

# 基于扩展的随机 DAG 的并行任务调度算法研究<sup>\*</sup>

姜燕 胡凯 杨志斌 张新宇

(北京航空航天大学计算机学院 北京 100083)

**摘要** 针对并行程序结构产生任务计算量和通信量的随机性,提出了一种扩展的随机 DAG 模型。基于此模型对 DAG 调度中常用调度算法关键路径 SCP(Static Critical Path)算法进行了详细的分析,提出了相应的扩展的随机 DAG 的调度方法 SSCP(Stochastic Static Critical Path)算法。同时,给出了扩展的随机 DAG 中节点的 EST(Earliest Start Time)计算方法,并以 SCP 算法为例进行实验模拟。实验结果表明,SSCP 算法相对于 SCP 算法,减少了并行任务执行时间,并能更精确地预测任务调度的平均执行时间。

**关键词** 扩展的随机 DAG, EST, SCP 算法, SSCP 算法

## Parallel Tasks Scheduling Based on Expanded Stochastic DAG

JIANG Yan HU Kai YANG Zhi-bing ZHANG Xin-yu

(School of Computer Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract** Considering that fact the structure of parallel program can induce the randomness of tasks' computing and communication cost, the definition of stochastic DAG is expanded. Some researches on parallel tasks scheduling algorithms have been done based on this expanded model. The typical algorithms (SCP) are anglicized in detail, SSCP algorithm for the expanded stochastic DAG is presented correspondingly. Then a method to compute the nodes' EST is provided. And experiments have been done to simulate it. The experiments results indicate that a significant improvement in the average parallel execution times of expanded stochastic DAG can be achieved by the proposed approach and SSCP algorithm is able to more accurately predict the actual performance than the algorithm SCP.

**Keywords** Expanded stochastic DAG, EST, SCP algorithm, SSCP algorithm

## 1 引言

自上个世纪 60 年代以来,国内外的学者就开始研究怎样调度 DAG(directed acyclic graph)任务图,并且诞生了很多调度算法。一般情况下, DAG 调度是 NP 完全问题。目前的大部分 DAG 调度算法均基于启发式调度,包括表调度算法<sup>[1,2]</sup>, 聚簇类算法<sup>[3,4]</sup>, 基于任务复制的调度算法<sup>[5,6]</sup>, 以及基于遗传算法和随机搜索技术的调度算法<sup>[7,8]</sup>。上述 DAG 调度算法中,一般均采用多次执行后的平均值估算任务的计算量和通信量,忽略每次执行时计算环境的异构性或者并行程序结构带来的计算时间和通信时间偏移量,从后面的实验仿真结果可以看出这种算法得到的调度结果并不理想。目前,也有一些调度算法考虑了计算环境异构性带来的计算时间和通信时间偏移量,但只针对独立任务的情况作了研究,没有考虑任务之间的约束依赖关系。文献[9]给出了在分布式计算系统中的基于随机 DAG 模型的静态调度方法,显示地考虑了计算环境异构性带来的计算时间的偏移量,意在最小化随机 DAG 的总的执行时间。

实际上,并行程序结构和并行环境的异构性一样,也会使并行任务的计算量和通信量产生随机性<sup>[13]</sup>。因此,本文扩展了随机 DAG 模型中产生随机性的因素,提出了一种扩展的随机 DAG 模型;基于此 DAG 模型对并行任务调度算法进行了研究,给出了扩展的随机 DAG 模型的静态调度方法。实

验结果表明,基于此模型进行任务调度,与利用平均值表示运行时间的任务调度相比,并行计算效率得到了提高,并有效地减少了并行任务执行时间。此外也验证了扩展的 DAG 模型中对节点计算时间的预测结果更精确,更逼近实际执行时间。

## 2 扩展的随机 DAG 模型

### 2.1 DAG 模型术语及符号描述

- $P_j$ : 处理器  $j$ ;
- $n_i$ : 随机 DAG 中的节点  $i$ ;
- $t_i$ : 节点  $n_i$  的计算时间,由平均值  $m_i$  和偏移量  $\sigma_i$  组成;
- $t_{ij}$ : 从节点  $n_i$  到节点  $n_j$  的通信时间,由平均值  $m_{ij}$  和  $\sigma_{ij}$  组成;
- EST(Earliest Start Time): 任务节点被分配到某个可用的节点上执行的最早时间;
- SL: 基于扩展的随机 DAG 的调度长度;
- PT(Parallel Time): 即通过 DAG 调度算法预测的并行执行时间;
- $STL_i$  (Static Top-level): 从入口节点到节点  $n_i$  的最长路径长度,包括该路径上所有节点的计算权值;
- SCP(Static Critical Path): 静态关键路径,即从入节点到出节点中最长的路径,包括路径上所有节点的计算权值以及节点间的通信权值。

