

1-2-2019

Modeling of Distributed Service Composition System Based on Bipartite Network

Yaohui Hao

1.Information Engineering University of PLA, Zhengzhou 450001, China; ;2.State Key Laboratory of Mathematical Engineering and Advanced Computing, Zhengzhou 450001, China;

Jihong Han

1.Information Engineering University of PLA, Zhengzhou 450001, China; ;

Guo Hong

1.Information Engineering University of PLA, Zhengzhou 450001, China; ;

Shuxin Liu

1.Information Engineering University of PLA, Zhengzhou 450001, China; ;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling of Distributed Service Composition System Based on Bipartite Network

Abstract

Abstract: Distributed service composition system is widely used in military, communication and other fields. *In order to reveal the system's characteristics, a bipartite network model is proposed.* The relation of sever-node's degree distribution to the three factors of terminal-node's expectation, terminal-node's task load and local-world size is analyzed by the mean-field theory under condition of load balancing and random selection. Both numerical analysis and simulation results show that *local-world and sever-node's degree distribution are irrelevant with random selection.*

Keywords

bipartite network, distributed service composition, the mean-field theory, load-balance

Recommended Citation

Hao Yaohui, Han Jihong, Guo Hong, Liu Shuxin. Modeling of Distributed Service Composition System Based on Bipartite Network[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(1): 1-8.

基于二分网络的分布式服务组合系统建模研究

郝耀辉^{1,2}, 韩继红¹, 郭虹¹, 刘树新¹

(1. 信息工程大学, 郑州 450001; 2. 数学工程与先进计算国家重点实验室, 郑州 450001)

摘要: 分布式服务组合系统在军事、通信等领域被广泛地应用, 为深入理解系统的特性, 基于二分网络模型的结构形式对其进行了建模研究, 使用平均场理论分析了负载均衡和随机选择两种连边方式下, 服务节点度分布与终端节点满足 *Poisson* 分布的期望值、终端节点申请的任务量大小、局域世界大小 3 个因素之间的关系, 发现在随机选择连边方式下, 局域世界因素对服务节点度分布无影响的特性。仿真模拟实验的结果进一步验证了理论推导结论的正确性。为进一步研究分布式服务组合系统终端对服务器端的影响奠定了网络模型基础。

关键词: 二分网络; 分布式服务组合; 平均场理论; 负载均衡

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 01-0001-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801001

Modeling of Distributed Service Composition System Based on Bipartite Network

Hao Yaohui^{1,2}, Han Jihong¹, Guo Hong¹, Liu Shuxin¹

(1. Information Engineering University of PLA, Zhengzhou 450001, China;

2. State Key Laboratory of Mathematical Engineering and Advanced Computing, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Distributed service composition system is widely used in military, communication and other fields. In order to reveal the system's characteristics, a bipartite network model is proposed. The relation of sever-node's degree distribution to the three factors of terminal-node's expectation, terminal-node's task load and local-world size is analyzed by the mean-field theory under condition of load balancing and random selection. Both numerical analysis and simulation results show that local-world and sever-node's degree distribution are irrelevant with random selection. To sum up, this paper provides a network model foundation for further study the effects of distributed service composition system terminal on the sever-nodes.

Keywords: bipartite network; distributed service composition; the mean-field theory; load-balance

引言

二分网络作为复杂网络中重要的一种结构形式, 往往被用于描述“隶属”与“合作”关系。现实中的许多系统呈现出二分性, 例如: 科学家-论文,

演员-电影等, 都可以描述为二分网络形式^[1-2]。从二分网络的角度来研究系统, 为更深层的揭示系统特性提供了新的研究视角。

分布式服务组合系统 (Distributed Service Composition System, DSCS) 是指将某种功能(任务)的执行均匀分布在多个对等的服务节点上, 通过多个服务节点间的组合协作, 来完成某种功能(任务)的系统。凭借其强大的处理、存储能力和极高的性能价格比, 正在电信、军事等领域中得到广泛的应



