

# 基于马尔可夫过程的云服务组合 QoS 量化评估方法研究

焦扬<sup>1</sup> 陈喆<sup>1</sup> 梁员宁<sup>2</sup> 李东星<sup>1</sup>

(解放军信息工程大学 郑州 450004)<sup>1</sup> (中国人民解放军 78179 部队 成都 611830)<sup>2</sup>

**摘要** 针对云服务组合的 QoS 量化评估方法进行了研究。基于组合云服务环境中虚拟动态性和服务随机性的特点,提出了基于 BPEL 流程的云服务组合实现框架;在随机 Petri 网理论的基础上建立了组合云服务流程网模型 (CCSPNet),进而应用马尔可夫过程对其进行性能评估,提出了云服务组合的六维 QoS 评价体系,并结合 CCSPNet 模型提出了云服务组合的 QoS 定量评估方法。通过应用实例分析表明,提出的方法具有较好的动态适应性和灵活性,能有效满足云服务应用环境的 QoS 评估需求。

**关键词** 云计算,服务组合,马尔可夫过程,QoS 评估

**中图分类号** TP302 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.9.024

## Research on QoS Quantitative Evaluation Method of Cloud Service Composition Based on Markov Process

JIAO Yang<sup>1</sup> CHEN Zhe<sup>1</sup> LIANG Yuan-ning<sup>2</sup> LI Dong-xing<sup>1</sup>

(PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450004, China)<sup>1</sup> (Army Unit 78179 of PLA, Chengdu 611830, China)<sup>2</sup>

**Abstract** This paper studied the QoS quantitative evaluation method of cloud service composition. On the basis of the characteristics of combined cloud service environment of virtual dynamic nature and random service, this paper put forward the realization frame of cloud service composition based on BPEL workflow, established the combined cloud service process net (CCSPNet) based on the theory of stochastic Petri net, evaluated the performance with Markov process, and proposed the six-dimensional QoS evaluation system and the QoS quantitative evaluation method of cloud service composition combined with the CCSPNet module. The application example shows that the new method has better dynamic adaptability and flexibility and can satisfy QoS evaluation requirement of cloud service application environment effectively.

**Keywords** Cloud computing, Service composition, Markov process, QoS evaluation

## 1 引言

可以共享和集成自治元服务资源是云计算服务环境中信息处理系统的基本结构单元,这决定了云服务的主要特点是松散耦合与服务的可重用性,易于组合和虚拟的动态优化。云服务组合本质上是通过相关协议将分布在自治软硬件基础设施资源上的元服务进行交互、整合与重组,为云服务使用者提供增值服务。而云服务环境的虚拟动态性和服务的随机性,使得服务系统必须能够动态适应和处理不可预知的变化,为海量的云服务用户提供高质量的信息服务。为此,需要对云服务系统的运行状态进行 QoS 分析评估。

现有的针对云服务 QoS 评估方法的研究主要集中在两个方面:(1)如何对云服务的 QoS 进行科学的定义和描述;(2)如何对云服务的 QoS 进行全面准确的评估。

云服务的 QoS 评价体系描述方面,文献[1]将 QoS 标准分成 14 个不同层面进行讨论并给出参考定义,但是仅限于概念定义而缺乏定量的表达式;文献[2]给出了制造资源服务的

QoS 评价体系描述及表达式,但是这些定义着重表达了 Web 服务的在线服务特征而忽略了其离线制造资源的特性;文献[3]对 QoS 评价体系进行了描述,但是其中只包含了费用、响应时间、可靠性 3 个方面,对 QoS 的特性概括不全面。

云服务的具体 QoS 评估方法研究主要集中于采用实测试题和模拟仿真的思想,如文献[4]对服务系统运行日记的机理信息进行搜集整理,开发出了提取服务系统性能信息的工具 JWSPerf,并通过在服务测试平台中进行测试用例的分析,利用服务消息交互的测试数据记录信息对组合服务的性能进行评价;文献[5]把 BPEL 业务流程描述的组合服务转换为 WS-TEFSM 模型后,通过对服务组合进行测试,可以分析出其性能指标;文献[6]利用计算机仿真软件对组合服务的 BPEL 业务流程进行模拟分析,得出服务性能的仿真分析数值。然而实测度量 and 模拟仿真的方法主要存在两个局限性:(1)需要在指定的服务环境实例下进行;(2)可靠性输入参数和可靠性度量指标之间的描述关系不能为服务系统的改善和可靠性灵敏度分析提供有效的数据信息。

到稿日期:2014-09-13 返修日期:2014-11-29 本文受国家“863”计划基金资助项目(2008AA01Z404),国防预研基金资助项目(9140A26010306JB5201)资助。

焦扬(1988-),男,硕士生,主要研究方向为系统工程与信息安全;陈喆(1970-),男,博士,副教授,主要研究方向为系统工程;梁员宁(1986-),男,硕士,主要研究方向为可靠性与信息安全;李东星(1989-),男,硕士生,主要研究方向为系统工程。

针对上述两方面的问题,本文提出一种基于马尔可夫过程的云服务组合 QoS 量化评估方法,从而对组合云服务的运行状态进行 QoS 分析评估。本文第 2 节中对组合云服务的实现框架进行系统描述,并应用 Petri 网工具对组合云服务流程网进行建模,为对组合云服务 QoS 进行定量评估打下了基础;第 3 节提出了云服务组合的六维评价体系定义,并通过基于马尔可夫过程的 CCSPNet 模型中性能参数的计算,给出云服务组合六维 QoS 评价体系中各指标的计算公式,实现了对云服务组合的 QoS 定量评估;第 4 节通过实例验证所提出的评估方法;最后总结全文。

## 2 组合云服务实现框架及服务流程网建模

### 2.1 组合云服务实现框架

组合云服务的应用中,按照构建服务的提供者是否被绑定或者指定,可将服务组合划分为静态服务组合和动态服务组合。静态服务组合由于其按照事先规定好的约束规则进行交互,建立相应的组合服务请求调用时快速简便、效率高,其缺点是组合形式单一,缺乏灵活性;动态服务组合是根据服务