<sup>\*</sup> 基金项目:航空科学基金资助项目(20060151003)。姜燕 硕士研究生;胡凯 副教授,研究生导师;杨志斌 博士研究生;张新宇 硕士研究生。

## 2.2 扩展的随机 DAG 模型

分布式计算环境普遍存在异构性,包括时间异构性和空间异构性。当 DAG 模型中的并行任务运行在具有时间或者空间异构性的分布式计算环境上时,每个节点的计算时间及节点间的通信时间可能会随着时间的变化而变化,即节点  $n_i$  的计算时间  $t_i$  以及节点  $n_i$  和  $n_j$  之间的通信量  $t_{ij}$  被认为是随机变量。如一个 DAG 模型中的节点和弧的权值为随机变量,则该 DAG 模型即为随机 DAG 模型<sup>[9]</sup>。

事实上,任务图中节点的计算时间以及节点间的通信时间不仅会因为计算环境的时间和空间异构性而随机发生变化,也会因并行程序结构而发生随机地变化。因此,本文对随机 DAG 模型中随机性的产生因素加以扩展,同时考虑了并行程序结构随机性的影响。此时,模型中节点  $n_i$  的计算时间  $t_i$  以及节点  $n_i$  和  $n_j$  之间的通信量  $t_{ij}$  的随机性产生因素分为两种:一为计算环境的异构性;二为并行程序结构。

假设上述两类随机性产生因素(计算环境的异构性及并行程序结构)可由向量  $X=(x_1, x_2)$  表示,则节点  $n_i$  的计算时间  $t_i$  可以表示向量  $X$  的函数,即

$$t_i(X) = m_i + \epsilon \quad (1)$$

其中  $m_i$  为  $t_i$  的平均值  $m_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{ij}$ ,  $\epsilon$  为由向量  $X$  因素产生的偏移量。

一般情况下,  $\epsilon$  的变化服从一个随机概率分布,很难对  $\epsilon$  进行预测。Chebyshev 不等式<sup>[15]</sup>表明,随机变量的标准方差  $\sigma_i$  和随机变量本身满足如下概率关系:

$$p[|t_i| \geq k \sqrt{\sigma_i}] \leq \frac{1}{k^2} \quad (2)$$

其中  $\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (t_{ij} - m_i)^2}$ 。比如,当取  $k$  值为 3,则  $p[|t_i| \geq 3\sigma_i] \leq 0.11$ 。该不等式显示了  $t_i$  的最大变化界限。在大部分情况下,  $t_i$  的变化界限会更小。如,当  $t_i$  满足高斯随机分布时,  $p[|t_i| \geq 3\sigma_i] \leq 0.998^{[16]}$ 。因此,在扩展的随机 DAG 模型中,节点  $n_i$  的计算时间  $t_i$  可以表示为

$$t_i(X) = m_i + \sigma_i, (\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (t_{ij} - m_i)^2}) \quad (3)$$

下面基于此扩展的随机 DAG 模型对并行任务调度算法进行了研究。

## 3 DAG 调度

### 3.1 DAG 调度算法

DAG 的调度算法中,任一节点的执行只有在全部优先它的节点完成后才能开始。EST(earliest start time)总是直接或间接地用于决定各个节点的优先级,从而实现 DAG 的调度。因此,针对 DAG 调度,一个关键的问题是精确地预估一些时间变量,如 EST 等。本文以下部分通过 SCP 调度算法对基于扩展的随机 DAG 的并行任务调度算法进行了研究。

#### • Static Critical Path(SCP)算法

一般认为关键路径算法应优先调度关键路径上的任务,在确定关键路径时,有些采用静态关键路径,而有些采用动态关键路径。对于调度算法的性能,采用动态关键路径的算法一般优于采用静态关键路径的算法;但是,对于调度算法复杂度,采用静态关键路径算法通常优于采用动态关键路径的算法。本文采用静态关键路径算法进行分析,算法描述如下:

(1)  $\forall n_i$ , 计算其  $STL_i$ , 并确定一条静态关键路径;

(2) 置任务优先级队列为空,取静态关键路径上的第一个节点作为当前节点  $n_i$ ;

(3) 如果  $n_i$  的入度为 0,则将该节点作为任务优先级队列中最后一个节点插入队列,并把该节点的子节点的入度减 1,转(4);如果  $n_i$  的入度不为 0,则先对其所有的尚未进入任务优先级队列的父节点  $n_j$  按  $STL_j + t_j + t_{ij}$  的大小由大到小排序。以第一个父节点及其尚未进入任务优先级队列的祖先节点为子图构成一个有向无环图,递归地创建该子图的任务优先级队列,并将该子图的任务优先级队列添加到要创建的任务优先级队列的队尾。用类似的方法处理其余父节点构成的子图。最后再将节点  $n_i$  加到任务优先级队列的队尾,并把该节点的子节点的入度减 1;

(4) 如果当前节点为最后一个节点,则任务优先级队列创建完成,否则取静态关键路径上的下一个节点作为当前节点,执行步骤(3);

(5) 取任务优先级队列中的第一个任务作为当前任务,为该任务选择最早可用的处理机;

(6) 计算当前任务在当前处理机上的 EST,分配到当前最早可用处理器上;

(7) 如果当前任务为任务优先级队列中的最后一个任务,则结束;否则,取下一个任务作为当前任务,执行步骤(5)。

### 3.2 DAG 中 EST 的计算

以图 1 的 DAG 图为例,计算任务节点 EST 的算法如下:

(1) 如果节点  $n_i$  是入口节点,则  $n_i$  的 EST 为 0,如图中的节点  $n_0, n_1, n_2$  的 EST 即为 0;

(2) 如果节点  $n_i$  不是入口节点,则比较  $n_i$  的每个父节点的 EST 以及父节点和  $n_i$  之间的通信值之和,最大的值即为  $n_i$  的 EST 值,下图中节点  $n_3$  的 EST 表示为  $E[m_0 + m_{03}]$ ,节点  $n_4$  的 EST 为  $E[\max(m_1 + m_{14}, m_2 + m_{24})]$ ,节点  $n_5$  的 EST 值可以表示为  $E[\max(m_3 + m_{35}, m_4 + m_{45})]$ ,其中  $E[\ ]$  表示求数学期望。

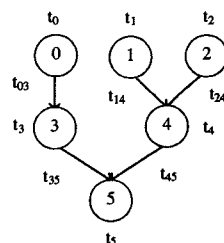
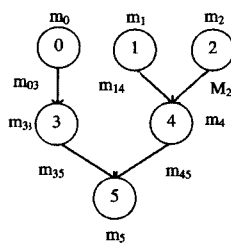


图 1 DAG 模型

图 2 扩展的随机 DAG 模型

## 4 基于扩展的随机 DAG 的 SCP 算法

本文基于扩展的随机 DAG,结合第 2 部分描述的 SCP 算法,给出了改进的调度算法,即为 SSCP(stochastic SCP)。假设  $\{m_i, \sigma_i\}$  以及  $\{m_{ij}, \sigma_{ij}\}$  为已知。

### 4.1 扩展的随机 DAG 中 EST 计算

扩展的随机 DAG 模型可以由图 2 来表示<sup>[9]</sup>。基于此图我们可以对扩展的随机 DAG 中节点的 EST 值的计算方法进行分析。

当节点为入口节点时,其 EST 值仍为 0;当节点不是入口节点时,则比较  $n_i$  的每个父节点的 EST 以及父节点和  $n_i$  之间的通信值之和,最大的值即为  $n_i$  的 EST 值,此时任务的计算量和通信量为随机变量,例如节点  $n_4$  的 EST 为  $E[\max(t_1 + t_{14}, t_2 + t_{24})]$ ,节点  $n_5$  的 EST 值可以表示为  $E[\max(t_3 +$

$t_{35}, t_4 + t_{45}]$ , 其中  $t_i = m_i + \sigma_i, t_{ij} = m_{ij} + \sigma_{ij}$ 。