收稿日期: 2015-12-21 修回日期: 2016-03-01;
基金项目: 国家自然科学基金(61202362, 61472447),
全军军事类博士研究生资助课题(2014JY171);
作者简介: 郝耀辉(1978-), 女, 河南兰考, 博士, 讲
师, 研究方向为复杂系统建模; 韩继红(1966-), 女,
山西忻州, 博士, 教授, 博导, 研究方向为复杂系统。

<http://www.china-simulation.com>

用。对于分布式服务组合系统,如果从服务的使用者和提供者角度进行划分,系统中的节点可以被分成两类,即:提供服务功能的服务节点与使用服务功能的终端节点。服务节点通过相互之间的组合、协作,提供服务功能,终端节点以服务请求的方式向系统申请使用服务^[3-4]。以该角度进行分析,则分布式服务组合系统可以被看作二分网络的形式。

并且,分布式服务组合系统一般都处在开放的运行环境中,具有实时的终端接入特征,例如:在移动互联网中使用的分布式服务组合系统,各电信运营商的服务器是系统中的服务节点,用户手机是系统中的终端节点。不同时间点,申请服务的终端节点个数、申请服务的类型等可能均不相同,这些因素对服务节点承担任务量的划分、系统服务效率的衡量等有着直接的影响。为了更好的探索分布式服务组合系统中终端对服务端的影响,本文以分布式服务组合系统自身的特殊机理和演化机制为建模依据,基于二分网络对分布式服务组合系统进行了建模研究。

1 模型构建

1.1 系统特征

一般的复杂网络演化模型构建方法,都是基于每一个时间点增长一个节点的假设^[5-7],而在真实地分布式服务组合系统中,终端节点(用户)申请服务的过程是一个泊松过程,这些终端节点独立的随机发起对服务节点的接入申请。具有如下系统特征:

(1) 每个时间点上,申请服务的终端节点个数往往不是一个,而是符合一定期望值的 Poisson 分布;

(2) 终端节点在申请使用服务功能,即接入该分布式服务组合系统时,只能和服务节点连接,各终端节点间不能建立连边,即终端节点间不能直接连边,终端节点间的通信必须通过服务节点进行;

(3) 终端节点申请的服务,需要由多个分布式服务节点组合提供,并且每个终端节点申请服务的种类可能不同,而每种服务需要组合的服务节点个

数也不相同(例如:申请某种通信会话服务需要3个服务节点组合提供等);

(4) 一些分布式组合服务系统因地域限制、系统安全管控中的授权和访问控制等原因,终端节点往往只能连接局域范围内的服务节点^[8,9],即可能具有局域特性;

(5) 网络中服务节点之间至少是全连通的,即不允许有孤立的服务节点,各服务节点的度值 ≥ 1 ;

(6) 因为服务节点的增加需要追加系统的投资成本,一般情况下服务节点个数保持不变。

根据上述特点,分布式服务组合系统采用二分网络形式表示的结构示意,如图1所示。

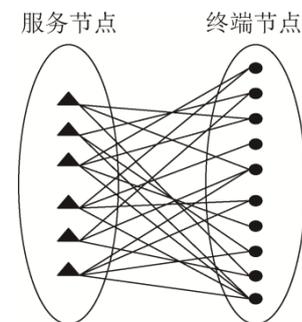


图1 分布式服务组合系统的二分网络结构示意图

Fig.1 Bipartite network diagram of DSCS

其中,本文将重点研究分布式服务组合系统中服务端节点和终端节点之间的演化关系,而服务节点之间、终端节点之间的演化关系不作考虑。

1.2 节点间的连边策略

在分布式服务组合系统中,终端节点的服务申请终将转化为服务节点的执行任务,因不同终端节点申请的服务功能可能各不相同,而完成不同的服务请求需要服务节点耗费的计算资源、存储资源等可能也各不相同,即需要服务节点的工作量大小不同,为了便于衡量不同服务申请的工作量大小,本文设定:

(1) 每条终端-服务边所承受的任务负载大体相当,即每条边的权重相同^[10];

(2) 每个服务节点的总处理能力相同,即服务节点可连接的边的最大个数相同;

