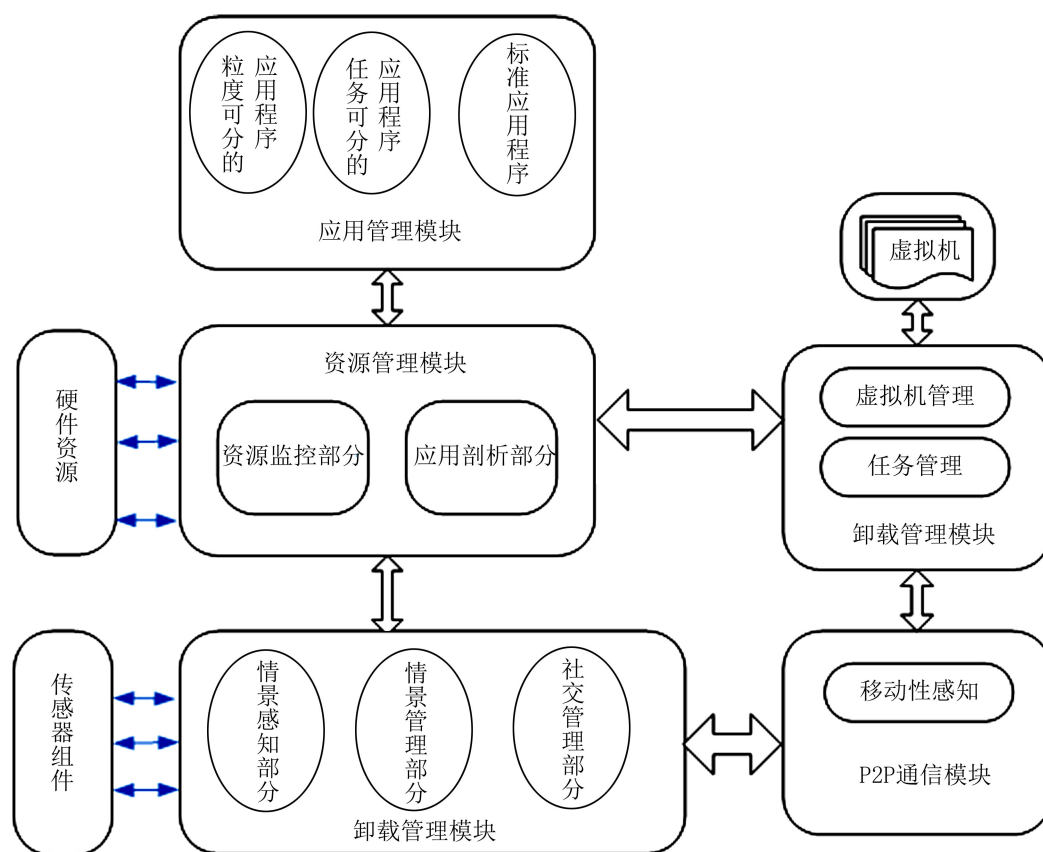


图 3 分布式移动云节点管理架构

Fig. 3 Node management architecture of distributed Mobile Cloud

理,同时该模块还负责管理接收的其他节点的任务并负责处理.当进行任务发送、接收或等待时,该模块和 P2P 通信模块进行联系,并负责检测任务执行状态.

该框架实现移动云的基本功能,并且分模块建立了分布式移动云的架构.但在该架构下节点提供资源是基于自愿原则,不能形成稳定且长效的移动云,且模块之间信息交互过于频繁,不利于节点节省资源.因此 Fernando 等按照节点发现、价格协商、任务处理的流程提出了基于流程的分布式移动云架构^[30].该架构添加了成本管理模块解决移动云形成中节点的自主性,其架构如图 4 所示.

该架构中资源管理模块负责附近节点发现、资源监控和情景管理,任务管理模块根据各个节点资源情况进行任务划分和调度,并在任务卸载前通过成本管理模块同周围节点进行协商,确定资源价格.基于流程的分布式移动云架构结构简单便于实现,同时增加激励功能使节点提供资源并获得收益,提高移动云结构的稳定性,解决了 Huerta 提出

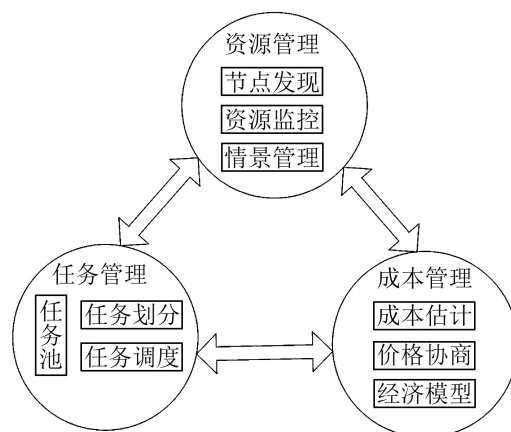


图 4 基于流程的分布式移动云架构

Fig. 4 Distributed Mobile Cloud architecture based on process

模型中节点的自主性问题.

虽然基于流程的分布式移动云架构具有较多优点,但其缺乏安全及隐私保护模块,为了增加此项内容,Shila 等提出了 AMCloud 架构添加了安全模块^[22].AMCloud 采用自动服务管理架构,该架构通过可选接口和管理接口进行虚拟资源管理,两个接口可同时调用资源,在管理接口中增加了安全模

块, 提高移动云的安全性。

由于节点的移动性带来数据传输的不稳定, 因此移动云中容错性能成为制约其使用的关键, 对此 Zhou 等提出了基于情景感知的任务卸载框架, 增加了失败恢复模块和卸载决策模块弥补了上述架构不足^[31]。在卸载决策模块中, 节点依据成本估计模块的计算结果选择将任务卸载至远程云, 微云或移动云, 增加了任务卸载的灵活度。失败恢复模块对不同情景下任务执行失败概率进行评估, 依此进行任务卸载的决策。

分布式移动云实现在节点分散条件下云服务器的组网, 实现就地进行云计算的功能。但由于通信距离的限制和计算节点具有分散性、移动性、异质性、资源动态性等特点, 使得分布式移动云的使用范围小, 进行任务卸载时失败率高等问题, 为避免这些难题, 部分研究者提出了集中式移动云。

2.2 集中式移动云 将高度分散的移动节点进行统一管理, 由控制节点进行任务分发和调度弥补了分布式移动云的缺点, 集中式架构能够隐藏节点硬件资源的异质性和地理位置, 更加注重移动性管理, 具有应用范围大, 容错性能好和计算效率高等优点。

