

天空计算： 概念、应用与展望

天空计算是云计算的未来，是通用版的云计算。2021 年美国加州大学伯克利分校 RISE 实验室的研究学者第一次正式提出了天空计算的概念。本文从天空计算的概念、特点、技术框架、应用前景、面临挑战等视角对天空计算进行进一步介绍与探讨，并对天空计算的未来发展进行了展望。

文 | 高尚 上海金融与发展实验室

一、引言

2006 年被视为云计算时代的开端，时任谷歌公司首席执行官埃里克·施密特（Eric Schmidt）在美国圣何塞举行的搜索引擎战略大会（SES, Search Engine Strategies Conference & Expo）上首次提出云计算的概念。同年，美国亚马逊公司正式推出弹性计算云服务（EC2, Elastic Compute Cloud）。云计算技术的提出引发了 IT 技术领域的一场变革，也推动了社会商



赛迪网官方微信



数字经济官方微信

业模式的一次大范围的持续创新。然而，经过近二十年的发展，从场景应用的视角出发来看，云计算技术也积累出一些难以解决的问题，其中最主要的一个核心问题是各大云厂商提供的云服务产品彼此间无法兼容、缺乏统一开放的互操作接口标准，无法实现以用户为中心，用户的 IT 基础设施与服务存在被云厂商绑定的问题。不论是公有云、私有云还是混合云，各种类型云环境间存在的“云孤岛”现象实际上限制了云计算技术的

进一步发展。

二、天空计算的概念与特点

2021 年美国加州大学伯克利分校 RISE 实验室的 Ion Stoica 和 Scott Shenker 教授在美国密歇根州安娜堡举办的 HotOS 会议上发表了题为 From Cloud Computing to Sky Computing 的论文，在该论文中这两位计算机科学家提出了天空计算（Sky Computing）的概念。2022 年 5 月，Ion Stoica 教授等美国加州大学伯克利分校的研究学者在 arXiv 论文网站发表了 The Sky Above The Clouds 的论文，进一步对云计算的未来发展与天空计算的愿景进行了探讨。

以上两篇论文中，作者指出天空计算是云计算的未来，我们即将从云计算时代过渡到天空计算时代。这两篇论文并未给出完整性定义，对于天空计算在论文中更多地讨论是对天空计算特性的描述，归纳起来主要有如下几个方面：

第一，天空计算是位于云计算之上的一层，其核心目标是实现云之间的互操作性。天空计算开源、通用并具有流畅的互操作性，能够将计算变成一种类似“Internet 网络”的公共服务，抹平原先不同云计算厂商定制化云服务间的差异性。

第二，天空计算不是对云计算的完全替代，而是为了解决跨云的问题，实现应用程序一次开发后能够无缝部署运行到任何云厂商提供的云环境中，提供统一的用户服务体验，用户方可以在不同

云之间便捷地迁移应用程序和数据。

第三，天空计算致力于实现一种统一的云间交互 API 并构建相应的生态体系，降低用户在云计算 IT 基础设施与应用需求方面的运营成本。

第四，天空计算能够实现更高效、更可靠、更低成本、更安全的计算服务，满足用户不断增长的泛在计算需求。

基于此，我们以天空计算的特征描述为基础，结合云计算在国内过往十几年间的发展实践，将天空计算总结为如下定义：天空计算是为了从根本上解决不同云厂商平台间的低兼容性而产生的，具有完全开源、通用性高、互操作性好、生态性好等特点，其通过向用户提供比云计算更高效、更便捷、更低成本的计算服务，从而推动实现将计算变成一种公共服务。

三、天空计算的技术框架

在 From Cloud Computing to Sky Computing 这篇论文中，作者提出天空计算自下而上由兼容层（compatibility layer）、云间层（intercloud layer）、对等层（peering layer）组成。

兼容层是天空计算技术架构的最底层，该层掩盖了技术异构性，将每个云厂商提供的云计算平台技术实现细节进行了屏蔽，消除不同云之间的技术差异性，对上面云间层提供一个统一的交互接口。基于天空计算的云应用程序开发一次即可，可以在不同的云平台上无缝运行而不需要修改。

云间层是天空计算技术架构的第二

层，该层是一个链接不同云服务的中间转换层，用来将一个业务操作流或数据流根据路由算法策略传送到正确的目的云平台地址，用户不必了解目的云平台归属于哪个具体的云平台供应商，实现了对云的抽象化，用户感受到的是一个整体性的云网络。云间层向用户提供了一个统一的应用程序接口（API）来描述待处理任务，由其来具体负责不同云之间的服务调度。云间层可以让用户制定个性化的路由策略，这些具体策略体现了用户对于一次计算在计费、可靠性、响应时间、安全性等指标上的权衡。

