

可用于大型 Grid over OBS 光子网格网络的自组织资源管理技术

左冰, 刘雷, 伍剑, 林金桐

(北京邮电大学 信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘 要: 针对目前以光突发交换 (OBS) 为基础的光子网格 (grid) 网络中基于客户/服务器 (C/S) 模型的资源管理技术的缺点, 在已有工作的基础上提出了一种改进式的基于 P2P 技术的自组织资源管理技术。该技术利用 P2P 的特点以及通过对资源所进行的特定描述, 从而使资源信息分散存储在多个节点上, 同时利用该技术可以较快地实现资源查找。仿真结果表明, 该方案不但可以解决传统 C/S 资源管理方案扩展性不足和容错性较差的缺点, 同时可以进一步地缩短资源查找时间, 因此可以更好地支持未来面向普通消费者群体的大规模网格业务。

关键词: 光子网格; 资源管理; 自组织; P2P; 光突发交换

中图分类号: TN913.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)08-0031-08

Novel self-organized resource management mechanism for large-scale Grid over OBS networks

ZUO Bing, LIU Lei, WU Jian, LIN Jin-tong

(Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In order to avoid the problems of client/server (C/S)-based resource management scheme in grid over optical burst switching (OBS) networking, an improved self-organized resource management mechanism based on the peer-to-peer (P2P) technology and the previous works was proposed. By utilizing the P2P technology and special description of resources, the proposed mechanism could achieve distributed resource information storage and fast resource discovery capability. Simulation results show that the proposed mechanism can not only address the issues of poor scalability and fault-tolerance introduced by traditional C/S-based schemes, but also reduce the time for resource discovery. Therefore, it is more suitable for future large-scale consumer-oriented optical grid applications.

Key words: optical grid; resource management; self-organized; P2P; optical burst switching

1 引言

随着网格技术 (grid computing)^[1] 的日益发展, 出现了许多面向未来消费者市场的新型应用, 例如: 高性能计算、计算机集成制造、高清视频点播

等。现有的传输网络已无法满足这些需要, 因此与先进光交换技术相结合的光子网格已经成为技术发展的必然趋势^[2]。

光突发交换 (OBS, optical burst switch)^[3] 采用突发数据分组 (突发分组将多个 IP 分组会聚在一

收稿日期: 2009-02-13; 修回日期: 2010-05-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (2007AA01Z248); 科技部国际合作基金资助项目 (2006DFA11040); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目 (IRT0609)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2007AA01Z248); The International Cooperation Project of MOST (2006DFA11040); The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT0609)

起，其持续时间一般为几十微秒到几百微秒，甚至可能达到几个毫秒）作为交换单位，交换粒度介于光路交换（OCS，optical circuit switching）与光分组交换（OPS，optical packet switching）之间。它克服了光路交换（粒度大、不灵活、效率低）和光分组交换（对光器件要求高、难以实现）的缺点，同时兼顾了它们的优点，具有带宽效率高、吞吐量高、易于实现等优点。因此，光突发交换网络是现阶段较为适合网格技术的一种解决方案^[4]。

然而目前，从资源管理的方式上来看，针对 Grid over OBS 所提出的各种现有的解决方案大多数是基于传统的客户/服务器模型（C/S 模型）^[4-11]的。具体来说，就是在网络中存在着一个（或若干个）资源服务器，用来存储实时的非网络资源信息，用户的任务请求（即用户所需的资源或服务）将被首先发送至服务器进行处理，服务器根据其本地存储的信息，为该用户的任务请求分配一个满足要求的资源提供者，并将资源查找的结果返还给用户，同时更新数据库以完成资源预约。之后，用户将实际的网格任务组成突发分组，通过 OBS 网络传输至资源提供者，当任务完成后，任务的结果将再通过 OBS 网络返还给用户。

本论文要解决的问题就是如何在 Grid over OBS 网络体系中引入一种实用的、有效的、可扩展的资源管理技术，以适应未来业务的广泛配置（例如：全球网格计算），并解决现有技术中存在的诸多问题。该技术摆脱了传统的 C/S 资源查找和管理模式，采用 XML 语言对网络资源进行描述，同时借鉴了一些现有的 P2P 技术，从而实现了快速高效的资源查找和管理功能。另外，本策略只需在用户端配置相应的协议即可，无需对网络做大规模的变化，符合网络功能边缘化的设计理念，简单易行。

本论文的组织结构为：第 2 节介绍及回顾了已有的可用于光子网格的资源管理技术，第 3 节提出了自组织的资源管理方案，第 4 节为仿真结果及讨论，第 5 节是本文的结束语。