Khalifa 等提出的星云 (PlanetCloud) 使用了集中式管理架构^[32]。包含云节点 (Cloud Agent, CA)

和租用节点 (Tenant Agent, TA) 两类。CA 运行在固定控制节点上, 召集周围 TA 形成移动云, 并通过跟踪 TA 进行资源管理。CA 一般部署在高性能的固定节点上并存储 TA 相关的时空资源数据。TA 运行在移动的计算节点上, 它负责提供资源并

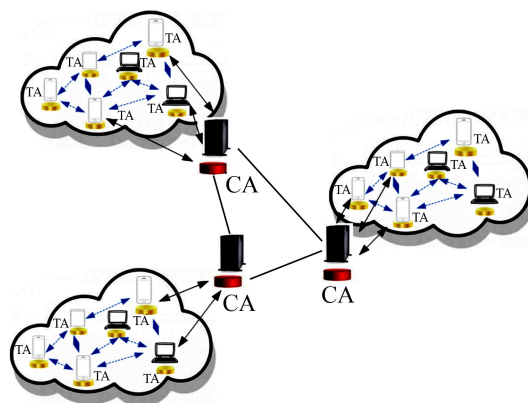


图 5 集中式移动云

Fig. 5 Centralized Mobile Cloud

同步其时空信息和资源记录到 CA, 其结构如图 5 所示。

PlanetCloud 采用位置感知的可信任任务管理平台, 将用户任务定义为一组二进制变量, 依此决定任务执行的节点。在该架构中 CA 的空时资源记录和资源预测机制提供了对 TA 资源实时调度和动态跟踪。CA 的这些功能增强了在动态环境下移动

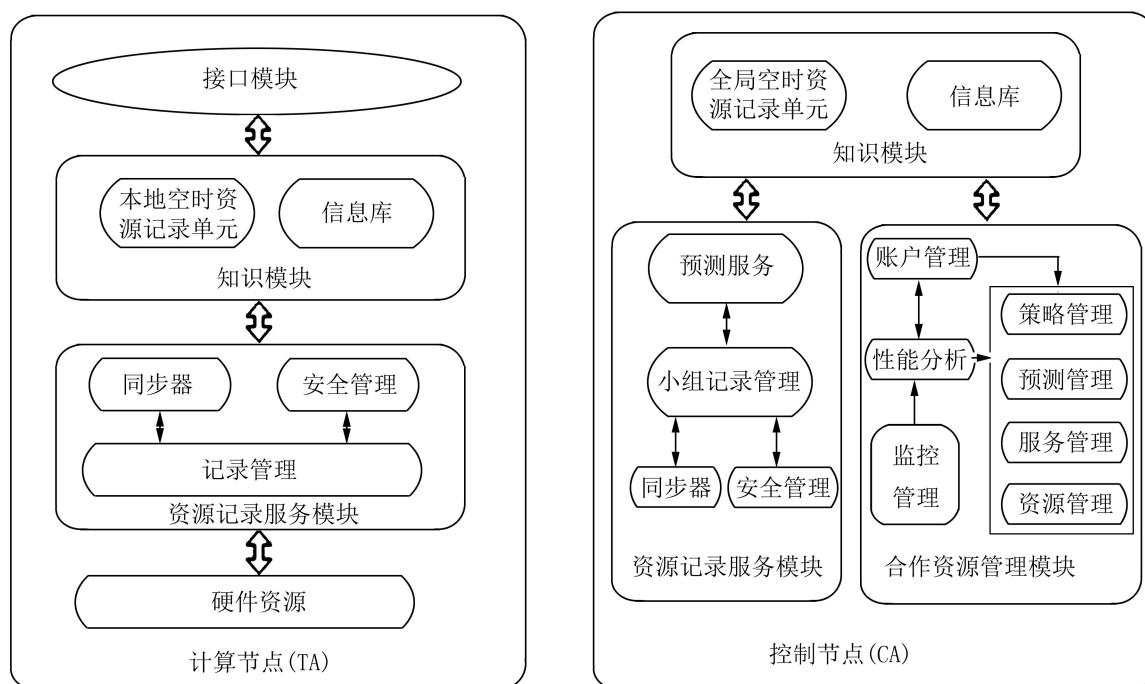


图 6 集中式移动云节点管理架构

Fig. 6 Node management architecture of centralized Mobile Cloud

云的稳定性,为随时随地提供云计算资源打下基础,CA 和 TA 的结构示意图如图 6 所示。

在 TA 中接口模块负责计算节点和其用户的交互,并且定义该节点形成移动云的条件。知识模块用于存储移动云形成中的相关协议,包含两个子单元:本地空时资源记录单元和信息库,其中空时资源记录单元用于记录可提供资源量的时间和空间信息,信息库记录 CA 发布形成移动云的必要信息,如服务等级、资源需求量和支付费用等信息。资源记录服务模块主要用于同步和管理本地的空时资源记录、监控参与者的资源使用状态并提供信任管理等安全操作,其包含同步器、安全管理、记录管理 3 个模块。

CA 由知识模块、源记录服务(GRCS)、合作资源管理模块 3 部分组成。其中知识模块用于存储 CA 控制范围内 TA 节点的空时资源记录(包括:时间、空间信息和剩余资源信息)。小组资源记录服务(GRCS)根据知识单元的内容进行资源的获取、调度、跟踪与预测,它包含的 4 个子模块分别是小组记录管理模块、同步器、预测服务模块与信任管理服务器模块。其中小组管理模块管理由同步器同步的全局空时资源记录,预测服务模块依据此来进行资源预测,这些模块保证了计算任务被高效的执行。合作资源管理模块用于在动态环境中管理资源调度和任务分配,包含 4 个子模块分别是:云管理、监控管理、性能分析和账户管理。其中云管理子模块用于形成、维持和解散移动云,它包含策略管理、预测管理、服务管理和资源管理四个部分。监控管理周期性的监控计算节点的各项性能和工作负载,为性能分析模块提供计算节点的测量数据。性能分析子模块用于分析监控模块收集的数据,并估计节点的计算性能和服务等级,帮助提前检查错误,并将信息发送至账户管理模块。账户管理子模块用于根据每个节点的服务等级判断支付的价格。