请求者的服务要求,自动匹配满足功能需求的服务并根据服务的非功能属性要求进行约束,从而形成动态的服务模式,动态服务组合具有灵活和支持非功能属性约束的优点,但其管理比较复杂,匹配动态参数较为困难。

BPEL 服务组合流程的业务应用非常广泛,如基于工作流描述语言 BPEL4WS<sup>[7]</sup>的 Web 服务组合,它是由 IBM、Microsoft 和 BEA 公司共同提出,用以规范和统一业务流程建模,BPEL4WS 以参与者和业务流程的交互为基础定义了业务流程的描述方法及业务流程的建模方式。BPEL 业务流程可分为抽象业务流程和可执行的业务过程,抽象业务流程主要是每个参与者之间的交互信息的抽象描述活动,可执行业务流程是对实际的活动参与者进行交互行为描述,包括交互信息的传递、执行活动的先后次序和发生错误后的补偿处理等。因此,只要是符合服务规范的服务,就可以直接通过 BPEL 流程进行调用,以满足多个服务交互协作与协调,从而实现服务请求者的需求。基于业务流程的服务组合实现框架如图 1 所示,由服务请求者、服务代理、服务提供者、服务注册管理中心、服务自动组合推理引擎和本体查询/存储引擎等部分组成。

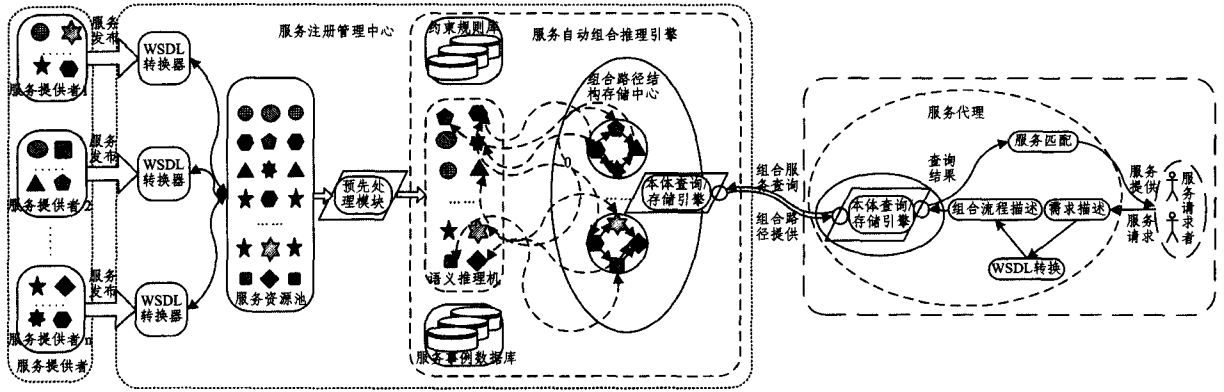


图 1 基于业务流程的云服务自动组合实现框架

图 1 是基于业务流程的云服务自动组合实现框架,首先是通过 WSDL 转换器将服务提供者所提供的服务描述文档信息进行转换处理,同时向服务注册管理中心发布;其次,服务注册中心将不同的服务进行功能聚集,构成服务资源池,资源池中的服务可抽象地划分为几个层次,相同的一组原子服务可以通过预先推理模块将原子服务提取为该服务的成份服务,通过从上至下的映射模式把不同的原子服务和成份服务进行相互关联;然后把服务资源池中抽象的原子服务利用语义推理技术,根据服务之间的组合规则、语义服务逻辑组合关系、服务事例数据对成份服务进行组合。利用图像存储技术把服务组合的路径结构信息存储于组合路径结构存储中心,采用本体查询/存储引擎对组合路径进行自动存储跟踪标记并且能够查询匹配。当出现服务请求者提出需求描述时,服务代理需要将其服务需求描述进行转换,形成组合流程描述,通过查询引擎在组合路径结构存储中心查询符合服务需求的服务组合方案;服务代理根据查询结果,依照符合需求的组合方案执行完成服务的调用与组合,并将完整的组合方案提供给服务请求者。

### 2.2 组合服务流程网模型的建立

云服务 QoS 的评估是建立在建模分析的基础上的,而定量分析 QoS 指标又是 QoS 建模的基础,因此 QoS 评估建模分析是在服务组合规范和定量分析描述结果的基础上,利用

形式化描述对 QoS 进行分析,从而实现两者的综合运用。一般的云服务 QoS 评估分析包括定量计算分析和定性描述分析,目前的云服务 QoS 评估研究较为偏向定性分析,定量分析的研究方法使用较少。为了解决云服务组合 QoS 建模问题,本文综合利用定量与定性的分析方法对云服务组合的 QoS 进行评估。首先以定性的 QoS 描述模型作为定量分析建模的依据,进而定量地对 QoS 指标进行量化分析建模与结果验证。

在应用服务领域, Petri 网作为一种形式化、图形化的数学建模和分析工具,得到了广泛的应用,特别适合在分布式复杂应用系统中异步、并发、随机不确定性的性质中使用。Petri 网理论提供了以数学理论为基础的图形化描述的形式化建模方法,可以对系统运行的行为模式进行形式化建模,同时可以验证与服务软件系统相关的属性信息,例如:位置的有界性(boundedness)、状态的可达性(reachability)、无死锁性(deadlockfree)、终止性(termination)、事件之间的同步距离(synchronic distance)和可替换性(replaceability)等,其行为描述能力与定量分析能力非常强大,可以很好地对网络系统和分布式系统进行建模和模拟,可以用于系统的能力规划、在线性能管理和系统的性能预测。

随机 Petri 网<sup>[8]</sup>(Stochastic Petri Net, SPN)是 Petri 网的扩展,其因包括了时间因素,所以是动态地描述系统所发生的

变化。对系统动态行为的建模有助于定量和定性分析系统的各项性能指标,且其组成不因系统资源数目的改变而发生大的变化,具有很强的动态适应性。因此,在随机 Petri 网的系统模型架构上采用图形化的建模方式构建云服务组合的 QoS 评估模型具有很大的优势。