2 几种现有资源管理技术分析

2.1 技术 1：中心信息服务器与 OBS 核心节点耦合（C/S 模式）

2.1.1 技术方案

该技术是一种将资源信息服务器与 OBS 核心节点耦合在一起的解决方案。当用户有一项任务请

求无法在本地完成时，用户会将此任务的资源请求以某一特定格式进行封装，然后将此请求通过 OBS 边缘路由器发送至核心路由器进行资源的查询。核心路由器中存储了来自不同资源的可利用资源信息列表。通过对比，为该任务选择一个满足其资源需求的资源提供者。之后的详细流程如图 1 所示。图 1 中的 $T_{core 1}$ 表示处理和传送任务请求所需的时间； $T_{edge1.1}$ 表示用户确认、任务提交、任务汇聚及其在 OBS 网络中传输所需的时间（该时间依流量和突发分组大小的不同而变化）； $T_{core 3}$ 和 $T_{core 4}$ 表示处理和重新插入控制分组所需的时间； $T_{edge2.2}$ 表示处理收到的任务和传输任务结果所需的时间（该时间依处理时间不同而变化）； $T_{Offset.1}$ 和 $T_{Offset.2}$ 表示执行 JIT 协议所必需的偏置时间。

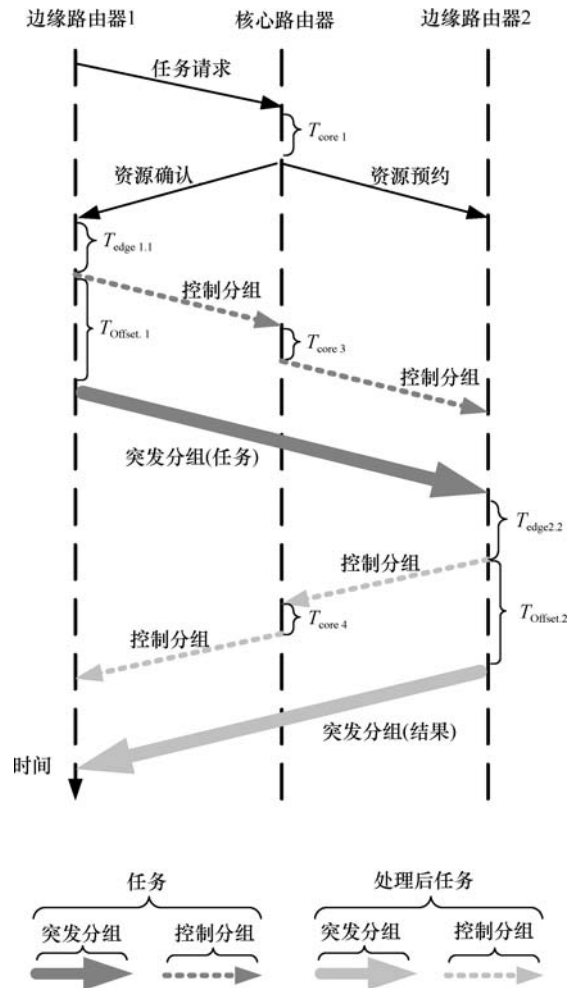


图 1 将中心服务器与 OBS 核心节点耦合到一起

2.1.2 缺点分析

该方案是一种典型的客户/服务器模式架构。由 2.1.1 节分析可知，该方案存在扩展性差，容错性差

(即如果中心服务器失效,则所有的网格用户均无法获取网格服务),服务器负载过高,在高业务频率时效率低下等诸多问题。同时,由于服务器与核心节点耦合在一起,而在 OBS 网络中,数据是透明穿过数据信道的。因此,为了使信令能够在核心节点处得到处理,资源查询信令必须在控制信道内传送,这在一定程度上限制了网络的灵活性,在设计上也增加了一定的难度。

2.2 技术 2: 中心信息服务器与 OBS 边缘节点耦合 (C/S 模式)

2.2.1 技术方案

该方案是一种将资源信息服务器与边缘节点耦合在一起的解决方案。每个边缘节点中的服务器负责收集连接到本节点的用户资源信息。如图 2 所示,当用户有任务请求时,首先发送至本用户所连接的边缘节点上,并在该边缘节点的信息服务器中查找满意的资源,如果找到所需资源,就把资源查询的结果返还给用户;反之,此边缘节点就将用户的请求发送到另一个边缘节点上进行查询。如此反复,直至找到满意的资源提供者为止。如果所有的边缘节点都已查询完毕,还是没有找到满意的资源,则通知用户此次资源查找请求失败。