一个节点即使它的全部父节点已全部执行完,也有可能由于没有可用的处理器而不能被立即调度。因此,实际的 EST 计算还应该考虑处理器的最早可用时间,用  $ATP_i$  表示处理器  $i$  的最早可用时间,则节点  $n_i$  在处理器  $i$  的 EST 为

$E[\max(t_1 + t_{14}, t_2 + t_{24}, \min(ATP_i))] , i=1, 2, \dots, n, n$  为处理器个数。

### 4.2 算法分析

为了清楚地说明 SCP 算法以及 SSCP 算法的区别,我们以图 3 的 DAG 模型为例进行研究分析。为了简化分析,任务间的通信时间忽略。

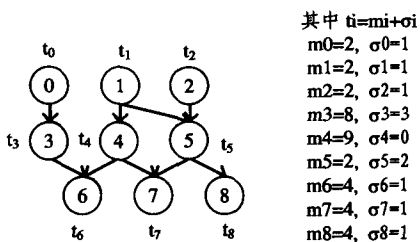


图 3 扩展的随机 DAG 模型及其计算权值与偏移量

对上图中 DAG 模型分别采用 SCP 算法和 SSCP 算法进行调度,得到的调度结果(处理器个数取 2)如下面的图 4 和图 5 所示。

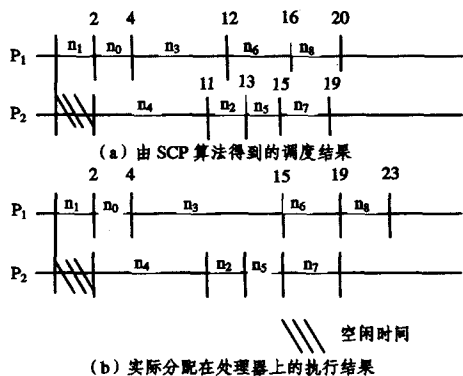


图 4

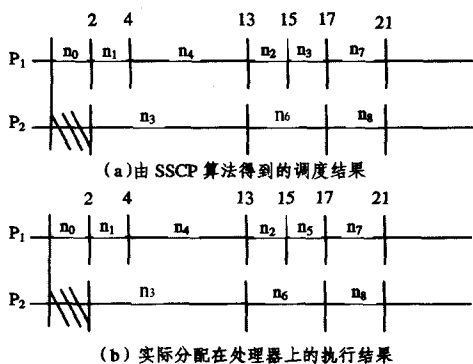


图 5

在 SCP 调度算法中,任务节点的计算时间采用平均值表示,EST 的计算也和平均值相关。例如,节点  $n_3$  的 EST 为 4,其表达式为  $E[\max(m_0, m_1, \min(ATP_i))]$ ,其中  $i=1, 2$ 。节点  $n_6$  的 EST 为  $\max(m_0 + m_3, m_1 + m_4, \min(ATP_i))$ ,计算得 12,调度结果如 4(a)所示,  $SL=20$ 。在实际 DAG 执行过

程中,由于  $E[\max(t_0 + t_3, t_1 + t_4, \min(ATP_i))] > \max(m_0 + m_3, m_1 + m_4, \min(ATP_i))$ ,节点  $n_6$  的 EST 将会大于 12。根据图 3 给出的  $\sigma_i$  值,  $E[\max(t_0 + t_3, t_1 + t_4, \min(ATP_i))] = 15$ ,此时,  $PT=23$ 。而在 SSCP 算法中,计算节点  $n_6$  的 EST 值为  $E[\max(t_0 + t_3, t_1 + t_4, \min(ATP_i))]$ ,如图 5 所示,由于节点  $n_3$  的计算时间的  $\sigma_3$  最大,为 3,致使节点  $n_6$  的 EST 后延,因此在调用节点  $n_4$  之前先调用  $n_3$ ,最后得到  $SL=PT=21$ 。与 SCP 算法相比,SSCP 减少了并行任务执行时间。