(3) 不同终端节点的不同服务请求需要的不同工作量, 转化为不同终端节点的服务请求需要连接不同个数的服务节点, 即需要工作量大的终端服务申请, 需要连接的服务节点个数就多;

(4) 服务节点的度值定义为连接该服务节点的边的个数, 当前时刻服务节点承受的任务负载越大, 即服务节点的连接边越多, 则服务节点的度值越大。

因保持各服务节点承担任务量的“负载均衡”是保障分布式服务组合系统高可用性的关键要素之一, 依据上述的设定, 本文将保证服务节点承担任务量的“负载均衡”转换为保证各服务节点的度值大体均衡。在终端节点和服务节点间的连边选择方式上, 主要考虑服务节点中是否有局域世界(连接指定范围内的服务节点)、是否各服务节点的度值保持“负载均衡”两个主要原则, 其中无局域世界以全局范围内的服务节点信息为依据, 保持服务节点间的“负载均衡”, 即优先选择度值小的服务节点进行连接。具体分为 4 种情况, 如表 1 所示。

表 1 分布式服务组合系统中的连边策略
Tab. 1 Connection edge strategies of DSCS

分类	随机选择	负载均衡
无局域世界	无局域世界的随机选择方式	无局域世界的负载均衡方式
有局域世界	有局域世界的随机选择方式	有局域世界的负载均衡方式

1.3 建模步骤

基于上述分析, 本文构建的分布式服务组合系统的二分网络模型, 是按时间进行的, 即分析某一时间段内, 网络节点的增长、演化情况^[11](不考虑增加服务节点的情况), 模型构建的具体步骤如下:

(1) 初始时刻: 网络由 m_0 个连通的服务节点组成, 为保证网络中各服务节点间的连通性, 网络初始的边数 $e_0 \geq m_0 - 1$;

(2) 终端节点增加: 各时刻增加的终端节点个数符合 Poisson 分布, 而每个终端节点需要服务节点完成的任务量随机产生, 即每个新加终端节点的

服务请求需要和连接的服务节点个数不同, 具体值在 $[1 \sim m]$ 区间内随机产生, 其中当考虑局域世界情况时, m 的值不能超过局域世界中节点的最大值;

(3) 边增长: 新加终端节点依据其任务量的大小, 根据不同背景要求(参照 1.2 节内容), 采用不同的连边策略, 选择相应数目的服务节点进行连边。

(4) 返回(2), 直至达到规定的时刻大小为止。

依据以上说明, 构建二分网络模型的算法流程如图 2 所示, 其中 S , C 分别表示服务节点和终端节点这两类集合。

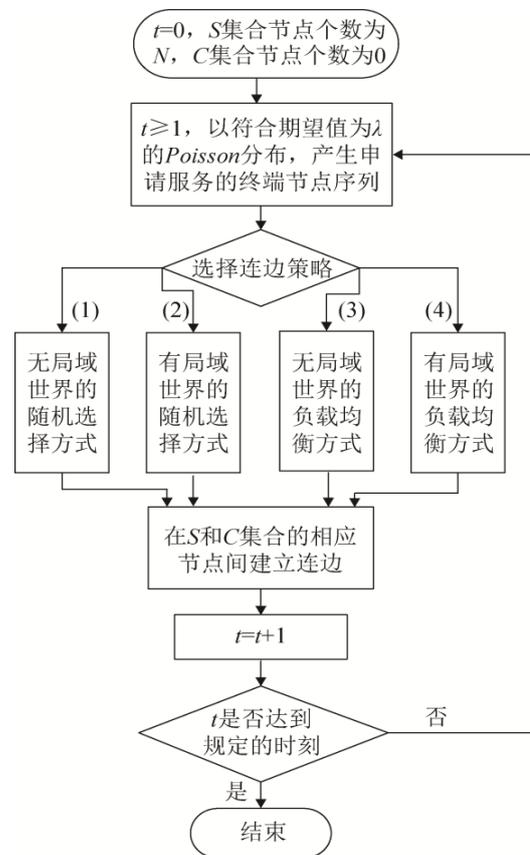


图 2 二分网络模型构建的算法流程图
Fig. 2 Algorithm flow chart of bipartite network structure

1.4 平均场理论

平均场理论^[12](the mean-field theory)是通过令节点 i 服从均匀分布, 从而建立节点 i 的度值 $k_i(t)$ 满足的动力学方程。下面以 BA 无标度网络模型为例进行说明。