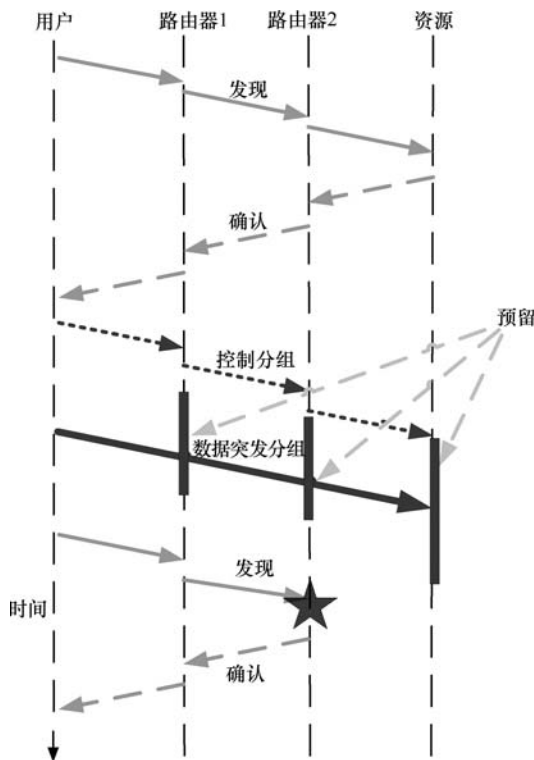


图 2 将中心服务器与 OBS 边缘节点耦合到一起

2.2.2 缺点分析

与方案 1 相比,该方案增加了中心信息服务器的个数,这在一定程度上改善了整个系统的容错性能。同时,由于 OBS 的边缘节点可以对业务进行电处理,因此,在本方案中,资源请求信息既可以在控制信道内传输,也可以在数据信道内传输,使得网络设计更加灵活。但显而易见,这种方案在本质上依然是一种客户—服务器模型(只不过是增加了服务器的个数而已),因此,该方案依旧无法解决 C/S 模式下网络扩展性差这个主要问题,随着用户的增多,服务器的负担会越来越重。

2.3 技术 3: 基于 SIP 的解决方案 (C/S 模式)

2.3.1 技术方案

该方案是一种基于会话发起协议 (SIP, session initiation protocol) 的解决方案,利用目前较成熟的 SIP 技术来完成资源的管理,具体流程如图 3 所示。

2.3.2 缺点分析

可以看到,基于 SIP 的解决方案,从本质上与方案 1 和方案 2 并没有本质的区别,只是采用成熟的 SIP 信令来取代方案 1 和方案 2 中的部分查询功能。因此它仍然是一种典型的客户—服务器模型,也存在 C/S 模式中的问题。同时,由于 SIP 信令在一次任务中涉及到多次信令的交互,例如 INVITE、180 Trying、200 OK、ACK 等,这就无形中增加了资源查找的时间。而实际上,对于网格业务而言,有些信令流程不是必需的(例如 ACK 消息)。

3 自组织资源管理技术

由以上分析可见,无论采用上述的哪种方案,都无法摆脱基于 C/S 的资源查找及管理模式。其基本流程均是用户的请求发送到集中服务器进行查询,同时该服务器中需要存储所有来自资源提供者的资源信息,服务器根据本地存储的这些信息,为用户的请求分配一个满意的资源提供者。因此,在这种 C/S 模式下存在的大量问题将会阻碍网格应用在未来的大规模发展。

在文献[12,13]中,首次提出了一种基于 P2P 技术的网格架构,在该体系下,原本存储在服务器中的大量信息分散到各个用户上,将原本需要服务器来完成的工作也分散到多个用户来完成。通过这种负载均衡并继承基于 Chord 协议^[14]的 P2P 技术的优势,提高了整个网络的可扩展性,并使整个网络具备更好的灵活性和顽健性。然而,在该方案中,网