在实际应用当中,云服务的规模普遍较大,利用随机 Petri 网构建服务的 QoS 模型可能会存在状态空间爆炸问题。为了避免这一问题,同时也使得问题求解变得简单可行,在本文利用广义随机 Petri 网(General Stochastic Petri Net, GSPN)进行随机 Petri 网的扩展。GSPN 可以准确描述云服务系统的状态以及状态之间的改变,可以用来对云服务系统的 QoS 进行分析。

**定义 1**(对于广义随机 Petri 网模型, GSPN) GSPN 是一个六元组  $GSPN=(P, T, A, W, M_0, \lambda)$ , 其中:  $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  表示位置(Place)的有穷集合;  $T$  表示变迁(Transition)的有穷集合,分为两个变迁子集:  $T=T_i \cup T_i, T_i \cap T_i = \emptyset$ , 这里  $T_i=\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  表示时间变迁(Time Transition)集合,  $T_i=\{t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_n\}$  表示瞬时变迁(Immediate ransition)集合;  $A=A_{p_i} \cup A_{p_j} \cup A_i$  表示弧的集合,  $A_{p_i} \subseteq P \times T$  表示从位置(Place)到变迁(Transition)的弧集合,  $A_{p_j} \subseteq T \times P$  表示从变迁到位置的弧集合,  $A_i \subseteq S \times T$  表示从位置到变迁的禁止弧集合,在连接变迁实施时,无标记从位置移去;  $W: T_i \rightarrow N^+$  表示瞬时变迁的弧权函数集合,  $N^+$  为非零自然数;  $M_0: S \rightarrow N$  表示初始状态标识,  $N$  为自然数;  $\lambda=\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k\}$  表示与时间变迁集合密切相关的变迁平均实施速率集。当在一个标识  $M$  下存在有多个可实施的瞬时变迁时,需要在标识  $M$  处定义一个随机开关,并设定每个可实施瞬时变迁的实施选择规则。

云服务系统具有分布性和异构性等特点,导致服务失效问题的发生将不可避免。服务失效是指服务节点软硬件运行行为对服务使用者需求的偏离,是软件服务的一个动态特征。服务节点发生失效后将会停止服务,直到问题解决,服务被恢复。当服务器节点遇到突然爆发式的服务请求、临时中断、网络丢包和恶意的入侵攻击等可修复故障时,采用恢复策略来解决服务遇到失效而被迫终止的问题。

随机 Petri 网的形式化语义模型为面向云服务体系结构的业务流程设计提供了有利的形式化描述能力。在云服务环境中,随机 Petri 网模型和基于业务流程的组合服务模型之间存在着较为直观的对应关系,能够直接将 BPEL 映射为随机 Petri 网模型;随机 Petri 网模型具有同步、异步和并发机制,可以很好地描述服务组合的行为特征;随机 Petri 网作为云服务的 QoS 建模工具,其较为成熟的理论基础、方法和工具使其具有较强的优势。依据 BPEL 业务流程与随机 Petri 网之间的对应关系,在随机 Petri 网的基础上进行扩展,给出组合云服务流程网模型,其具体定义由定义 2 给出。

**定义 2**(组合云服务流程网模型, Composite Cloud Service Process Net, CCSPNet) CCSPNet 是一个四元组:  $CCSPNet=(G, \Omega, s, f)$ , 其中,  $G$  是一个广义随机 Petri 网;  $\Omega$  是外部服务的操作集合;  $s$  是输入库所,是服务组合流程开始执行的标志,当该库所中拥有一个令牌时,开始执行服务组合业务流程;  $f$  是输出库所,是服务组合流程执行结束的标志,当该库所中拥有一个令牌时,服务组合业务流程执行完毕。

利用 CCSPNet 模型评估 BPEL 业务流程描述的组合服

务 QoS 时,需要把 BPEL 业务流程的机构化活动和基本活动转化为对应的 CCSPNet 模型,通过定义随机开关信息确定瞬时变迁实施规则,分析 CCSPNet 模型组合服务的 QoS 参数,最后根据组合服务的 QoS 评估结果对组合服务进行优化设计。基于 CCSPNet 描述的组合云服务 QoS 计算模型是对服务之间各种交互行为的动态性建模,利用 CCSPNet 模型描述 BPEL 业务流程的组合云服务 QoS,其核心是建立由 BPEL 业务流程向 CCSPNet 计算模型的转换关系。通过构建 BPEL 业务流程结构化活动和基本活动向 CCSPNet 模型转换的规则描述,利用 BPEL 活动的嵌套组合形式得到整个服务组合的 QoS 模型。

### 3 云服务组合 QoS 量化评估方法

本节首先利用马尔可夫过程对 CCSPNet 模型的 QoS 参数进行评估计算,进而根据组合云服务的应用特点定义组合云服务的六维 QoS 评价体系,并借助 C 网模型中对 QoS 参数的计算,给出云服务组合应用中 QoS 指标的定量计算公式。

#### 3.1 CCSPNet 性能量化评估计算

对于组合云服务 QoS 的评估计算,需要利用由 BPEL 业务流程转换得到的组合云服务流程网模型的体系结构信息,以及构成组合云服务的元应用服务 QoS 信息进行综合分析求解。首先通过组合云服务流程网模型构造组合云服务 QoS 评估模型 CCSPNet,由于 CCSPNet 网模型中的服务执行速率和消息传输速率均服从一定参数的指数分布,可将得到的 CCSPNet 转化为同构的连续时间 MC<sup>[11]</sup>。CCSPNet 模型中每个标识与同构的 MC 状态之间具有一一对应关系,CCSPNet 模型的状态可达图同构于连续时间马尔科夫的状态空间,在求得 MC 的瞬时或稳定状态概率分布后,进一步对 CCSPNet 网模型库所中的令牌进行分析,即可得到评估组合云服务 QoS 的相关参数信息。

**定义 3** CCSPNet 模型的状态转移矩阵  $R=[r_{ij}], 1 \leq i, j \leq n$ , 满足以下两个条件:

(1) 当矩阵中的元素  $i \neq j$  时,若有  $\exists t_k \in T; M_i[t_k] > M_j$ , 则存在  $r_{ij} = d(1 - e^{-\lambda_k \tau}) / d\tau|_{\tau=0} = \lambda_k$ , 否则,  $r_{ij} = 0$ ;