假设网络初始时有 m_0 个孤立节点, 模型演化

t 时间步后, 共增加了 mt 条边, 节点 i 是在第 i 步加入网络的, $k_i(t)$ 表示在 t 时间步结束时节点 i 的度值, 则网络中每条边连接 2 个节点, 网络新增加的度值为 $2mt$, 即 $\sum_j k_j = 2mt$ 。

一个新节点选择节点 i 与之连接的概率为:

$$\Pi(k_i) = k_i / \sum_j k_j。$$

则每个时间步新增的 m 条边, 选择连接节点 i 的过程中, 节点 i 有一次被选中的概率大致为:

$$m[\Pi(k_i)][1 - \Pi(k_i)]^{m-1} \approx m \Pi(k_i)。$$

把 $k_i(t)$ 看作连续动力学函数, 节点 i 的度值 $k_i(t)$ 应该近似地满足动力学方程:

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} \approx m \Pi(k_i) = m \times k_i / \sum_j k_j = k_i / 2t, k_i(i) = m。$$

2 模型仿真与讨论

本文使用 Matlab R2013a 工具, 编程实现了分布式服务组合系统在四种不同连边策略情况下的二分网络演化模型, 对服务节点的度分布情况进行了理论分析和数值分析, 其中数值结果均为 100 次独立实验计算平均值后得到。

设定时间范围在一天 24 小时之间; 服务节点 S 的个数为 100; 终端节点 C 的初始个数为 0; 在 [1~24] 小时的时间内申请服务的终端节点个数服从 Poisson 分布, $A(\lambda, t)$ 为符合期望值为 λ 的 Poisson 分布在 t 时刻申请服务的终端节点序列; m 为终端节点申请连接服务节点的最大值, 每个终端节点申请连接的服务节点个数在 $[1-m]$ 区间内随机生成; $E(t)$ 是一向量, 存放 t 时刻申请服务的各个终端节点的任务量的大小, 即各个终端节点需要连接的服务节点个数, $E'(t)$ 为 $E(t)$ 的转置; $k_i(t)$ 表示 t 时刻节点 i 的度值, 根据平均场理论, 节点 i 的度值 $k_i(t)$ 是随时间 t 连续变化的, 则当前时刻服务节点度值的动力学方程等于申请服务的终端节点产生的边的总数 M 乘以服务节点被选择的概率 Π_i 。其中,

$$M = A(\lambda, t) \times E'(t)。$$

选择服务节点的概率 Π_i 依据不同的选择策略, 会产生不同的概率, 具体情况如下。

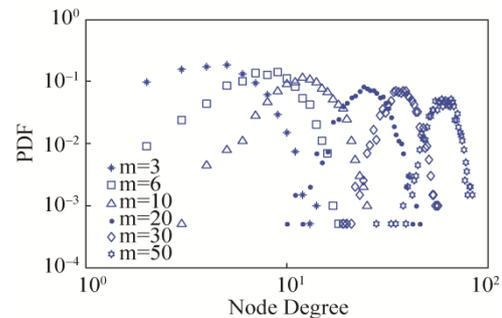
2.1 无局域世界的随机选择方式

终端节点以全局范围内的服务节点信息为依据, 随机选择要连接的服务节点, 则服务节点集合 S 中, 每个服务节点被选择的概率 $\Pi_i = 1/N$, 则服务节点 i 的度值随时间的变化为:

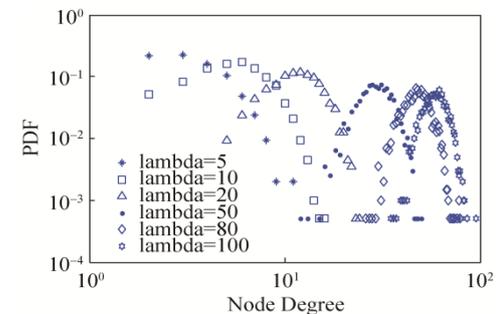
$$\left(\frac{\partial k_i}{\partial t}\right)_{\text{all_rand}} = A(\lambda, t) \times E'(t) \times \Pi_i = A(\lambda, t) \times E' t \times \frac{1}{N} \quad (1)$$

由式(1)可得, 在分布式服务组合系统的服务节点个数固定情况下, 服务节点 i 的度分布和终端节点 Poisson 分布的期望值、终端节点申请服务的工作量成正比。

数值仿真实验分 λ 值固定和 m 值固定两种情况进行。 λ 值固定, 表示每个时间段内申请服务的终端节点个数的平均值固定, 如 $\lambda=10$, 即每个时间段内平均有 10 个终端节点申请服务。 m 值固定, 表示每个终端节点申请服务的负载相同, 如 $m=10$, 即每个终端节点申请的服务均需要连接 10 个服务节点。具体实验结果如图 3 所示。



(a) 无局域世界的随机选择方式, $\lambda=10$



(b) 无局域世界的随机选择方式, $m=10$

图 3 无局域世界随机选择方式下服务节点度分布
Fig. 3 Degree distribution of service nodes in random selection without local-world

从图 3(a)和 3(b)可以分析出,随着 m 值或 λ 值的增大,服务节点的度值分布曲线在逐步右移,表明平均度值在逐步增大,即服务节点的度分布和 m 值、 λ 值成正比,证实了公式(1)的结论。

2.2 有局域世界的随机选择方式

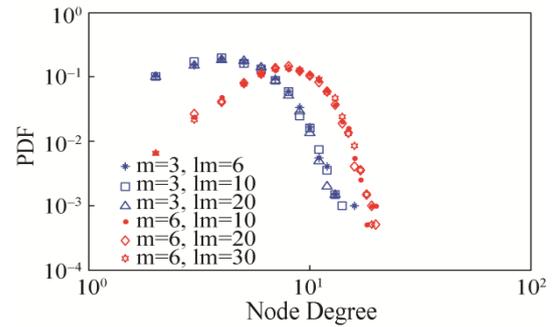
终端节点以局域范围内的服务节点信息为依据,随机选择要连接的服务节点,设局域世界的大小为 lm ,则局域世界被选中的概率为 $\Pi_{local}=lm/N$,局域世界中任意节点 i 被选中的概率为 $\Pi_{local(i)}=1/lm$,此过程中,服务节点 i 的度值随时间的变化为:

$$\left(\frac{\partial k_i}{\partial t}\right)_{local_rand} = A(\lambda, t) \times E'(t) \times \Pi_{local} \times \Pi_{local(i)} = A(\lambda, t) \times E'(t) \times \frac{lm}{N} \times \frac{1}{lm} = A(\lambda, t) \times E'(t) \times \frac{1}{N} \quad (2)$$

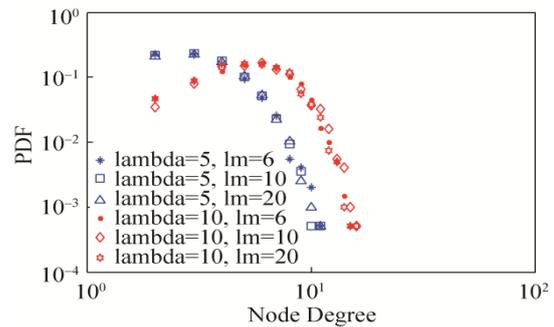
可以看出公式(1)和公式(2)的结论一样,理论分析表明无局域世界的随机选择方式与有局域世界的随机选择方式的服务节点度值变化是一致的。