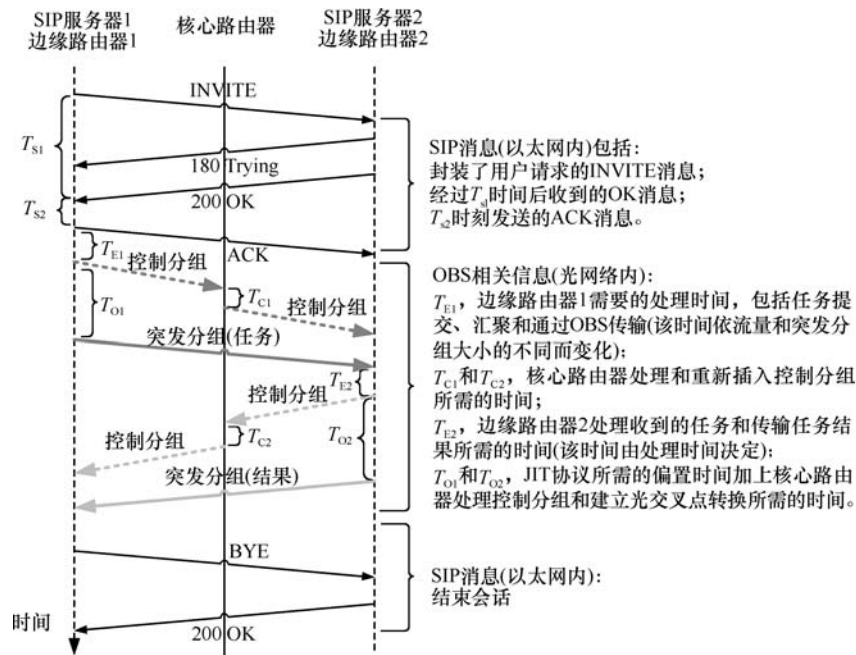


图 3 基于 SIP 的解决方案

格资源被区分为静态资源和动态资源，资源的查找流程也被划分为静态资源的比对和动态资源的查找 2 个步骤，这种划分在一定程度上增加了资源查找的时间，特别是对于很多时延敏感的业务而言，显然是不够高效的。为了解决这一问题，本文提出了一种新型的解决方案，称为自组织资源管理方案，它利用对资源进行特定的描述并借鉴了现有 P2P 技术的一些策略，实现了高效的资源查找和管理功能。

应用自组织资源管理策略的 Grid over OBS 的整体信令流程如图 4 所示。如上文提到的，用户只关心其任务能否按照要求被满意地完成，于是网络需要为用户的请求找到一个合适的资源。因此对于每一个任务请求，首先要进行资源查找过程，在得到资源查找的结果后，将任务发送至此资源处进行处理。任务的发送将以突发分组的方式通过 OBS 网络传输。该流程包括准备及配置、资源查找和任务执行等一系列步骤。下面将详细解释图 4 流程中的各个步骤。

步骤 1 利用对每个节点的 IP 地址进行散列变换 (SHA-1) [15]，为每一个节点 (用户及资源) 分配一个 m bit 的节点号 (ID)，在 ID 生成后，按照 ID 的大小顺序将所有节点顺时针排列成一个环。

步骤 2 能够提供可利用资源 (例如计算资源，

存储空间等) 的节点按照 XML (可扩展标记语言) 语法规则生成资源描述。这里，定义一个参数 *Window*，该参数反映了对可利用资源的描述精确度。XML 语言的形式如下：

```
<resource type>资源类型</resource type>
<amount>[int(可利用资源/window)]*window
</amount>
```

例如，如果某一节点还有 9.3GB 的存储空间，而定义参数 *Window* 为 1GB，则生成的资源描述如下：

```
<resource type>storage</resource type>
<amount>9G bytes</amount>
```

步骤 3 根据步骤 2 中所生成的资源描述，利用 SHA-1 算法生成一个 m bit Key，称为资源描述 Key。注意，该标识符的长度必须足够长，从而可以忽略 2 个节点或 Key 进行散列变换时产生相同标识符的可能性。

步骤 4 将 Key 分配到标识符环上，如图 5 所示。这些标识符分配在以 2^m 为模的环上。将资源描述 Key k 分配给节点 ID 等于或紧随 k 的第一个节点。将该节点称为 Key k 的后继节点，将其表示为 $successor(k)$ 。可见，如果所有节点的 ID 从 0 到 2^m-1 ，那么 $successor(k)$ 就是从 k 开始顺时针方向的第一个节点。图 5 所示的是一个 $m=6$ 的环，该环拥有 11 个节点，存储 8 个 Key。节点 1 上的可利用资源被映射为 Key 9，由于 Key 9 的后继节点是节点 10，所以