在 PlanetCloud 中包含集中式移动云的基本模块,其侧重于资源管理和任务调度,保证了任务的高效执行,但缺乏一定的安全措施,无法对恶意使用资源的节点进行惩罚。为此 Abdullah 建立基于记录的移动云管理架构,弥补了 PlanetCloud 的不足^[33]。该架构的控制节点分全局控制节点和局部控制节点两类,分别具有全局记录数据库和局部记录数据库,主要记录节点当前的位置、能量、存储

空间和提供资源的意愿度。当节点移动到另外的移动云时,其各项记录从全局数据库复制到节点所在移动云的局部数据库中。该架构保证各个节点始终在记录的范围内,避免了节点恶意使用资源。

集中式架构采用资源估计的方法,降低了设备因为移动及资源使用动态性带来任务执行失败的概率,在更大范围内覆盖了移动云的计算节点,能够更有效的进行任务调度。但相比分布式移动云,集中式管理方式缺少灵活性,并且会带来更多通信能耗。

分布式和集中式两种架构的移动云虽然具有不同的形态,但都实现了随时随地进行移动云计算的功能,它们包含的基本模块具有一致性,如移动云形成、任务执行、移动云安全模块及质量控制模块。从模块的具体功能和相互联系总结了移动云运行的机制。

3 移动云的机制

在移动云框架下,安全、高效执行计算任务的前提和基础是移动云机制的设计。根据移动云形成、运行和维持的特点将移动云工作机制分为 4 类:移动云形成的激励机制、任务卸载机制、安全及隐私保护机制和服务质量保障机制。

3.1 移动云的激励机制 在执行任务的过程中,移动云的计算节点需执行分配的任务,这些任务的运行必然影响节点自身的程序运行。如果没有一定的激励机制,节点则没有动机持续提供资源,因此一套成熟的激励机制是移动云形成的必要条件。由于计算节点硬件资源、电池容量、软件配置等具有异质性,因此具有灵活和可操作性是设计激励机制的关键。常用的激励机制包括:账单记录、博弈、竞价、优化等方式。每种方式的描述及优缺点对比如表 1 所示。

基于账单记录的激励机制由 Song 等较早提出,账单记录指中心控制节点记录每个节点提供和消费的资源信息,并依据此为节点提供相应的云计算服务^[34]。该机制采用开关的方法提供资源,首先在中心节点上设置计算节点提供和消费资源的比率,当节点消费的资源超过一定比率时,暂停该节点使用资源的权力,只有继续提供资源并且达到一定量时,才可继续使用资源。该机制鼓励移动节点向移动云提供资源,但没有考虑设备之间的异质性和计算节点的移动性,当节点移动进入另外的移动

云时又可以使用资源. 针对此 Yousafzai 等提出了控制节点联合记录的跟踪奖惩机制^[33], 各个移动云控制节点交互记录信息, 避免因节点移动性带来的资源使用欺诈问题, 从另一方面激励设备提供资源到移动云. 但使用账单记录的方式具有一定的强制性且没有考虑设备之间的个体差异.

采用博弈的方法激励设备提供资源, 避免了账单记录方式的缺点, 使资源提供节点和需求节点具备更大的灵活性. Wang 等使用了 Stackelberg 博弈的方法鼓励移动设备提供资源^[35], 资源申请节点提出单位资源价格, 资源提供节点根据自身的收益函数提供相应的云计算资源, 经过博弈实现双方满意的资源提供量. 但采用博弈的方法没有考虑计算

任务可分割性.

针对多个节点的情况, Tang 提出了双向竞价机制激励设备向移动云提供资源^[36]. 该方案采用集中控制的框架, 一方面资源提供者向控制节点提出单位资源的价格, 另一方面资源需求者根据自身的任务量提出单位资源价格, 控制节点根据双方出价进行匹配. Noor 等引入基于信誉的竞价机制鼓励移动端提供资源^[18]. 采用该机制的移动云使用分布式架构, 资源提供方提出资源价格, 资源使用方根据价格和信誉挑选计算节点运行任务, 同时在执行过程中根据计算节点完成质量的高低修改其信誉评分, 依此鼓励资源提供方提供较低价格的同时提升服务质量. 使用竞价的方法能够提高节点提

表 1 激励机制

Tab. 1 Incentive mechanism

方法	描述	优点	缺点
账单记录 ^[33-34]	通过记录消费和提供的资源量激励节点提供资源	便于使用, 不产生费用	不适用于与分布式移动云, 须有大量存储空间
博弈 ^[35]	买方提出单位资源价格, 卖方提出相应的资源量, 最终达到博弈均衡	便捷易用, 可随机进行云计算	不适用于多个买家, 多个卖家的场景
竞价 ^[19,36]	卖方提出价格, 买方或控制节点挑选卖方	能够找到更好的计算节点, 效果好	适用于买方市场, 会造成节点多次竞价失败而退出
优化 ^[37]	优化整体收益, 并且兼顾买卖双方的收益	整体及个体都能达到最优	每个节点收益函数确定较难
演化市场 ^[38]	在节点稀疏条件下建立资源交易市场, 形成移动云	节点稀疏条件下实现云计算功能	计算收敛速度慢, 通信成本高

供资源的积极性, 但这些方法没有考虑任务可分割性、设备的移动性和异质性.

采用优化的方法也能提高节点的积极性, Zhang 等采用凸优化方法不仅考虑了系统整体收益还考虑到个体之间的差异性, 根据此差异进行价格协商及任务分配, 提高了节点提供资源的积极性^[37], 但定义每个节点收益函数的参数存在困难.

Cristian 等使用了演化市场方法激励附近的移动端提供计算资源^[38]. 该方法在个体特性不同、间断连接及移动性等条件下创建了计算资源市场, 资源提供节点提供资源并询问价格, 并在 Lewis 解决方案下实现了最优价格. 此方法创建了移动性及连接间断性下的资源交易市场, 激励了移动端提供和购买资源, 但该方法收敛速度较慢, 造成应用性不佳.

在已有的研究中可将激励机制分为两类, 一类是价格激励机制, 该机制中计算节点提供服务后便

可立即获得回报, 更适合于分布式架构; 一类是账单记录的机制, 节点在提供或使用资源后, 在控制节点处有账单记录, 依此激励用户提供资源, 该方式更适合于集中控制类型的移动云.

3.2 任务的卸载机制 在移动云中由于网络的异构性、设备的异质性与移动性等因素, 导致任务卸载和传统云计算有较大差别, 特别是移动云具有众多场景, 不同场景下移动云任务卸载具有较大差异. 我们研究现有文献, 将每种任务卸载机制的描述及优缺点总结如表 2 所示.