(2) 当矩阵中的元素  $i = j$  时,有  $r_{i,i} = d \prod_k (1 - (1 - e^{-\lambda_k \tau})) / d\tau|_{\tau=0} = d(e^{-\tau \sum_k \lambda_k}) / d\tau|_{\tau=0} = -\sum_k \lambda_k$ , 其中  $k \neq i$ , 并且有  $\exists M' \in [M_0], \exists t_k \in T; M_i[t_k] > M', \lambda_k$  表示  $t_k$  的速率值。

当  $i \neq j$  时, CCSPNet 模型的状态转移矩阵  $R$  中的元素值  $r_{i,j}$  可通过状态可达图中两个状态之间相连弧上的标注速率值获得,如果两个状态之间不存在连接关系,则标注值为 0; 当  $i = j$  时,元素值  $r_{i,i}$  的计算方法是将从状态  $M_i$  到输出的所有弧上标注的速率值进行求和运算后取其相反数。

通过 CCSPNet 模型的状态转移矩阵,可以求得每个可达状态标识相应的瞬时概率和稳态概率。令  $P[WS_i](t) = x_i(t)$ , 表示组合服务在任意时刻  $t$  每个可达状态标识的瞬时概率; MC 的稳定状态概率可以表示为  $P[WS_i] = \pi_i$ , 根据马尔可夫链的遍历性得到线性方程组:

$$\begin{cases} (x_1'(t), x_2'(t), \dots, x_n'(t)) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))D \\ \sum x_i(t) = 1, 1 \leq i \leq n \\ \Pi D = 0 \\ \sum \pi_i = 1, 1 \leq i \leq n \end{cases}$$

其中,  $\pi_i$  为稳定状态情况下处于位置  $WS_i$  的概率, 马尔科夫

链中  $n$  个标记的稳定概率是一个行向量  $\Pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ ;  $D$  为变迁速率矩阵, 元素  $d_{ij}$  表示从位置  $WS_i$  转移到位置  $WS_j$  的所有转移概率之和, 如果两位置之间不存在直接联系, 则  $d_{ij} = 0 (i \neq j)$ ,  $d_{ij}$  由  $\sum_k k_{ij} = 0$  决定,  $D$  的阶数和状态数量一致, 通过求  $D$  中的元素即可得矩阵  $D$ 。求解以上两个方程组即可得每个可达状态标识的瞬时概率和稳态概率。

假设  $X$  表示与描述输出度量的稳态回报率相对应的随机变量,  $\pi_k$  是实存标识  $k_i$  (只有时间变迁实施的标识) 的稳态概率,  $r_k$  是标识  $k_i$  的回报率, 则组合云服务在执行过程中不发生失效的概率 (即在稳态下的期望回报率) 为:  $E[X] = \sum_{k_i \in \Omega_T} r_{k_i} \pi_{k_i}$ ,  $\Omega_T$  表示实存标识的集合。

假设  $X(t)$  表示与瞬时回报率对应的随机变量,  $\pi_{k_i}(t)$  是在时刻  $t$  位于消失标识  $k_v$  (瞬时变迁的实施标识) 的概率, 则到时刻  $t$  为止, 组合云服务不发生失效的概率 (即在时刻  $t$  的期望瞬时回报率) 为  $E[X(t)] = \sum_{k_i \in \Omega_T} r_{k_i} \pi_{k_i}(t)$ ,  $\Omega_V$  表示消失标识的集合。

在求得 CCSPNet 模型可达状态的瞬时概率和稳态概率的基础上, 可以进一步分析其它可靠性指标, 如 CCSPNet 模型每个状态的平均停留时间、两个状态之间转移的平均等待时间、模型中令牌的概率密度函数、库所中的平均令牌数、变迁的利用率和变迁的令牌流速等。计算公式分别如下:

(1) 每个状态的平均停留时间。假设用  $H$  表示在状态  $M$  下所有可实施的变迁集, 则状态  $M$  的平均停留时间为:

$$\bar{\tau}(M) = \frac{1}{\sum_{t_j \in H} \lambda_j}$$

(2) 两个状态转移平均等待时间。根据两个状态之间的转移方式, 可分为直接转移、唯一中间状态转移和多个中间状态转移 3 种。

① 对于状态  $M_i$  和状态  $M_j$ , 如果两者之间仅由唯一的变迁  $t_m$  触发进行转移, 则平均等待时间为:

$$\bar{\tau}(M_j | M_i) = \frac{1}{\lambda_m} (i \neq j)$$

其中  $M_i[t_m]M_j$ 。

② 对于状态  $M_i$  和状态  $M_j$ , 两者的转移需通过唯一的中间状态  $M_k$  才能完成。假设状态  $M_i$  转移到中间状态  $M_k$  由变迁  $t_a$  触发, 中间状态  $M_k$  到状态  $M_j$  的转移由变迁  $t_b$  触发, 则由状态  $M_i$  转移到状态  $M_j$  的平均等待时间为:

$$\bar{\tau}(M_j | M_i) = \bar{\tau}(M_k | M_i) + \bar{\tau}(M_j | M_k) = \frac{1}{\lambda_a} + \frac{1}{\lambda_b}$$

其中,  $M_i[t_a]M_k[t_b]M_j$ 。

③ 对于状态  $M_i$  和状态  $M_j$ , 两者的转移是按照一定的概率从多个中间状态选择一个作为中间状态进行, 假设状态  $M_i$  通过变迁  $t_a$  转移到中间状态  $M_m$  和状态  $M_n$  的概率分别为  $P(M_m)$  和  $P(M_n)$ , 状态  $M_m$  转移到状态  $M_j$  由变迁  $t_b$  触发, 状态  $M_n$  转移到状态  $M_j$  由变迁  $t_c$  触发, 则由状态  $M_i$  转移到状态  $M_j$  的平均等待时间为:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}(M_j | M_i) &= \bar{\tau}(M_m | M_i) + \bar{\tau}(M_n | M_i) + \bar{\tau}(M_j | M_m) + \\ &\quad \bar{\tau}(M_j | M_n) \\ &= (P(M_m) + P(M_n)) \frac{1}{\lambda_a} + P(M_m) \frac{1}{\lambda_b} + \\ &\quad P(M_n) \frac{1}{\lambda_c} \end{aligned}$$