## 5 实验仿真

### 5.1 仿真过程描述

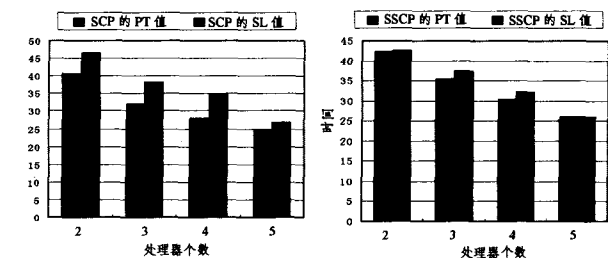
为了更清楚地分析对比改进的调度方法(SSCP)和原调度算法(SCP),我们做了一组仿真实验,选取基于并行程序调度算法的一个重要衡量指标并行执行的时间  $PT$ ,将 SSCP 算法与 SCP 算法进行对比分析。仿真过程如下<sup>[2]</sup>:

- (1)选取一种随机 DAG 拓扑结构;
- (2)给 DAG 中的每个节点和边赋予一个平均值和一个偏移量区间,表示其计算时间和通信时间的随机值;
- (3)分别选取 SCP,SSCP 调度算法对 DAG 中的任务进行调度;
- (4)计算由步骤(3)得到的调度结果的调度长度  $SL$ ;
- (5)实际利用上述两种调度算法进行调度分配到处理器上执行得到其实际执行时间;
- (6)重复步骤(5)得到并行程序的平均并行执行实际  $PT$ ;
- (7)改变处理器个数,重复步骤(3)到步骤(6)。

在第二步中节点  $n_i$  计算时间和通信时间的值区间分别表示为  $[t_{i\min}, t_{i\max}]$  及  $[t_{ij\min}, t_{ij\max}]$ 。因此,节点  $n_i$  的计算时间和通信时间的平均值则可分别为  $\frac{t_{i\min} + t_{i\max}}{2}, \frac{t_{ij\min} + t_{ij\max}}{2}$ ,相应的偏移量为  $\frac{t_{i\min} - t_{i\max}}{2\sqrt{3}}$  及  $\frac{t_{ij\min} - t_{ij\max}}{2\sqrt{3}}$ <sup>[9]</sup>。

### 5.2 仿真结果及其分析

仿真时选取的 DAG 拓扑结构图以及 DAG 中节点的计算时间数据见附录 1。仿真结果如图 6 所示。



(a) SCP 算法的 PT 值和 SL 值 (b) SSCP 算法的 PT 值和 SL 值  
图 6

从图 6 可以看出,SSCP 算法的  $PT$  值和  $SL$  值的差值非常小,而 SCP 算法的  $PT$  值和  $SL$  值的差别则相对较大。这是由于,在 SSCP 算法中考虑了计算时间的随机性,利用一个偏移量  $\sigma_i$  加上平均值  $m_i$  来表示,而 SCP 算法的计算时间只考虑平均值  $m_i$ ,忽略了其随机性,会出现过早调度,对  $PT$  值的计算也就相对缩短,因此差值就较大。这也证明了扩展的随机 DAG 模型可以实现更精确地预估任务节点的 EST 值,在此基础上进行任务调度,能够更准确地预测调度结果,即  $PT$  值。

结束语 本文扩展了随机 DAG 模型,认为并行程序结

构和计算环境的异构性均影响 DAG 模型中节点计算时间和通信时间,并利用标准方差和平均值之和逼近任务的实际运行时间。在此基础上,对 DAG 调度中常用调度算法 SCP 算法进行详细分析并作了改进,提出了扩展的随机 DAG 的调度方法 SSCP 算法。同时,给出了扩展的随机 DAG 中节点的 EST 计算方法,并以 SCP 算法为例进行分析研究。实验结果表明,SSCP 算法相对于 ETF 和 SCP 算法,有效地减少了并行任务执行时间,并能更精确地预测任务调度的平均执行时间,使其调度长度和实际运行时间值更接近。基于此扩展随机 DAG 的其它调度算法的研究将在后续的工作完成。