面对移动云节点所处的网络环境复杂多变的情景, Lu 等提出异构无线环境下任务的卸载机制^[39]. 该机制考虑任务卸载的通信延迟、处理延迟和排队延迟等限制, 在平均延迟最小的条件下判断任务执行的方式和需要卸载的节点数, 并依此进行任务的卸载. Zhou 等根据移动设备所处的环境提出情景感知的计算卸载方案^[31], 该方案根据周围云的

表 2 任务卸载机制

Tab. 2 Task offloading mechanism

方法	描述	优点	缺点
基于情景的任务卸载 ^[31,39-42]	根据网络复杂性、环境多变性、节点移动性,通信距离不确定性等不同情景设置相应的任务卸载方案	考虑具体情景进行任务卸载,能够达到较好效果	情景较单一,不能适应于复杂变化的场景
基于记录的任务卸载 ^[19,43-44]	将节点可信度、可靠性、执行时间等分为不同等级进行任务卸载和分配	挑选性能最好的节点进行卸载,提高移动云性能	不能适用于分布移动云,需要有一定的存储空间
基于优化的任务卸载 ^[42,44-48]	寻找最优的多个节点进行任务卸载,提高移动云性能	达到整体最优的任务卸载性能	需要获知每个节点的具体参数,前期需要收集大量数据
基于目标的任务卸载 ^[28,49-53]	根据节点对时间、能耗、效用等进行基于单一目标的任务卸载	针对不同需求的移动云节点,能达到较好的效果	目标单一,不能适应多种需求的移动云节点

特点、无线网络特征设置不同的情景,并依此进行任务卸载.另外针对节点的移动性,Tham 等提出了多阶段任务卸载方案,将任务卸载分为多个阶段,根据所处环境进行卸载^[40].Malhotra 等针对多跳移动云情景下提出了相应的任务卸载方案^[41].Truong 等提出了节点随机移动情景下的任务卸载方案^[42].

在相同情景下节点也具有不同的任务卸载方案,这些方案主要包括记录、优化等.在基于记录的任务卸载方案中,Noor 等根据节点的可信度和可靠性将计算节点分为不同等级,并将任务卸载至高等级的节点上^[18].Chen 等将根据移动云中节点执行任务的时间延迟,将节点分为不同等级,并依据任务特征进行卸载^[43].Venkatraman 等将节点任务执行的时间划分为广播时间、执行时间、传输和接收时间,并依据执行任务的时间给节点打分,卸载时将任务卸载至分数最高的节点上^[44].在根据记录的任务卸载中,卸载节点需具有较大存储空间,因此该卸载方案更适合于集中式移动云.

节点进行任务卸载的根本目标是使任务的执行具有更短时间或更低的能量消耗,因此采用优化的方法进行任务卸载是移动云中使用较多的方法.智能算法在其中扮演者重要角色,Huang 等提出基于粒子群优化和模拟退火算法进行任务卸载^[45],Benkhelifa 和 Li 分别采用遗传算法和启发式算法进行任务卸载^[46,47].针对资源使用的动态性 Chen 等提出动态资源分配和计算卸载的方法^[48],同样线性规划和多阶段规划也被使用于任务卸载中^[42,44],但依据这些方法进行任务卸载时,必须知道每个计算节点的具体参数和网络特征,这将会给移动云节点带来一定的通信负担,造成较高的电量损耗.

在移动云任务执行中,根据所需的时间、能耗等情况,研究人员也提出了多种节点卸载的方案.其中 Kristensen 等为提高计算效率提出 Scavenger 的网络觅食系统^[49],节点进行卸载时考虑了数据位置、网络容量、设备强壮性和任务复杂性等因素,依此判断该任务在本地执行或是在云端执行. Shi 等提出一种高能量效率的任务卸载方法^[50],其中自适应概率调度器保证在完成时间条件限制下,用更低能耗完成任务的执行.该方法具有高能量效率,并具有一定的可扩展性和灵活性,但是计算复杂度限制了该方法使用. Guo 提出了一种旨在降低能耗和计算成本的任务卸载机制^[51].该机制使用两阶段 Stackelberg 博弈的方法.资源提供节点提出资源量,资源需求节点根据提供量设置价格.该方法能够降低能耗和成本,但该方法没有考虑设备之间软硬件的异质性. Azar 提出多准则判决模型,根据节点间距离、传输延迟,位置稳定性、移动速度进行判决而后进行计算卸载,以提高卸载总体效用^[27]. Akinola 等为了缩短任务执行时间提出基于反馈的服务选择和计算卸载^[52]. Le 等使用马尔科夫决策的方法得到节点的卸载策略,缩短任务卸载时间^[53].

云计算的优点主要体现在节省任务执行时间,降低设备能耗,提高用户体验等方面,但不同场景移动云计算节点的分散性和移动性存在差异,因此针对多场景下,考虑降低能耗,减少执行时间和降低成本等为主要目标的任务卸载和分配机制是当前研究的重点.

3.3 安全及隐私保护机制 移动云是由一些独立的计算节点组成,保障这些节点的隐私和安全是移

动云存在和维持的基本保证. 但移动云中节点的接入具有一定随机性, 节点间组网具有一定任意性,

因此保障节点隐私、通信安全及防止恶意节点接入是研究重点. 我们总结了近年来关于移动云安全

表 3 安全及隐私保护机制

Tab. 3 Security and privacy protection mechanism

方法	描述	优点	缺点
通信安全保障 ^[54,57]	通过密钥管理和加密技术提高通信安全性	能够管理节点并保障通信安全	遍历机制会造成一定的延迟
隐私保护 ^[55,59]	通过隐私保护和友好匹配的方法保护位置和数据隐私	保障数据隐私和位置隐私, 同时确保较高的服务质量	较高的系统开销
防止恶意节点加入 ^[56,60]	通过计算可信值得到节点信任度保证移动云安全性	确保每个节点都具有较高信誉, 保障移动云安全	需要计算每个节点的可信值
节点认证 ^[58]	通过密码技术和随机数生成技术保证安全性	保障节点安全性同时减少存储空间	不能适用于分布式移动云

及隐私保护的方法及优缺点, 并将其总结如表 3 所示.

Lacuesta 等提出了一种安全算法, 保证移动云的网络安全^[54]. 该方法确保移动云中通信节点的安全性和可靠性, 另外还帮助管理新加入和离开的节点并保证其安全性. 该算法采用简单密钥管理功能的 AES 加密技术, 保证节点通信的安全性. 但其缺点是与不加密的通信相比具有一定的时延.