其中,  $M_i[t_a]M_m \vee M_n, M_m[t_b]M_j, M_n[t_c]M_j, i \neq m \neq n \neq j, a \neq b \neq c$ 。

(3) 令牌的概率密度函数。假设对于  $\forall p \in P, \forall i \in N$ , 在稳定状态下, 库所  $p$  中拥有令牌数量为  $i$  的概率为  $P[M(p) = i]$ , 则库所  $p$  的令牌概率密度函数为:

$$P[M(p)] = \sum_j P[M_j]$$

其中,  $M_j \in [M_0]$  且  $M_j(p) = i$ 。

(4) 平均令牌数。假设对于  $\forall p \in P$ , 库所  $p$  拥有的平均令牌数为  $\bar{u}(p)$ , 则由令牌的概率密度函数  $P[M(p)]$  有:

$$\bar{u}(p) = \sum_j j \times P[M(p) = j]$$

(5) 变迁的利用率。假设对于  $\forall t \in T$ , 变迁  $t$  的利用率用  $U(t)$  表示, 则有:

$$U(t) = \sum_{M \in E} P[M]$$

其中,  $E$  表示由变迁  $t$  触达到可达状态集合,  $P[M]$  表示每个可达状态的稳定概率。

(6) 变迁的令牌流速。假设对于  $\forall t \in T$ , 变迁  $t$  的平均实施速率用  $\lambda_t$  表示, 变迁的利用率为  $U(t)$ , 则单位时间内变迁  $t$  中令牌的流通数量为:

$$V(t, p) = P(t, p) \times U(t) \times \lambda_t$$

其中,  $P(t, p)$  表示变迁  $t$  触发时令牌流入后继库所  $p$  的概率。

以上是基于状态空间利用马尔科夫过程对 CCSPNet 模型的性能分析过程, 通过灵活使用这些不同的性能分析指标, 可以综合评估组合云服务中各种 QoS 的指标。

### 3.2 组合云服务六维 QoS 量化评估方法

本文中提出一组符合制造云服务环境的六维 QoS 评价体系并在综合考虑各个指标的影响因素的基础上提出了相应的计算公式; 通过借助基于马尔可夫过程的 CCSPNet 性能量化评估方法对组合云服务的六维 QoS 评价指标进行定量计算。

云服务组合的六维评价体系包括 6 个不同的 QoS 参数, 定义如下:

(1) 响应时间 ( $T$ )。响应时间是指用户发出服务请求到服务执行完成并返回执行结果全过程中消耗的时间。响应时间计算表达式为:  $(T_{on} + T_{off}) * \Gamma_{deviation}$ 。

决定响应时间值的因素有 3 个, 即在线执行时间  $T_{on}$ 、离线执行时间  $T_{off}$ 、误差系数  $\Gamma_{deviation}$ 。在线执行时间是指在虚拟的云服务环境下, 系统响应用户请求并执行计算机程序的时间之和。

离线执行时间表示在离线环境中制造云服务消耗的 4 项时间总和。

$$T_{off} = T_{management} + T_{wait} + T_{logistic} + T_{execution}$$

其中,  $T_{management}$  表示服务管理流程时间,  $T_{wait}$  表示程序等待执行时间,  $T_{logistic}$  表示物理运输时间,  $T_{execution}$  表示任务执行时间。

误差系数  $\Gamma_{deviation}$  用来描述制造云服务的实际执行时间相对于预期执行时间的变化程度与波动性。误差系数的表达式为:

$$\Gamma_{deviation} = \prod_{i=1}^n [1 + (T_{actual} - T_{expected}) / T_{expected}]$$

其中,  $T_{expected}$  表示预计执行时间,  $T_{actual}$  表示实际执行时间,  $n$  表示总的运行云服务的次数。

在线执行时间  $T_{on}$  取决于网络的带宽、当时网络负载等,

因此与 CCSPNet 中的平均令牌数和变迁的令牌流速有关。平均令牌数越多,变迁的令牌流速越大,则在线执行时间越短。其表达式为:

$$T_{on} = \frac{1}{u(p)} \times V(t, p) = \frac{P(t, p) \times U(t) \times \lambda_t}{\sum_j P[M(p)=j]}$$

(2)可靠性(reliability, Rel)。可靠性指的是在规定的时间内和条件下成功完成任务的能力。计算式考虑云服务的服务利用率  $R_{s_{exe}}$  和服务失效率  $R_{s_{failure}}$ , 且

$$R = \beta_1 R_{s_{exe}} + \beta_2 / R_{s_{failure}}$$

用户可以根据不同的应用环境设置  $\beta_1$  和  $\beta_2$  的值,使  $0 < Rel < 1$ 。

服务利用率指的是在时间段  $T$  内,正确执行云服务的次数占到的执行云服务次数的比例。云服务的服务利用率大小取决于 CCSPNet 模型中变迁的利用率,即

$$R_{s_{exe}} = U(t) = \sum_{M \in E} P[M]$$

服务失效率指的是工作到时刻  $t$  为止,组合云服务不发生失效的概率。它是关于时间  $t$  的函数,因此记为  $R_{s_{failure}}(t)$ ,我们称之为失效函数,有时也称为风险函数或故障率函数。服务失效率取决于时刻  $t$  的期望瞬时回报率  $E[X(t)]$ ,因此:

$$R_{s_{failure}}(t) = E[X(t)] = \sum_{k_t = \Omega_T} r_{k_t} \pi_{k_t}(t)$$

因此云服务的可靠性定量计算公式如下:

$$R = \beta_1 \left( \sum_{M \in E} P[M] \right) + \beta_2 / \left( 1 - \int_t^{\infty} P[M(p)] \right)$$