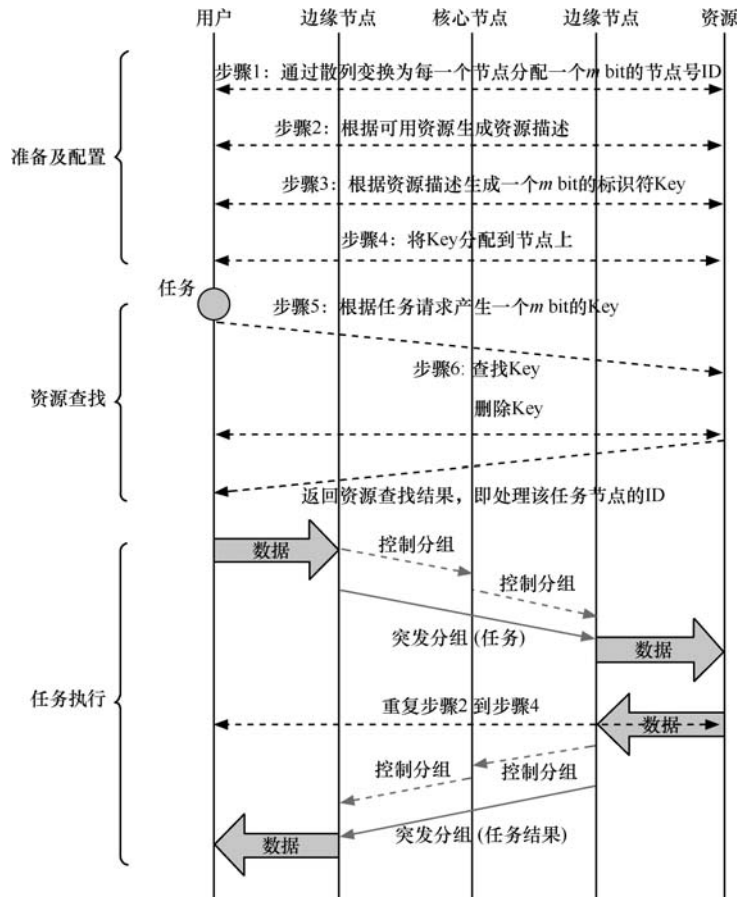


图 4 信令流程

Key 9 位于节点 10 上。类似可推知, Key 19 和 Key 26 在节点 28 上, Key 33 在节点 38 上等。

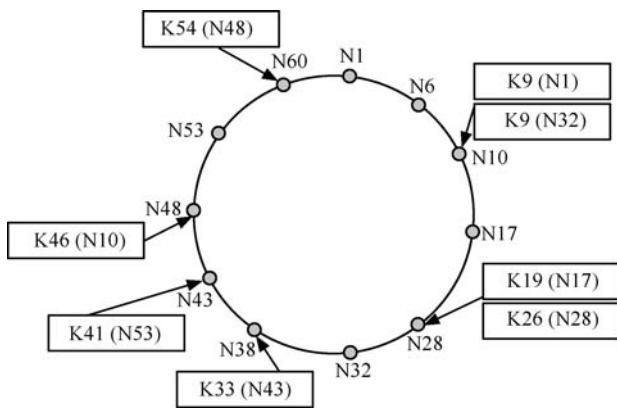


图 5 将 Key 分配到环上

在自组织资源管理技术中, 每个节点要维护一个项目数为 m 的路由表, 称之为指针表。节点 n 的指针表里第 i 项等于 n 加上 2^{i-1} 后的第一个节点 s , 即 s 为 $(n+2^{i-1})$ 的后继节点, 也就是 $s = \text{successor}(n+2^{i-1})$, 其中 $1 \leq i \leq m$ 。把节点 s 称为节点 n 的第

i 个指针, 将其表示为 $n.\text{figure}[i]$ 。指针表的项中包括节点 ID 和该节点相应的 IP 地址。注意, 表中第一个指针就是环上最近的后继节点, 简便起见, 通常把第一个指针所指向的节点简称为后继节点。

图 6 中展示了节点 10 和节点 43 的指针表。节点 10 的第一个指针指向节点 17, 因为节点 17 是 11 后的第一个后继节点, 这里是根据 $(10+2^0) \bmod 2^6=11$ 得到的 11。类似可得, 第 2 个指针指向 12 后的第一个节点 17, 这里的 12 由 $(10+2^1) \bmod 2^6=12$ 得出。节点 10 的最后一个指针指向节点 43, 因为节点 43 是 $(10+2^5) \bmod 2^6=42$ 后的第一个后继节点。