Gong 等提出了一种安全机制, 确保在移动云在进行任务分配时保护用户的位置隐私^[55]. 该机制使用基于隐私差分的方法保证用户在共享资源的同时位置隐私不被泄露. 该方法在确保服务质量前提下保护了用户的位置隐私.

Hammam 等提出了一种可应用于移动云的可信管理系统 (TMC)^[56], 以防止恶意节点加入移动云而保证其安全性. 系统通过观察节点的行为计算每个节点的可信值并存储在数据库中, 允许可信值高的节点继续使用资源而剔除可信值较低的节点. 该方法可以保证移动云的安全性, 但只能应用于集中式移动云架构, 不能应用于分布式移动云.

Mandal 等提出的方案是基于移动云节点之间建立成对密钥的原则, 实现移动云节点之间的通信安全^[57]. 该方案能够达到较好的效果, 但是该方案适用于集中式的移动云, 缺乏并行执行支持, 不适用于分布式移动云.

Lun 等提出了一种分布式移动云计算服务的高效认证方案^[58]. 该方案基于双线性配对密码系统和动态随机数生成技术. 它减少云服务提供商与传统可信第三方服务之间通信和计算所需的认证处理时间, 从而减少了在相应云服务提供商上存储

空间的使用, 更适用于存储空间较少的移动云.

Li 等提出了应用在移动云中的可扩展友好匹配隐私保护机制 (SPFM)^[59]. 该机制通过打乱原始个人数据并产生一定概率的屏蔽序列机制来避免个人的信息泄露. 该设计保证数据在打乱之后保持统计的相似性, 保证了数据的安全性和可用性. Dbouk 等人提出了基于移动云计算的入侵检测, 降低计算节点被入侵的风险^[60]. 这些安全机制适用于移动云, 但仅适用于某一方面, 如隐私保护、节点安全保护等, 而移动云安全机制既要保证通信安全也要保证节点的隐私和安全性, 因此设计具有全方位安全及隐私保护机制是未来研究方向.

3.4 服务质量保障机制 服务质量的保障是移动云存在和发展的前提. 由于移动云的计算节点具有移动性、分散性及软硬件的异质性, 这些特点将导致数据传输易失败、计算不稳定、服务质量不达标等问题. 针对此, 一些研究者对移动云服务质量保障机制进行了研究, 我们将这些成果总结为表 4 所示.

Chen 等针对移动云的特点提出了一种低能耗的数据容错方法^[61]. 该方法采用 k-out of -n 的方法, 将数据存储在 n 个节点, 当 n 个节点中有 k 个节点存在时便可计算出任务结果. 该方案保证在节点移动的条件下, 提高任务执行的完成率. 但该方法中参数 k 和 n 的选择需根据任务所需服务等级进行判断.

Li 等针对在移动云存储遍历搜索中的带宽和能量耗费较高的问题提出能量和流量节省的机制 (TEES)^[62]. 该机制优化移动云节点之间的通信, 在保证节点隐私的条件下提高计算速度、降低能耗

表 4 质量保障机制

Tab. 4 Quality of service assurance mechanism

目标	描述	特点
提高计算完成率 ^[61]	数据分配到节点的数量大于执行任务的节点数量	保证任务的完成率,但增加了通信成本
降低执行时间或能耗 ^[62-64]	采用搜索或改进遍历算法降低执行时间或能量	降低任务执行时间和能量,但遍历时增加了通信成本
提高执行效率或提高用户体验 ^[65-67]	根据节点特征或节点资源进行任务分配,提高执行效率和用户体验	提高用户体验,但需实时感知每个节点的状态

并减少通信流量. Li 也针对该问题提出了最近 k 邻居节点的有效多关键词搜索方案,在隐私保护的前提下提高搜索方案效率并减少能量消耗^[63]. Ma 提出了有效的遍历搜索方法,在提高了搜索效率的同时降低服务时间^[64].

Yaqoob 等提出了异质性感知的任务分配机制^[65]. 该方案根据移动云中的 CPU、内存等资源的不同以及节点现有的工作量进行任务分配减少执行时间、降低执行能量、提高服务质量.

Qiu 等针对移动云中节点内存余量不同的问题,提出了能量感知的多维动态数据分配算法,将数据块分配到不同的内存以提高执行效率、降低内存消耗、保障服务质量^[66]. Liu 等提出移动云整体优化方法,提高服务可靠性和用户体验^[67]. 这些方法在保证系统可靠性的基础上提升服务质量.

4 挑战

在移动云的发展中,近些年来研究人员从架构、机制等方面对其进行了深入探讨并取得了可喜成绩. 但面对未来众多应用场景,以及计算节点的移动性、异质性、接入的随机性等众多情景,移动云在多个方面的研究还面临挑战. 我们将这些问题进行分类,认为在移动云架构、移动云形成、移动云运行、移动云发展等 4 方面还存在较大挑战,同时也具有较高的研究价值.

4.1 移动云架构 架构的设计是移动云形成的先决条件,也是其运行和发展的基础. 由于移动云中计算节点仅具有有限的资源,而现有的架构需要占用较多的存储容量,因此构建低存储容量的轻量级移动云架构是其进一步发展的有力支撑. 另外各个功能模块设置较多,模块之间需要进行频繁的信息交互,这导致了计算效率下降和能耗增加,因此降低模块的复杂度,减少模块间通信损耗和模块内计算损耗的移动云架构也是未来该领域的重要研究

方向.

针对轻量级移动云架构的设计,可以从节点发现、移动云形成和运行的流程入手. 设计高效节能的节点发现模块,构建通信量少、服务质量高的计算卸载及分配模块,得到能够适应计算节点移动性,并能实时加入和退出的运行模块是移动云设计关键. 在未来,建立易于进行分布式计算、适应于多种情景、便于移动云形成、运行的架构具有重要挑战.

4.2 移动云形成 激励计算节点提供资源是形成移动云的基础,目前该研究主要集中于将节点形成资源交易市场或由控制节点进行资源提供和消费的登记,这些激励方式仅适用于特定情景. 由于节点的资源具有异质性,节点所处的情景具有复杂性以及节点网络具有异构性,并且不同情景中移动设备的分布特点、移动特点和网络特点均不同,设计面向多样化节点和情景的自适应激励机制是移动云形成的关键,也是未来研究的方向.