数值仿真实验同样分 λ 值固定和 m 值固定两种情况进行,实验重点分析局域世界的大小对服务节点度分布是否有影响,具体实验结果如图 4 所示。

从图 4(a)可以看出, $(m=3, lm=6)$ 、 $(m=3, lm=10)$ 、 $(m=3, lm=20)$ 这 3 种情形的图形几乎完全重叠在一起,而 $(m=6, lm=6)$ 、 $(m=6, lm=10)$ 、 $(m=6, lm=20)$ 这 3 种情形的图形也几乎完全重叠在一起,说明服务节点的度分布只和 m 值的大小有关,和局域世界的大小 lm 的值无关。从图 4(b)可以看出,当 $m=4$, $(\lambda=5, lm=6)$ 、 $(\lambda=5, lm=10)$ 、 $(\lambda=5, lm=20)$ 这 3 种情形的图形几乎完全重叠在一起,而 $(\lambda=10, lm=6)$ 、 $(\lambda=10, lm=10)$ 、 $(\lambda=10, lm=20)$ 这 3 种情形的图形也几乎完全重叠在一起,说明服务节点的度分布只和 λ 值的大小有关,即在 λ 值相同的情况下, lm 在取 3 种不同值的情况下,服务节点的度分布几乎一样。同时,将图 4(a)和图 3(a)中 $m=3$ 和 $m=6$ 的度分布曲线对比,发现两个图中的度分布曲线几乎一致。



(a) 有局域世界的随机选择方式, $\lambda=10, m=3.6$



(b) 有局域世界的随机选择方式, $m=4, \lambda=5, 10$

图 4 有局域世界随机选择方式下服务节点度分布
Fig. 4 Degree distribution of service nodes in random selection with local-world

这些结论均说明在随机选择方式下,有局域世界和无局域世界的限定对服务节点的度值变化无影响。此实验结果证实了公式(2)的结论,为随机选择方式下,设计分布式服务组合系统,提供了理论支撑。

2.3 无局域世界的负载均衡方式

终端节点以全局范围内的服务节点信息为依据,并根据“负载均衡”原则,度值小的服务节点优先被选择。依据文献[8]中的结论,优先选择度值大的节点的概率为 $k_i / \sum_N k_i$,则本文优先选择度值小的服务节点的概率为 $\Pi_i = 1 - k_i / \sum_N k_i$,服务节点 i 的度值随时间的变化为:

$$\left(\frac{\partial k_i}{\partial t}\right)_{all_sort} = A(\lambda, t) \times E'(t) \times \Pi_i = A(\lambda, t) \times E'(t) \times \left(1 - \frac{k_i}{\sum_N k_i}\right) \quad (3)$$

由式(3)可得,在无局域世界的负载均衡方式,

服务节点度的变化与申请服务的终端节点满足的 Poisson 分布的期望值、终端节点申请服务的工作量大小、当前时刻各服务节点的度值三个因素有关,而当前时刻各服务节点的度值与之前连接服务节点的策略有关,即当前时刻各服务节点的度值被之前 λ 和 m 值的影响,因此,数值仿真实验继续从 λ 和 m 两个因素进行分析,具体实验结果见图 5。

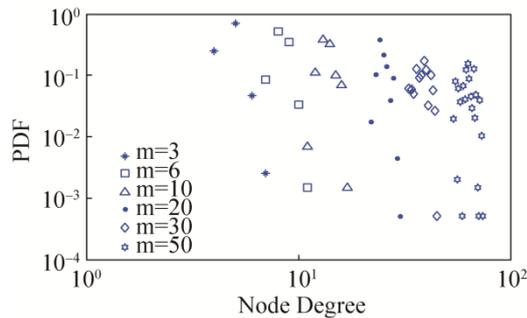
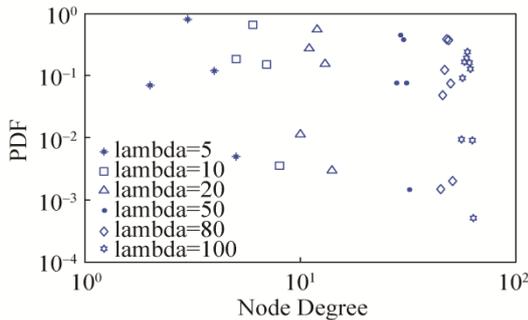
(a) 无局域世界的负载均衡方式, $\lambda=10$ (b) 无局域世界的负载均衡方式, $m=10$