对等层则是天空计算技术架构的最高层，该层由一套涉及数据集在云间转移计费定价方面的经济协议组成，不同云之间通过该层就数据集的转移收费标准达成一致性协议，使得云间数据能够实现自由而快速地移动。

基于上述论述，笔者认为天空计算三层技术架构还存在一些不完整与不合理之处：

首先，从技术架构分层完整性上看，考虑到数据在不同云之间迁移的安全性，以及不同类型云之间相异的网络安全防护等级，天空计算的技术架构分层建议还应增加传输层（transport layer）与会话层（session layer），同时除去对等层。传输层位于云间层之上，该层主要用来管理数据在云间移动的安全性，包括但不限于对数据在传输过程中的加密解密等。会话层位于传输层之上，该层主要用来管理私有云、公共云、混合云等不同类型的云在接收外部会话请求

时进行授权与身份认证等方面的管理。

其次，从技术架构单一分层设置的合理性上看，目前 Ion Stoica 等学者对于对等层的描述不够清晰、功能定位还不够明确，仅是从云间数据集转移定价协商角度来设计此层。根据目前对等层的定义，该层相关功能可以移至云间层予以实现，如果数据集在不同云间的转移未能在协商定价方面达成一致，从逻辑上也不应发生数据集后续通过传输层和会话层的实际移动。

最后，从天空计算的定位来看，Ion Stoica 等学者认为公共数据、企业数据、个人数据等数据流，以及应用程序等信息流可以通过天空计算在云间自由移动。这里的云既包括公有云与私有云等不同类型云之间的交互，又包括不同云厂商、云产品间的交互，还包括在满足各国法律法规限制条件下处于不同国家的云平台的交互。

四、天空计算的应用前景与挑战

4.1 天空计算的应用前景

目前，云计算的商业模式是基于云提供商将用户绑定到自身的平台上并向其提供差异化的云服务。在未来的天空计算时代，Ion Stoica 等学者指出，天空计算作为一个 IT 公共基础设施更强调的是提供通用性的服务。而当前的云计算时代是以各个云服务提供商为中心。天空计算能够提供无缝、模块化的“即插即用”产品来帮助企业和个人用户以最合适、最经济、最便利的方式满足自身个性化的交易和信息需求，而且完全无

须关注这些需求背后的技术、系统或计算资源。

在天空计算时代，更高的云间兼容性将使得当前提供各种云服务的第三方公司能够将其产品更容易移植到不同类型云中，从而能够降低这些公司的研发成本、实施与运营成本等，天空计算的易用性所释放出的市场竞争力会带来更低的云服务使用价格和越来越多的云产品与服务创新，从而能够创造出一个更加繁荣的云服务市场。

在目前的云计算时代，基于不同的云供应商和产品形成的是无数个碎片化、大小不一的云生态系统；在未来的云计算时代，基于不同云平台间的跨云互联可以实现敏捷组合、模块化的云空间生态系统，这可以驱动新企业、企业新业务在“天空中诞生”，实现了充满计算的“天空”。

4.2 天空计算的挑战

挑战一：云厂商是否有足够的动力去推动天空计算的发展？从云计算过渡到天空计算意味着云厂商需要打破现有已形成的成熟商业模式去寻找新的、未知的商业发展模式，而且还可能面临失去现有老客户的风险。因此，在天空计算的商业模式尚未明朗之前，云厂商很难实质性地推动。

挑战二：天空计算技术架构的各层由谁来实现？从IT资源投入的视角出发，通过复用现有云厂商的IT基础设施进行升级改造，从而实现天空计算各层最为现实，但目前云厂商普遍动力不足，尤其是占有市场份额靠前的云厂商。从

市场发展的视角出发，可能会出现新的创业公司来推动天空计算的技术架构落地；但由于缺少客户资源，相较于云厂商而言，天空计算在商业化推广方面难度加大。

五、总结与展望

首先，从计算模式发展视角来看，自下而上从边缘计算、桌面计算、雾计算、云计算再到天空计算，实现了计算模式在垂直空间维度上的统一与闭环。

其次，未来天空计算和云计算可能会在较长一段时期内同时存在。例如金融业等对数据与IT设施安全要求等级高的行业客户来说，算力、计费等并不能成为关键选择因素，基于现有的私有云模式对于这些行业客户可能是一个更可行的选择。

再次，天空计算云间层的任务路由调度涉及目的云平台的类型、安全认证机制、计算服务能力等级、计费标准、供应商、国家或地区数据流动的具体法律政策等调度策略因子，如何针对用户侧的每次任务请求，在一定响应时间内完成个性化精准路由调度还有待进一步深入研究。

最后，当前国内正在大力推进数据要素流通与交易、加快全国一体化算力网建设等，天空计算作为实现接口标准化的通用云计算，在这些与数字经济发展息息相关的重要场景领域具有很大的应用空间。

✎ 责任编辑：郭宇豪 guoyh@staff.ccidnet.com