能够实时感知周围节点的数量与状态的变化也是移动云形成的关键,由于节点的移动性,其邻居节点会不断变化,且每个邻居节点的状态也在动态变化,实时感知周围节点数量能及时形成移动云并进行任务卸载和调度. 但频繁的感知周围节点变化需耗费移动节点较多的能量和通信成本,因此设计具有智能感知的低功耗节点感知技术也是未来该领域的研究方向.

4.3 移动云运行 在移动云运行中,任务的卸载和分配是保障移动云计算质量的关键. 与远程云、微云等有较大区别,移动云由剩余电量和计算能力不同的计算节点组成,且计算节点具有移动性、离开及加入移动云具有一定随机性、提供相同资源所带来的是收益具有不确定性,因此研究更全面的具有实际应用价值的计算节点效用函数,并以此为基准建立适应于动态条件下任务卸载和分配方法

是研究移动云运行的关键。

节点在移动云中进行计算卸载时,需要把任务进行粒度划分而后进行计算卸载,并返回计算结果。如果任务划分过大则不能适应于移动云计算节点分散的特点,因此研究适应于移动云高效运行的更小粒度的程序结构也是移动云未来的研究方向。

云计算系统是由云计算中心、微云和移动云组成,为提高任务执行效率,在任务卸载的过程中需要充分利用三类云,因此设计能够协调多种类型的云、充分利用它们的优势的运行机制也是提高移动云运行效率的关键。

4.4 移动云发展 由于移动云计算节点的独立性和分散性,保障节点隐私和安全性能确保移动云长期保持稳定,以及在此基础上提高移动云服务质量是其发展的重要条件。但移动云节点具有资源有限性,研究在进行安全和加密的同时确保更少的资源占用是未来的研究方向。为增加移动云的吸引力,提高移动云服务质量,如缩短计算时间、降低能量损耗和提高用户体验是其研究的重要方面,设计能够融合多种情景的适应于多需求的节点质量保障机制也是未来的研究方向。

5 总结

移动云作为移动云计算的重要组成部分,在很大程度上弥补了远程云和微云的不足,在军事、环境监测、车联网等方面也有广阔的应用前景,同时也可以应用在基础设施仍不完备的偏远地区。但目前移动云的研究仍处于初级阶段,特别是移动云的架构设计还不完善,移动云的机制研究有待提高等。为此需要深入研究架构设计和机制建设,这涉及到各种技术方法,是目前移动云领域内的研究热点,但这些方法与实际的应用之间仍存在较大的距离。

本文研究了移动云在架构设计、机制建设中面临的挑战,以及解决这些挑战需要的各种关键技术。总结了近年来在移动云架构、机制上的研究,将移动云架构分为集中式移动云和分布式移动云两种类型,并针对框架中的组件及组件之间的联系,结合移动云形成、运行及发展的特点,将移动云运行机制归纳为激励机制、任务卸载机制、隐私及安全保障机制、服务质量保障四个机制。并根据目前移动云存在的问题和发展趋势,阐述了在移动云架构、形成、运行及发展等4个方面的研究趋势

和面临的挑战,为该领域今后的研究提供一定借鉴与指导。

参考文献:

- [1] Fernando N, Loke S W, Rahayu W. Mobile cloud computing: A survey[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2013, 29(1): 84-106. DOI: 10.1016/j.future.2012.05.023.
- [2] Wang Y, Chen I R, Wang D C. A survey of mobile cloud computing applications: perspectives and challenges[M]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 80(4): 1 607-1 623.
- [3] Liu J, Ahmed E, Shiraz M, et al. Application partitioning algorithms in mobile cloud computing: taxonomy, review and future directions[J]. *Journal of Network & Computer Applications*, 2015, 48(C): 99-117.
- [4] Ghasemi-Falavarjani S, Nematbakhsh M, Ghahfarokhi B S. Context-aware multi-objective resource allocation in mobile cloud[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2015, 44(5): 218-240.
- [5] 崔勇, 宋健, 缪葱葱, 等. 移动云计算研究进展与趋势[J]. *计算机学报*, 2017, 40(2): 273-295.
Cui Y, Song J, Miu C C, et al. Mobile cloud computing research progress and trends[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2017, 40(2): 273-295.
- [6] Xie K, Wang X, Xie G, et al. Distributed multi-dimensional pricing for efficient application offloading in mobile cloud computing[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*. DOI: 10.1109/TSC.2016.2642182.
- [7] Lee K, Lee J, Yi Y, et al. Mobile data offloading: how much can WiFi deliver?[J]. *Acm Sigcomm Computer Communication Review*, 2013, 21(2): 536-550.
- [8] 张锋辉, 符茂胜, 郁书好, 等. 基于随机博弈的云代理与私有云盟的最优收益[J]. *计算机应用研究*, 2018, 35(11): 3 385-3 388.
Zhang F H, Fu M S, Yu S H, et al. Optimal revenue of cloud broker and private cloud federation based on stochastic games[J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(11): 3 385-3 388.
- [9] Fang W, Yao X, Zhao X, et al. A stochastic control approach to maximize profit on service provisioning for mobile cloudlet platforms[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems*, 2018, 48(4): 522-534.
- [10] Fernando N, Loke S W, Rahayu W. Mobile cloud computing: A survey[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2013, 29(1): 84-106. DOI: 10.1016/j.future.2012.05.023.