图 5 无局域世界负载均衡方式下服务节点度分布
Fig. 5 Degree distribution of service nodes under load balancing without local-world

从图 5(a)可以看出,随着 m 值的增加,服务节点的平均度值逐步增大,但度分布的变化区间在减少。和无局域世界的随机选择方式相比,在参数值相同情况大小的度分布更均匀。并且随着 m 值的增加,服务节点度分布越偏离 Poisson 分布的形态,越接近均匀分布形态。从图 5(b)可以看出,该方式下服务节点的度分布已偏离 Poisson 分布的形态,且随着 λ 值的增加,服务节点的平均度值逐步增大,在参数值相同情况下,和无局域世界的随机选择方式相比,随着 λ 值越大,度值变化区间在逐步减少,即度值分布更均匀。

2.4 有局域世界的负载均衡方式

终端节点以局域范围内的服务节点信息为依据,并根据“负载均衡”原则,局域世界中度值小的服务节点优先被选择。此过程中,局域世界被选中的概率 $\Pi_{local} = lm/N$,局域世界中任意节点 i 被选中的概率为 $\Pi_{local(i)} = 1 - k_i / \sum_{local} k_i$,服务节点 i 的度值随时间的变化为:

$$\left(\frac{\partial k_i}{\partial t} \right)_{local_sort} = A(\lambda, t) \times E^2(t) \times \Pi_{local} \times \Pi_{local(i)} = A(\lambda, t) \times E^2(t) \times \frac{lm}{N} \times \left(1 - \frac{k_i}{\sum_{local} k_i} \right) \quad (4)$$

从式(4)分析,在有局域世界的负载均衡方式下,服务节点度的变化与申请服务的终端节点满足的 Poisson 分布的期望值 λ 、终端节点申请服务的工作量大小 m 、局域世界的大小 lm 、当前时刻各服务节点的度值 k_i 四个因素有关,和公式(3)对比分析,数值仿真实验中重点分析了局域世界大小对服务节点度分布有影响,具体实验结果见图 6。

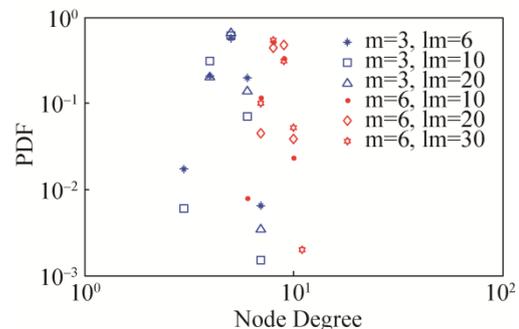
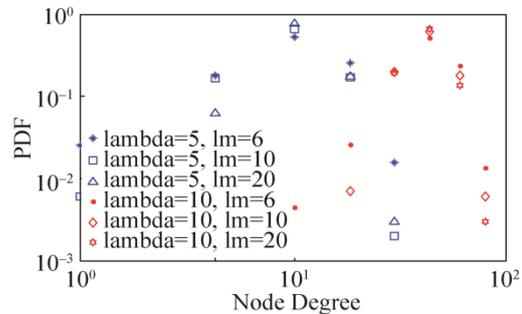
(a) 有局域世界的负载均衡方式, $\lambda=10, m=3,6$ (b) 有局域世界的负载均衡方式, $m=4, \lambda=5, 10$

图 6 有局域世界负载均衡方式下服务节点度分布
Fig. 6 Degree distribution of service nodes under load balancing with local-world

从图 6(a)可以看出, $(m=3, lm=6)$ 、 $(m=3, lm=10)$ 、 $(m=3, lm=20)$ 和 $(m=6, lm=6)$ 、 $(m=6, lm=10)$ 、 $(m=6, lm=20)$ 6 种情况下, 当 m 值相同, lm 值不相同, 其度分布的曲线只是部分重合, 和图 4(a) 对比分析, $m=3$ 和 $m=6$ 时的度分布曲线也不相同, 说明局域世界 lm 的大小对服务节点的度分布是有影响的。