步骤 5 对于一个需要远端执行的任务, 根据任务的资源需求生成一个 m bit 的 Key, 将这个 Key 称为资源查找 Key。资源查找 Key 的生成过程类似于步骤 2, 首先要利用 XML 语言对当前任务的资源需求进行描述, 该资源应设置为 $[(\text{int}(\text{可用资源} / \text{window})) + 1] * \text{window}$ 。例如, 假如该任务需要 8.6GB 的存储空间, 则生成的 XML 文件如下:

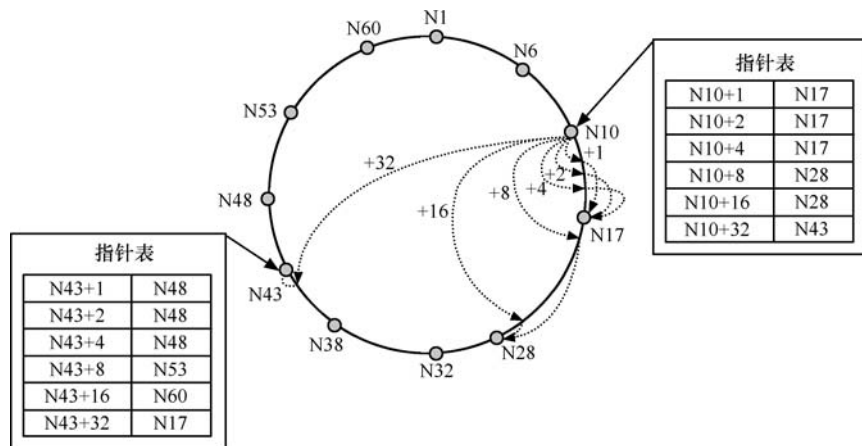


图 6 指针表的生成

<resource type>storage</resource type>

<amount>9G bytes</amount>

在资源需求的描述生成之后,通过 SHA-1 将该描述转换为一个 m bit 的资源查找 Key。

步骤 6 在资源查找 Key 生成后,可利用该 Key 与资源描述 Key 之间的相互关系进行自组织的资源查找过程。资源查找的过程可以描述如下: 如果资源查找 Key 在当前节点 n 的 ID 和 n 的后继节点 ID 之间,则资源查找过程完成,节点 n 将资源查找 Key 发送到其后继节点上,后继节点对比资源查找 Key 和本地存储的资源描述 Key,如果有匹配的,则将相应的资源 IP 地址返还给用户,该资源即为可以满足用户任务需求的资源;如果没有匹配的资源描述 Key,则说明网络中没有合适的资源。如果资源查找 Key 不在当前节点 n 的 ID 和 n 的后继节点 ID 之间,节点 n 就在其指针表中搜寻节点 ID 最接近资源查找 Key 的节点 n' ,然后在节点 n' 上进行资源查找的操作。

当后继节点将匹配的资源 IP 地址返还给用户的同时,后继节点要将该资源对应的资源描述 Key 删除。该删除操作表明,该资源已经被预约。通过删除资源描述 Key,可以避免该资源在信令时延内被其他网格任务占用。

当用户接收到资源的 IP 地址后,资源查找过程完成。接下来,用户通过 OBS 网络传送需要执行的任务。当任务被成功处理完成后,仍以突发分组的形式将任务结果发送给用户。资源节点完成该任务后,该节点立刻会释放占用的资源,然后根据其可利用的资源,再次执行步骤 2~步骤 4,产生新的资源描述 Key。

下面通过一个例子具体解释上述资源查找的过

程,图 7 展示了一个小型的 Grid over OBS 的范例,即有 11 个用户(或资源)通过 OBS 网络连接在了一起。此时用户 10 (N10) 有一个任务在本地无法完成,所以他需要搜索到一个能够完成该任务的资源。首先, N10 将自己的资源请求封装为资源查找 Key,即本例中的 Key54,根据生成的 Key,开始进行上述的资源查找过程。在图 7 中, N10 首先会在本地指针表中查询是否有 Key54 的后继节点,如果没有后继节点, N10 就将查询任务发送给 N43 进行下一步查询(因为 N43 在 N10 的指针表中是最接近 Key54 的)。同理, N43 会在其本地的指针表中查询到 N53 是最接近 Key54 的节点,因此该任务又会被发送到 N53 进行查询, N53 在本地的指针表中会发现, N60 正是 Key54 的后继节点。于是资源查询指令会发送至 N60, N60 会在本地存储的资源描述 Key 中查找到 N48 可以满足该任务的资源需求,因此 N48 将作为资源查找的结果返回给用户。