- [11] Canny J, Zhao H. Big data analytics with small footprint: squaring the cloud[C]. ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, New York, USA, 2013: 95-103.
- [12] Bahga A, Madiseti V K. Analyzing massive machine maintenance data in a computing cloud[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2012, 23(10): 1 831-1 843.
- [13] Shang W, Jiang Z M, Hemmati H, et al. Assisting developers of big data analytics applications when deploying on hadoop clouds[C]. IEEE International Conference on Software Engineering, San Francisco, USA, 2013: 402-411.
- [14] Zhao W, Sun Y, Dai L. Improving computer basis teaching through mobile communication and cloud computing technology[C]. IEEE International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering, Chengdu, China, 2010: 452-454.
- [15] Jiang M, Zhang S, Wu K, et al. Scheduling parallelizable task in self-organized cloudlet using Hermes[C]. IEEE Computer Communications Workshops, San Francisco, USA, 2016: 1 059-1 060.
- [16] Lyu X, Tian H. Adaptive Receding Horizon offloading strategy under dynamic environment[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(5): 878-881. DOI: [10.1109/LCOMM.2016.2531047](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2531047).
- [17] Miluzzo E, Chen Y F. Vision: mClouds - computing on clouds of mobile devices[C]. IEEE ACM Workshop on Mobile Cloud Computing and Services, New York, USA, 2012: 9-14.
- [18] Al Noor S, Hasan R, Haque M M. Cellcloud: A novel cost effective formation of mobile cloud based on bidding incentives[C]. IEEE 7th International Conference on Cloud Computing, Anchorage, USA, 2014: 200-207.
- [19] Song J, Cui Y, Li M, et al. Energy-traffic tradeoff cooperative offloading for mobile cloud computing[C]. IEEE 22nd International Symposium of Quality of Service, Hongkong, China, 2014: 284-289.
- [20] Mtibaa, Harras K A, Fahim A. Towards computational offloading in mobile device clouds[C]. IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science, Bristol, UK, 2014: 331-338.
- [21] Zhang F, Liu Y, Liu W, et al. Stochastic game between cloud broker and cloudlet for mobile cloud computing[C]. 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Toronto, Canada, 2018: 1-5.
- [22] Shila D M, Shen W, Cheng Y, et al. AMCloud: toward a secure autonomic mobile ad hoc cloud computing system[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(2): 74-81. DOI: [10.1109/MWC.2016.1500119RP](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500119RP).
- [23] Balasubramanian V, Karmouch A. An infrastructure as a Service for Mobile Ad-hoc Cloud[C]. IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, Las Vegas, USA, 2017: 1-7.
- [24] Zhang D, Xiong H, Hsu C H, et al. BASA: building mobile ad-hoc social networks on top of android[J]. IEEE Network, 2014, 28(1): 4-9. DOI: [10.1109/MNET.2014.6724100](https://doi.org/10.1109/MNET.2014.6724100).
- [25] Zaghdoudi B, Ayed HK-B, Riabi I I. Ad hoc cloud as a service: A protocol for setting up an ad hoc cloud over MANETs[J]. Procedia Computer Science, 2015, 56: 573-579. DOI: [10.1016/j.procs.2015.07.256](https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.256).
- [26] Jang M, Park M S, Shah S C. A mobile ad hoc cloud for automated video surveillance system[C]. IEEE International Conference on Computing, NETWORKING and Communications, Kauai, USA, 2017: 1 001-1 005.
- [27] Azar H, Majma M. Using a multi decision making model for managing computational resources at mobile ad-hoc cloud computing environment[C]. IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICET), Islamabad, Pakistan, 2017: 1-5.
- [28] Yaqoob I, Ahmed E, Gani A, et al. Mobile ad hoc cloud: A survey[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2016, 16(16): 2 572-2 589. DOI: [10.1002/wcm.v16.16](https://doi.org/10.1002/wcm.v16.16).
- [29] Huerta-Canepa G, Lee D. A virtual cloud computing provider for mobile devices[C]. ACM Workshop on Mobile Cloud Computing & Services: Social Networks & Beyond, New York, USA, 2010: 1-6.
- [30] Fernando N, Seng W L, Rahayu W. Dynamic mobile cloud computing: ad hoc and opportunistic job sharing[C]. 4th IEEE International Conference on Utility and Cloud Computing, Beijing, China, 2012: 281-286.
- [31] Zhou B, Dastjerdi A V, Calheiros R, et al. mCloud: A context-aware offloading framework for heterogeneous mobile cloud[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2017, 10(5): 797-810. DOI: [10.1109/TSC.2015.2511002](https://doi.org/10.1109/TSC.2015.2511002).
- [32] Khalifa A, Azab M, Eltowissy M. Towards a mobile ad-hoc cloud management platform[C]. IEEE/ACN, International Conference on Utility and Cloud Computing, London, UK, 2014: 427-434.
- [33] Yousafzai A, Chang V, Gani A, et al. Directory-based incentive management services for ad-hoc mobile clouds[J]. International Journal of Information Management, 2016, 36(6): 900-906. DOI: [10.1016/j.ijinfomgt.2016.05.019](https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2016.05.019).

- [34] Song J, Cui Y, Li M, et al. Energy-traffic tradeoff cooperative offloading for mobile cloud computing[C]. IEEE 22nd International Symposium of Quality of Service (IWQoS), Hongkong, China, 2014: 284-289.
- [35] Wang X, Chen X, Wu W, et al. Cooperative application execution in mobile cloud computing: A stackelberg game approach[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(5): 946-949. DOI: [10.1109/LCOMM.2015.2506580](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2506580).
- [36] Tang L, He S, Li Q. Double-sided bidding mechanism for resource sharing in mobile cloud[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(2): 1 798-1 809. DOI: [10.1109/TVT.2016.2565505](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2565505).
- [37] Zhang F, Deng R, Liang H. An optimal real-time distributed algorithm for utility maximization of mobile ad hoc cloud[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(4): 824-827. DOI: [10.1109/LCOMM.2018.2804928](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2804928).
- [38] Chilipirea C, Petre E A C, Dobre C, et al. Enabling mobile cloud wide spread through an evolutionary market-based approach[J]. *IEEE Systems Journal*, 2016, 10(2): 839-846. DOI: [10.1109/JSYST.2015.2415211](https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2415211).
- [39] Lu Z, Zhao J, Wu Y, et al. Task allocation for mobile cloud computing in heterogeneous wireless networks [C]. IEEE International Conference on Computer Communication and Networks, Las Vegas, USA, 2015: 1-9.
- [40] Tham C K, Cao B. Stochastic programming methods for workload assignment in an ad hoc mobile cloud[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2017, 17(7): 1 709-1 722.
- [41] Malhotra A, Dhurandher S K, Kumar B. Resource allocation in multi-hop mobile ad hoc cloud[C]. IEEE Engineering and Computational Sciences, Chandigarh, India, 2014: 1-6.
- [42] Truong-Huu T, Tham C K, Niyato D. A stochastic workload distribution approach for an ad hoc mobile cloud[C]. IEEE, International Conference on Cloud Computing Technology and Science, IEEE Computer Society, Singapore, 2014: 174-181.
- [43] Chen X, Shi Q, Yang L, et al. ThriftyEdge: resource-efficient edge computing for intelligent IoT applications[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(1): 61-65. DOI: [10.1109/MNET.2018.1700145](https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700145).
- [44] Venkatramsn B, Zaman F A, Karmouch A. Optimization of device selection in a mobile ad-hoc cloud based on composition score[C]. IEEE 2nd International Conference on Communication Systems, Computing and IT Applications (CSCITA), Mumbai, India, 2017: 257-262.
- [45] Huang B, Xia W, Zhang Y, et al. A task assignment algorithm based on particle swarm optimization and simulated annealing in ad-hoc mobile cloud[C]. International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Nanjing, China, 2017: 1-6.
- [46] Benkhelifa E, Welsh T, Tawalbeh L, et al. GA-based resource augmentation negotiation for energy-optimised mobile ad-hoc cloud[C]. IEEE International Conference on Mobile Cloud Computing, Services, and Engineering, Oxford, UK, 2016: 110-116.
- [47] Li B, Pei Y, Wu H, et al. Heuristics to allocate high-performance cloudlets for computation offloading in mobile ad hoc clouds[J]. *Journal of Super Computing*, 2015, 71(8): 3 009-3 036.
- [48] Chen W, Lea C T, Li K. Dynamic resource allocation in ad-hoc mobile cloud computing[C]. IEEE Conference on Wireless Communications and Networking, Barcelona, Spain, 2017: 1-6.
- [49] Kristensen M D, Bouvin N O. Scheduling and development support in the Scavenger cyber foraging system[J]. *Pervasive & Mobile Computing*, 2010, 6(6): 677-692.
- [50] Shi T, Yang M, Li X, et al. An energy-efficient scheduling scheme for time-constrained tasks in local mobile clouds[J]. *Pervasive & Mobile Computing*, 2016, 27(C): 90-105.
- [51] Guo X, Liu L, Chang Z, et al. Data offloading and task allocation for cloudlet-assisted ad hoc mobile clouds[J]. *Wireless Networks*, 2018, 24(1): 79-88. DOI: [10.1007/s11276-016-1322-z](https://doi.org/10.1007/s11276-016-1322-z).
- [52] Akinol A T, Adigun M O. Feedback-based service selection in ad-hoc mobile cloud computing[C]. International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering, Durban, South Africa, 2016: 172-177.
- [53] Le D V, Tham C K. An optimization-based approach to offloading in ad-hoc mobile clouds[C]. IEEE Global Communications Conference, Singapore, 2017: 1-6.
- [54] Lacuesta R, Lloret J, Sendra S, et al. Spontaneous ad hoc mobile cloud computing network[J]. *The Scientific World Journal*, 2014: 412-419.
- [55] Gong Y, Zhang C, Fang Y, et al. Protecting location privacy for task allocation in ad hoc mobile cloud computing[J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2018, 6(1): 110-121. DOI: [10.1109/TETC.2015.2490021](https://doi.org/10.1109/TETC.2015.2490021).
- [56] Hammam A, Senbel S. A trust management system for ad-hoc mobile clouds[C]. IEEE International Conference on Computer Engineering & Systems, Cairo, Egypt, 2014: 31-38.
- [57] Mandal S, Yang C, Altaweel A, et al. An efficient pair-