从图 6(b)可以看出, 当 $m=4$, $(\lambda=5, lm=6)$ 、 $(\lambda=5, lm=10)$ 、 $(\lambda=5, lm=20)$ 和 $(\lambda=10, lm=6)$ 、 $(\lambda=10, lm=10)$ 、 $(\lambda=10, lm=20)$ 六种情况下, 当 m 和 λ 值相同, lm 值不相同, 其度分布的曲线只是部分重合, 和图 4(b) 对比分析, $\lambda=5$ 和 $\lambda=10$ 时的度分布曲线也不相同, 说明局域世界 lm 的大小对服务节点的度分布是有影响的, 验证了公式(4)的结论。

2.5 讨论

上述 4 种连边策略的八种情形下的数值仿真实验均没有发现服务节点度分布具有幂率特性(这和文献[13]的部分结论一致), 而是发现在无局域世界的随机选择、无局域世界的负载均衡两种连边和有局域世界的随机选择 3 种方式下, 服务节点的度分布和终端节点满足的 Poisson 分布期望值大小、终端节点申请的任务量大小 2 个因素有关。并且在参数值相同的情况下, 无局域世界的随机选择和有局域世界的随机选择 2 种方式的服务节点度分布几乎一样。该结论符合现实中移动通信不设置区域限制的情形, 为随机选择方式下, 设计分布式服务组合系统, 提供了理论支撑。

3 结论

本文基于分布式服务组合系统的特征, 运用复杂网络动态演化过程的建模方法, 建立了 4 种连边策略下分布式服务组合系统的二分网络演化模型。分析了 Poisson 分布期望值、终端节点申请的任务量、局域世界规模 3 个因素与服务节点度分布之间的关系。理论推导和仿真模拟实验结果均发现在随机选择方式下有局域世界和无局域世界对服务节

点的度分布变化无影响, 这些工作使我们更进一步了解分布式服务组合系统的拓扑结构及其形成机理, 可以为设计高资源利用率的分布式服务组合系统提供辅助参考。但现实世界中终端节点还可能还存在无标度等涌现特性, 这需要在下一步工作中进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
Wang Xiaofan, Li Xiang, Chen Guanrong. Network Science: An Introduction[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [2] Zhang Ruixia, Li Deyu, Jin Zhen. Dynamic analysis of a delayed model for vector-borne diseases on bipartite networks [J]. Applied Mathematics and Computation (S0096-3003), 2015, 263(7): 342-352.
- [3] Yanbo Qi, Zhong Liu, Huadong Chen, et al. Distributed Combat System of Systems Network Modeling[J]. Journal of Networks(S1796-2056), 2013, 8(8): 1906-1912.
- [4] Weiqiong Zhong, Haizhong An, Xiangyun Gao, et al. The evolution of communities in the international oil trade network[J]. Physica A(S0378-4371), 2014, 413: 42-52.
- [5] 张明清, 危美林, 孔红山, 等. 面向军事应用的信息栅格网络拓扑建模研究[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(2): 301-306.
Zhang Mingqing, Wei Meilin, Kong Hongshan, et al. Topology Modeling of Information Grid Network for Military Applications[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(2): 301-306.
- [6] 张强, 李建华, 沈迪. 基于复杂网络的战场信息共享效能建模与分析[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(4): 875-880.
Zhang Qiang, Li Jianhua, Shen Di. Modeling and Analyzing of Battlefield Information Sharing Effectiveness Based on Complex Networks[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(4): 875-880.
- [7] Dorogovtsev S N, Mendes J F F. Evolution of networks[J]. Advances in Physics(S2347-3487), 2002, 51(4): 1079-1187.
- [8] Li X, Chen G. A local world evolving network model [J]. Physica A (S0378-4371), 2003, 328: 274-286.
- [9] Li X, Jin Y Y, Chen G. Complexity and synchronization of the World Trade Web [J]. Physica A (S0378-4371), 2003, 328: 287-296.

(下转第 17 页)