进而可导出云服务组合的可靠性公式如下:

$$R_{com} = \prod_{i=1}^n R_{CS_i}$$

(3)稳定性(stability, St)。稳定性是指云服务在提供服务能力的同时也具备对未知的状态或故障的处理能力,比如在线方面:网络通信、网络带宽,离线方面:厂址迁移、物流爆仓等。云服务的稳定取决于 CCSPNet 模型中的稳态概率。由此导出云服务稳定性的定量计算公式如下:

$$St = \Pi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n)$$

(4)开销(Cast)。费用是指用户提出服务请求到服务圆满完成并反馈结果所需要的花费。其分为两个部分,即在线费用  $C_{online}$  和离线费用  $C_{offline}$ ,  $C = C_{online} + C_{offline}$ 。

在线费用指的是用户使用云制造系统需要支付的服务费用,与 CCSPNet 模型中变迁的令牌流速成反比。令  $n$  代表用户租用组合云服务的单价,则组合云服务的开销表达式如下:

$$C_{online} = 1/V(t, p) \times n$$

离线费用指的是非在线物理环境下制造云服务完成制造任务所关联到的各个方面所产生的费用总和。

$$C_{offline} = C_{management} + C_{logistic} + C_{execution}$$

$C_{management}$  代表服务管理费用,  $C_{logistic}$  代表物流运输费用,  $C_{execution}$  代表任务执行费用。

(5)可用性(availability, Av)。可用性指的是云服务可以在特定时间内提供某项特定的服务,即在时间段  $T$  内成功完成云服务的时间所占比例。可用性的大小取决于 CCSPNet 模型中每个状态的平均停留时间,表示公式如下:

$$Av = \bar{\tau}(M) = \frac{1}{\sum_{t_j \in H} \lambda_j}$$

(6)可替代性(fungibility, Fu)。可代替性指的是云服务被替换的难易程度,即当前的云服务不能顺利完成任务时,可以被其他云服务成功代替完成任务的能力。假设在同一个候选云服务集  $CSS^i$  中包含两个云服务  $CS_i^a$  和  $CS_i^b$ , 并假设这两个云服务同时满足  $function(CS_i^a) \supseteq function(CS_i^b)$ , 则  $CS_i^a$  可以替换  $CS_i^b$ 。其中  $function(CS_i^a)$  是云服务  $CS_i^a$  的功能总和。设  $CSS^i$  中共有  $M_j$  个云服务,对于云服务  $CS_i^a$  可以被  $AL_i^j$  个服务替换,则该云服务的可代替性表示为  $Fu = AL_i^j / M_j$ 。云服务的可代替性取决于 CCSPNet 模型中某一库所中相同功能的令牌的概率。其表达式如下:

$$Fu = \int_i^{\infty} P[M(p)]$$

#### 4 组合云服务 QoS 评估方法的应用与分析

本节首先通过用户在线购物的实例描述组合云服务 QoS 动态评估模型的实现细节,进而对模型的有效性和可行性进行分析。

在线购物涉及的相关服务模型包括商店搜索服务 ShopService、登录服务 LoginService、商品查询服务 Merchandise Query Service、商品选择服务 Merchandise Select Service、送货方式选择服务(分为平邮 Post Service、快递 Express Service 和特快专递 EMS Service)以及已购商品列表服务 Merchandise List Service。用户确认订货后,订货系统将用户购买的商品名称、数量定单(Order Goods Service)及付款方式(Payment Service)传送至核算中心(Account Center Service)。在收款验证成功后,系统将订单明细表(Order Goods list Service)发送给用户,完成交易。

根据此组合服务的 BPEL 流程代码,利用前面介绍的转换方法可将其转化为对应的组合云服务流程网模型,其中,构成组合服务的元服务的可靠性信息由服务监控器和层次变权的可靠性评估模型给出,并将可靠性信息进行转换,得到如图 2 所示的 CCSPNet 模型。

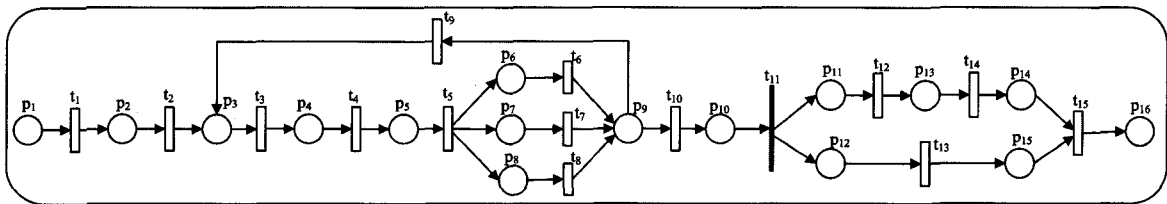


图 2 在线购买商品 CCSPNet 模型

模型中库所的含义分别为:  $p_1$  表示在线购物事件;  $p_2$  表示商店服务;  $p_3$  表示商店用户登录事件;  $p_4$  表示商品查询事件;  $p_5$  表示选择购买商品;  $p_6$  表示平邮送货;  $p_7$  表示快递送货;  $p_8$  表示特快专递送货;  $p_9$  表示送货信息;  $p_{10}$  表示商品名

列表信息;  $p_{11}$  表示消费金额信息;  $p_{12}$  表示购买商品数量和单价;  $p_{13}$  表示消费总金额;  $p_{14}$  表示付款方式;  $p_{15}$  表示订单列表信息;  $p_{16}$  表示订单明细信息。

模型中变迁的含义分别为:  $t_1$  表示选择商店;  $t_2$  表示用户

登录;  $t_3$  表示商品查询;  $t_4$  表示选择商品;  $t_5$  表示选择送货方式;  $t_6$  表示平邮送货;  $t_7$  表示快递送货;  $t_8$  表示特快专递送货;  $t_9$  表示继续购买商品;  $t_{10}$  表示商品列表;  $t_{11}$  为瞬时变迁, 定义随机开关;  $t_{12}$  表示计算消费总金额;  $t_{13}$  表示订单列表;  $t_{14}$  表示在线付款;  $t_{15}$  表示订单明细列表, 完成商品购买。

CCSPNet 模型中每个标识可以映射成 MC 的一个状态, 将 CCSPNet 模型上每条弧标注的实施变迁  $t_i$  换成其平均实施速率  $\lambda_i$ , 得到与 CCSPNet 模型同构的 MC, 如图 3 所示。