- wise key establishment scheme for Ad-Hoc Mobile Clouds[C]. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, New York, USA, 2015: 627-634.
- [58] Tsai J L, Lo N W. A privacy-aware authentication scheme for distributed mobile cloud computing services[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 9(3): 805-815.
- [59] Li M, Ruan N, Qian Q Y, et al. SPFM: Scalable and privacy-preserving friend matching in mobile cloud[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(2): 583-591.
- [60] Dbouk T, Mourad A, Otrouk H, et al. Towards ad-hoc cloud based approach for mobile intrusion detection[C]. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, New York, USA, 2016: 1-8.
- [61] Chen C A, Won M, Stoleru R, et al. Energy-efficient fault-tolerant data storage and processing in mobile cloud[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2015, 3(1): 28-41. DOI: [10.1109/TCC.2014.2326169](https://doi.org/10.1109/TCC.2014.2326169).
- [62] Li J, Ma R, Guan H. TEES: An efficient search scheme over encrypted data on mobile cloud[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2017, 5(1): 126-139. DOI: [10.1109/TCC.2015.2398426](https://doi.org/10.1109/TCC.2015.2398426).
- [63] Li H, Liu D, Dai Y, et al. Enabling efficient multi-keyword ranked search over encrypted mobile cloud data through blind storage[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2015, 3(1): 127-138. DOI: [10.1109/TETC.2014.2371239](https://doi.org/10.1109/TETC.2014.2371239).
- [64] Ma R, Li J, Guan H, et al. EnDAS: efficient encrypted data search as a mobile cloud service[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2015, 3(3): 372-383. DOI: [10.1109/TETC.2015.2445101](https://doi.org/10.1109/TETC.2015.2445101).
- [65] Yaqoob I, Ahmed E, Gani A, et al. Heterogeneity-aware task allocation in mobile ad hoc cloud[J]. IEEE Access, 2017, 5: 1 779-1 795. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2669080](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2669080).
- [66] Qiu M, Chen Z, Ming Z, et al. Energy-aware data allocation with hybrid memory for mobile cloud systems[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(2): 813-822. DOI: [10.1109/JSYST.2014.2345733](https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2345733).
- [67] Liu H, Pu J, Yang L T, et al. A holistic optimization framework for mobile cloud task scheduling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2017. DOI: [10.1109/TSUSC.2017.2765520](https://doi.org/10.1109/TSUSC.2017.2765520).

Mobile Cloud: architecture, mechanism, challenge

ZHANG Feng-hui^{1**}, BAO Xue-cai², LIU Wei-rong³, FU Mao-sheng¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, West Anhui University, Lu'an 237012, China;

2. School of Information Engineering, Nanchang University of Technology, Nanchang 330108, China;

3. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: With the development of communication and computer technology, the conception of Mobile Cloud computing is increasingly expanding. Currently, the Mobile Cloud formed by the nearby mobile devices through ad hoc network has become a new research hot topic. For the services provided by the Mobile Cloud to its internal devices with less bandwidth, lower price, smaller delay and other characteristics, it has attract substantial attention in Mobile Cloud computing. This paper summarizes the related research of the Mobile Cloud, and discusses architecture, mechanism and challenges. First of all, according to the distribution of calculation nodes, communication and control architecture, we divide the architecture into centralized Mobile Cloud and distributed Mobile Cloud, discuss the two types of architecture and its components; secondly, through analyzing the characteristics of Mobile Cloud formation, maintenance and dissolution, its mechanism can be divide into four aspects, that is, incentive mechanism, task allocation and scheduling mechanism, privacy and security mechanism and quality assurance mechanism; finally, based on the summarize of the shortcomings of existing literature on Mobile Cloud research, the four challenges are discussed, the trends of the future development and the further research direction of Mobile Cloud are clarified.

Key words: Mobile Cloud; incentive mechanism; offloading; quality of service; architecture; security