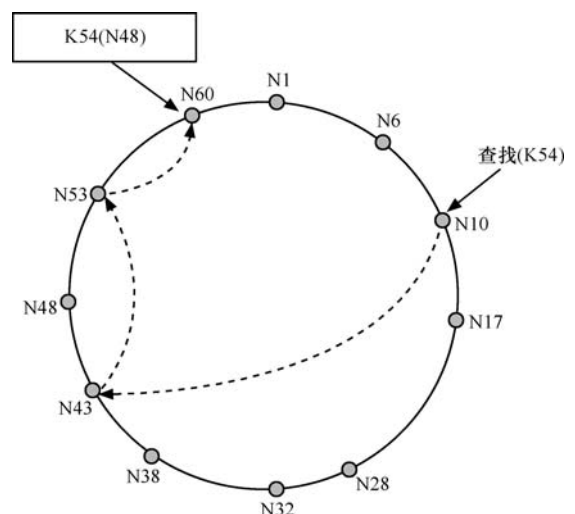


图 7 资源查找流程

4 仿真结果

为了验证该自组织资源管理技术的性能，仿真了一个大型网络，将所提出的自组织资源管理技术与传统的 C/S 技术和文献[12,13]中所提出的 P2P 技术加以对比。该网络包括 50 000 个节点，其中网格资源与网格用户的比例为 M ，即网格网络中每存在一个用户，就相应地存在 M 个资源。需要注意的是，在通常情况下 $M > 1$ ，这是因为在消费网格网络中，每个网格用户同时也会作为网格资源而存在，但是，很多资源，如高性能服务器等，则不会作为网格用户。这里需要说明的是， M 值是一个表征网络中可用资源多少的数值，无论其大小为多少，都不会改变算法流程及复杂度。在仿真中，网格资源和网格用户的需求都是随机生成的，如存储资源是在 10^2MB 至 10^5MB 之间随机选取的。平均任务发起频率为 1 000 次/秒， M 值分别设置为 10、5 和 1，所有用户和资源的 IP 地址也均为随机生成。图 8 所示为这 3 种技术在资源查找时间上的对比。可以看到，P2P 资源管理技术在网格用户较多、任务发起频率较大的未来消费网格网络中，其平均资源查找时间要远小于 C/S 技术。这是因为，在 C/S 技术中，有限的服务器中存储了大量的资源信息，同时所有的任务的请求都需要发送到这些服务器进行资源查找和预约，由于服务器处理能力的限制，势必造成资源查找时间的延长。而 P2P 技术将资源信息的存储和任务的处理分散到多个用户来处理，因此资源查找时间相对较短。通过对比还可以发现，本文所提出的自组织资源管理技术相对于 P2P 技术而言所需的资源查找时间更短，这是由于 P2P 策略需要进行两步的资源查找，即后继节点定位和动态资源对比才能查找到合适的资源，而本文提出的策略只需一步即可定位到合适的资源，因此所需的资源查找时间更短。图 9 所示为这 3 种策略在资源查找成功率方面的对比。可以看到，P2P 算法的成功率要高于 C/S 技术，其原因同样是由于在 C/S 技术中，服务器处理压力较大，资源信息更新不及时，因此会造成一些过时的信息被用户查询到，因此导致成功率较低。而本文所提出的算法，在 M 值较大时成功率较高，而随着 M 值的减少，成功率会有所降低。由此可知，本文提出的自组织资源管理技术相对于 P2P 技术而言，是用资源查找成功率的降低换取了资源查找时间的减少。考虑到在未来的大型

消费网格网络中，资源会较为充分，因此 M 值会相对很大，在这种情况下，自组织资源管理策略是相当高效的。此外，从算法的复杂度上来看，由于自组织资源管理策略只采用了一步比较的策略，而 P2P 算法则需要静态资源和动态资源两方面的比较，故自组织资源管理策略的算法复杂度更低。同时，在文献[13]中已证明，随着网络节点数的增加，基于 P2P 的算法其性能变化不大。因此，本文提出的自组织资源管理策略对比于之前的算法而言，更加符合未来大规模网格计算的要求。