在 CCSPNet 模型的状态可达图上较容易获得 MC 转移

速率矩阵的参数, 因此能够计算出 MC 每个标识的稳定状态下的稳定概率。CCSPNet 模型的状态转移矩阵如表 1 所列。

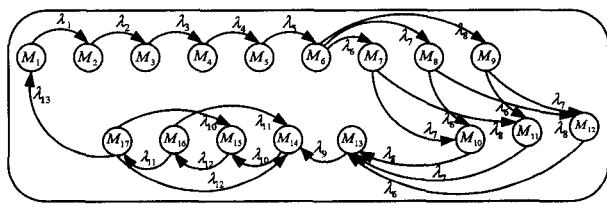


图 3 在线购买商品 CCSPNet 模型的马尔科夫链

表 1 在线购物 CCSPNet 模型的状态转移矩阵

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>13</sub>	P <sub>14</sub>	P <sub>15</sub>	P <sub>16</sub>
M <sub>1</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M <sub>2</sub>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M <sub>3</sub>	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
M <sub>4</sub>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M <sub>5</sub>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M <sub>6</sub>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
M <sub>8</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
M <sub>9</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
M <sub>10</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
M <sub>11</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M <sub>12</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M <sub>13</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
M <sub>14</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
M <sub>15</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
M <sub>16</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
M <sub>17</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

假设 CCSPNet 模型同构的 MC 中  $n$  个标记的稳定概率是一个行向量  $\Pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ ,  $D$  为变迁速率矩阵, 每个可达状态标识的瞬时概率表示为  $P[M_i](t) = x_i(t)$ , 稳态概率表示为  $P[M_i] = \pi_i$ , 由统计数据得该组合服务的变迁回报率分别为:  $r_1 = 0.95, r_2 = 0.90, r_3 = 0.75, r_4 = 0.85, r_5 = 0.90, r_6 = 0.90, r_7 = 0.89, r_8 = 0.98, r_9 = 0.93, r_{10} = 0.89, r_{11} = 0.85, r_{12} = 0.97, r_{13} = 0.82, r_{14} = 0.93, r_{15} = 0.86, r_{16} = 0.92, r_{17} = 1.00$ ; 实施的变迁速率为:  $\lambda_1 = 8, \lambda_2 = 4, \lambda_3 = 1, \lambda_4 = 3, \lambda_5 = 1, \lambda_6 = 2, \lambda_7 = 4, \lambda_8 = 2, \lambda_9 = 1, \lambda_{10} = 6, \lambda_{11} = 2, \lambda_{12} = 2, \lambda_{13} = 1$ 。根据马尔可夫链的遍历性得到线性方程组:

$$\begin{cases} \Pi D = 0 \\ \sum \pi_i = 1, 1 \leq i \leq n \end{cases}$$

求解以上两个方程组即可得到:

$$\begin{aligned} P[M_1] &= \pi_1 \approx 0.08106; P[M_2] = \pi_2 \approx 0.03138; \\ P[M_3] &= \pi_3 \approx 0.01458; P[M_4] = \pi_4 \approx 0.02386; \\ P[M_5] &= \pi_5 \approx 0.07546; P[M_6] = \pi_6 \approx 0.06725; \\ P[M_7] &= \pi_7 \approx 0.03758; P[M_8] = \pi_8 \approx 0.10237; \\ P[M_9] &= \pi_9 \approx 0.04328; P[M_{10}] = \pi_{10} \approx 0.05289; \\ P[M_{11}] &= \pi_{11} \approx 0.03798; P[M_{12}] = \pi_{12} \approx 0.11255; \\ P[M_{13}] &= \pi_{13} \approx 0.05325; P[M_{14}] = \pi_{14} \approx 0.12215; \\ P[M_{15}] &= \pi_{15} \approx 0.06537; P[M_{16}] = \pi_{16} \approx 0.02358; \\ P[M_{17}] &= \pi_{17} \approx 0.05631 \end{aligned}$$

则组合服务在执行过程中不发生失效的概率(即在稳态下的期望回报率)为:  $E[X] = \sum_{k \in \Omega_T} r_k \pi_k = 0.9181$ 。

分析组合云服务的瞬态概率  $E[X(t)] = \sum_{k \in \Omega_T} r_k \pi_k(t)$ , 可以得到该组合云服务 QoS 为时间的函数, 如图 4 所示。

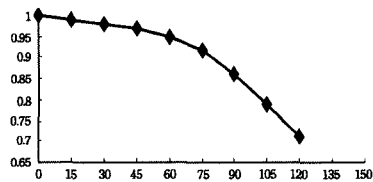


图 4 在线购买商品服务的 QoS

上述实例表明: 云服务组合的 QoS 动态评估模型能够动态、高效地对组合云服务的 QoS 进行评估。利用随机 Petri 网可以方便快速地建立组合云服务系统的 QoS 评估模型, 并对其进行定性描述和定量分析, 从实验结果可以清晰地看出组合云服务系统 QoS 随时间的变化情况。

**结束语** 本文针对云服务组合的 QoS 评估需求, 提出了基于马尔可夫过程的云服务组合六维 QoS 评估方法。首先通过对云服务体系结构下的业务流程进行分析, 描述了业务流程下组合云服务的实现框架, 提出了组合云服务流程网模型。其次, 以随机 Petri 网模型为出发点, 对服务组合的控制流进行状态分析, 将 CCSPNet 模型转换为同构的马尔科夫链, 利用稳态概率计算出 CCSPNet 网模型的 QoS 参数。最后, 提出组合云服务的六维 QoS 评价体系, 并利用 CCSPNet 网模型对评价体系中的各指标进行定量计算。应用实例分析表明, 新方法具有较好的动态适应性和灵活性, 能有效满足云服务的可靠性评估需求。

## 参考文献

- [1] Aloes A, et al. Web Services Business process Execution Language, Version 2.0, OASIS Standard (April 2007) [S]. <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.html>
- [2] 康国胜, 刘建勋, 唐明董, 等. 考虑 QoS 属性相关性的 Web 服务

选择[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 4(5): 786-790

Kang Guo-sheng, Liu Jian-xun, Tang Ming-dong, et al. Consider the QoS Attribute Correlation for Web Service Selection[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 4(5): 786-790

[3] Wan Jian-xiong, Xiang Xu-dong, Bai Xiao-ying. Performability Analysis of Avionics System with Multilayer HM/FM Using Stochastic Petri Nets [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 54(2): 363-377

[4] Ana M, Carlos A. JWSPerf: A Performance Benchmarking Utility with Support to Multiple Web Services Implementations[C]// International Conference on AICT-ICIW, 2006: 159-165

[5] 郑梁须. 基于 BPEL 文档验证的 Web 服务组合入侵检测技术研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2013

Zheng Liang-xu. Research on Intrusion Detection Technology for Web Service Composition Based on BPEL[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013

[6] Mounir L, Fatiha Z, Ana C. Timed Modeling of Web Services Composition for Automatic Testing [C]// Third International IEEE Conference on Signal-Image Technologies and Internet-Based System, 2007(SIFIS'07). 2007: 417-426

[7] 王盼盼. 基于 BPEL 工作流的服务组合技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2011

Wang Pan-pan. Research on BPEL Service Composition Based on Workflow[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2011

[8] László G, Silvano C, Felicita D G, et al. Dependability Evaluation of Web Service-Based Processes[M]// Formal Methods and Stochastic Models for Performance Evaluation: Third European Performance Engineering Workshop (EPEW 2006). 2006: 166-180

[9] Apostolos Z, Panos V, Valerie I. Model-Driven Dependability Analysis of WebServices[M]// On the Move to Meaningful Internet Systems 2004: COOPIS, DOA, and ODBASE: OTM Confederated International Conference, COOPIS, DOA, and ODBASE, 2004: 1608-1625

[10] 门鹏, 段振华. 广义随机 Petri 网下的组合 Web 服务建模与评价 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(8): 967-971

Men Peng, Duan Zhen-huan. Modeling and Evaluation of Composite Web Services Based on Generalized Stochastic Petri Nets [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(8): 967-971

[11] Lin C. Stochastic Petri Net and System Performance Evaluation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 293-294

(上接第 101 页)

表 3 目标数改变时节点平均剩余能量和剩余能量方差的比较

目标数	比较项		MKCR-K 节点		MKCR-T 节点	
			剩余能量百分比		剩余能量百分比	
	平均	方差	平均	方差	平均	方差
3	0.9167	0.0541	0.9133	0.0567		
4	0.8983	0.0666	0.8983	0.0685		
5	0.8667	0.0785	0.8483	0.0914		
6	0.8117	0.1148	0.8050	0.1125		
7	0.8467	0.0856	0.8067	0.1070		
8	0.8650	0.0787	0.8300	0.0927		
9	0.7950	0.1162	0.6987	0.1810		
10	0.8280	0.0893	0.6520	0.2025		

**结束语** 本文研究一种无线多媒体传感网多时间片  $k$  覆盖路由策略 MKCR, 根据监测要求提出了固定  $k$  值和自适应  $k$  值的两种算法 MKCR-K 和 MKCR-T。通过启发式选择算法在每个目标均达到  $k$  覆盖要求的前提下合理分配节点参与时间, 实现最大化网络生存周期的目的。最后通过一系列仿真实验, 对其性能进行分析和评价。仿真结果表明, MKCR 协议能够协调参与节点的工作时长, 实现关键目标多重覆盖监测, 同时延长网络生存周期。

### 参考文献

[1] Shen Hang, Bai Guang-wei, Tang Zhen-min, et al. QMOR: QoS-aware multi-sink opportunistic routing for wireless multimedia sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 75(2): 1307-1330

[2] Costa D G, Guedes L A. The coverage problem in video-based wireless sensor networks: A survey[J]. Sensors, 2010, 10(9): 8215-8247

[3] Wang Bang. Coverage problems in sensor networks: A survey [J]. ACM Computing Surveys(CSUR), 2011, 43(4): 32

[4] Li Jing-jing, Cao Jian-nong, Liu Xue-feng. Distributed Coverage-Preserving Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks [C]// Proceedings of the IEEE International Conference Communication(ICC 2011). 2011: 1-5

[5] Cai Yan-li, Lou Wei, Li Ming-lu, et al. Energy Efficient Target-

Oriented Scheduling in directional Sensor Networks[J]. IEEE Transaction on Computers, 2009, 58(9): 1259-1274

[6] 刘明, 曹建农, 郑源, 等. 无线传感器网络多重覆盖问题分析[J]. 软件学报, 2007, 18(1): 127-136

Liu Ming, Cao Jian-nong, Zheng Yuan, et al. Analysis for Multi-Coverage Problem in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2007, 18(1): 127-136

[7] Munishwar V P, Abu-Ghazaleh N B. Coverage algorithms for visual sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks(TOSN), 2013, 9(4): 45

[8] Liu Ming, Cao Jian-nong, Lou Wei, et al. Coverage analysis for wireless sensor networks[M]// Mobile Ad-hoc and Sensor Networks. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 711-720

[9] Cai Yan-li, Lou Wei, Li Ming-lu, et al. Target-Oriented Scheduling in directional Sensor Networks[C]// Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications(IEEE INFOCOM 2007). 2007: 1550-1558

[10] Luo Wu-sheng, Lu Qin, Xiao Jing-jing. Distributed Collaborative Camera Actuation Scheme Based on Sensing-Region Management for Wireless Multimedia Sensor Networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 2012: 486163

[11] Tian D, Georganas N D. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. ACM, 2002: 32-41

[12] Tsai Y-R. Coverage-preserving routing protocols for randomly distributed wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(4): 1240-1245

[13] Cheng Wei-fang, Li Shan-shan, Liao Xiang-ke, et al. Maximal Coverage Scheduling in Randomly Deployed Directional Sensor Networks[C]// International Conference on Proceedings of the Parallel Processing Workshops 2007 (ICPPW 2007). IEEE, 2007: 68-68

[14] Yang Chao, Zhu Wei-ping, Liu Jia, et al. Self-orienting the cameras for maximizing the view-coverage ratio in camera sensor networks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2015, 17: 102-121