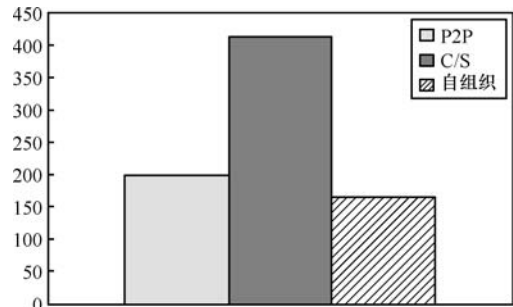


图 8 资源查找时间对比/ms

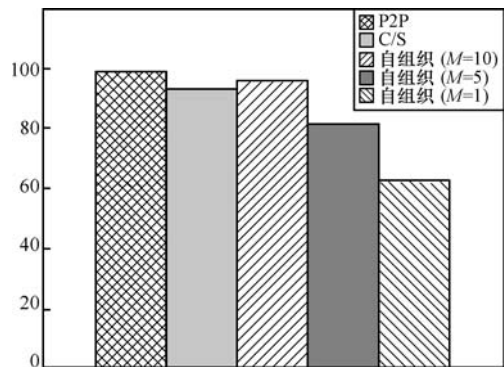


图 9 资源查找成功率对比/%

5 结束语

针对传统 C/S 模式下存在的诸多问题，并在之前所提出 P2P 资源管理技术的基础上，本文提出了一种自组织的资源管理方案。与现有传统 C/S 模式资源管理方案相比，本文所提出的自组织资源管理方案，可以有效地解决现有基于 C/S 的集中控制式方案在大规模应用下出现的诸多问题，从而使整个网络具备更好的灵活性、可扩展性、容错性、顽健性，并可以实现负载均衡；相对于之前所提出 P2P 资源管理技术，本文所提出的方案可以进一步减少资源查找时间。这些优势将有利于未来面向消费用户的大型网格应用在 OBS 网络上的广泛配置。

参考文献:

- [1] FOSTER I, KESSELMAN C. The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure[M]. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 1999.
- [2] TRAVOSTINO F, MAMBRETTI J, KARMOUS-EDWARDS G. Grid Networks: Enabling Grids with Advanced Communication Technology[M]. John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [3] QIAO C, YOO M. Optical burst switching (OBS)-a new paradigm for an optical internet[J]. High Speed Netw, 1999, 8 (1): 69-84.
- [4] SIMEONIDOU D, NEJABATI R. Grid Optical Burst Switched Networks (GOBS)[S]. Global Grid Forum Draft, 2005.
- [5] SIMEONIDOU D, NEJABATI R, ZERVAS G, *et al.* Dynamic optical-network architectures and technologies for existing and emerging grid services[J]. Lightw Technol, 2005, 23(10): 3347-3357.
- [6] ZERVAS G. A fully functional application-aware optical burst switched network test-bed[A]. Proceedings of OFC 2007[C]. San Diego, California, USA, 2007.
- [7] LEENHEER M. A view on enabling-consumer oriented grids through optical burst switching[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(3): 124-131.
- [8] CALLEGATI F. Application aware optical burst switching test-bed with sip based session control[A]. Proceedings of Tridentcom 2007[C]. Orlando, Florida, USA, 2007.
- [9] ZERVAS G, NEJABATI R, SIMEONIDOU D, *et al.* SIP based OBS networks for grid computing[A]. Proceedings of Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM)[C]. Athens, Greece, 2007.
- [10] ZERVAS G, QINA Y, NEJABATI R, *et al.* SIP-enabled optical burst switching architectures and protocols for application-aware optical networks[J]. Computer Networks, 2008, 52(10): 2065-2076.
- [11] CALLEGATI F, CAMPI A, CORAZZA G, *et al.* SIP-empowered optical networks for future IT services and applications[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(5): 48-54.
- [12] LIU L, HONG X, WU J, *et al.* Experimental demonstration of P2P-based optical grid on LOBS testbed [A]. Proceedings of OFC 2008[C]. San Diego, California, USA, 2008.
- [13] LIU L, HONG X, WU J, *et al.* Experimental investigation of a peer-to-peer-based architecture for emerging consumer grid applications[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2009, 1(1): 57-68.
- [14] STOICA I, MORRIS R, KARGER D, *et al.* Chord: a scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM[C]. San Diego, CA, 2001.149-160.
- [15] FIPS 180-1. Secure Hash Standard. U S Department of Commerce/NIST[S]. National Technical Information Service, Springfield, VA, 1995.

作者简介:



左冰 (1980-), 女, 河南郑州人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为光网络、光子网格、光突发交换网络等。



刘雷 (1981-), 男, 辽宁阜新人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为光子网格、光突发交换网络、自动交换光网络、网络仿真与建模等。



伍剑 (1971-), 男, 四川剑阁人, 博士, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为光突发交换网络及全光信息处理技术。



林金桐 (1946-), 男, 江苏丹阳人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为光通信系统及光子器件。