### 参考文献

- [1] Grajcar M. Genetic list scheduling algorithm for scheduling and allocation on a loosely coupled heterogeneous multiprocessor system// Proceedings of the 36th Design Automation Conference. 1999;280-285
- [2] Chan Wai-Yip, Li Chi-Kwong. Scheduling tasks in DAG to heterogeneous processor system// Proceedings of the Sixth Euro-micro Workshop on Parallel and Distributed Processing(PDP'98). Jan. 1998;27-31
- [3] Chan Wai-Yip, Li Chi-Kwong. Heterogeneous Dominant Sequence Cluster (HDSC): a low complexity heterogeneous scheduling algorithm// IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. Aug. 1997,2:956-959
- [4] Liu Zhen. Scheduling of random task graphs on parallel processors// Proceedings of the Third International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS '95). Jan. 1995;143-147
- [5] Kwok Yu-Kwong. Parallel program execution on a heterogeneous PC cluster using task duplication// Proceedings of the 9th Heterogeneous Computing Workshop, 2000 (HCW2000). May 2000;364-374
- [6] Liu Zhenying, Fang Binxing, Zhang Yi, et al. Scheduling algorithms for a fork DAG in a NOWs// Proceedings of the Fourth International Conference/Exhibition on High Performance Computing in the Asia-Pacific Region. May 2000.2:959-960
- [7] Woo Sung-Ho, Yang Sung-Bong, Kim Shin-Dug, et al. Task scheduling in distributed computing systems with a genetic algorithm// High Performance Computing on the Information Superhighway(HPC Asia '97). May 1997;301-305
- [8] Hou E S H, Ansari N, Ren H. A genetic algorithm for multiprocessor scheduling// IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. Feb. 1994;113-120
- [9] Kamthe A, Lee Soo-Young. A Stochastic Approach to Estimating Earliest Start Times of Nodes for Scheduling DAGs on Heterogeneous Distributed Computing Systems [J]// Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2005
- [10] Midorikawa E T, de Oliveira H M, Laine J M. PEMPIs: A New Methodology for Modeling and Prediction of MPI Programs Performance [J]// 16th Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing (SBAC-PAD '04). Sbac-pad, 2004;246-253
- [11] Wu C E, Bolmarcich A. Gantt Chart Visualization for MPI and Apache Multi-Dimensional Trace Files [J]. ICPADS 2002;523-528
- [12] Wu Min-You, Shu Wei, Yong Chen. Runtime Parallel Incremental Scheduling of DAGs [J]// International Conference on Parallel Processing. August 2000;541-548
- [13] 陈昌生,孙永强,何积丰. 一个可预测并行程序效率的评价模型[J]. 软件学报,2000,11(11):1485-1491
- [14] Iverson M A, zguener F O, Potter L. Statistical Prediction of Task Execution Times through Analytic Benchmarking for Scheduling in Heterogeneous Environment [J]. IEEE Transactions on Computers, 1999,48(12):1374-1379
- [15] Stark H, Woods J W. Probability, Random Processes, and Estimation Theory for Engineers. Prentice Hall, 1994

(上接第 52 页)

## 4 无线传感器网络路由协议比较

第 3 部分分析了每种协议的特点,这些协议针对特定的应用而设计,在不同的环境表现出各自的特色和优势,因此不能绝对地判断哪种协议最优。表 1 分别从是否提供最优路径、是提供多路径还是单路径、是否支持节点移动、协议是先应式还是反应式、是否支持数据聚合、协议类型、是否支持 QoS 和网络生存期等方面,对这些协议进行了比较<sup>[1]</sup>。

**结束语** 本文针对当前主要的 WSNs 路由协议进行了比较分析。从分析中表明,每种协议之间是相互关联的,并且一个好的 WSNs 路由协议应具备如下特点:①动态地选择汇聚节点的能力;②快速的数据融合技术;③随机路径选择能力。通过对当前各种路由协议的分析与总结,可以看出将来的 WSNs 路由协议的研究策略与发展趋势<sup>[1]</sup>:①减少通信量以节约能量;②保持通信量负载均衡;③路由协议应具有容错性;④路由协议应具有安全机制;⑤ WSNs 路由协议将继续向基于数据、基于位置的方向发展。

### 参考文献

- [1] 唐勇,周明天,张欣. 无线传感器网络路由协议研究进展. 软件学报,2006,17(3):410-421
- [2] 李建中,李金宝,石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展. 软件学报,2003,14(10):1717-1727
- [3] 崔莉,鞠海玲,苗勇,等. 无线传感器网络研究进展. 计算机研究与发展,2005,42(1):163-174
- [4] Shijin D, Xiaorong J, Lemin L. Research and analysis on routing protocols for wireless sensor networks// Proceedings of International Conference on Communications, Circuits and Systems, 2005,1:407-411
- [5] Abd-El-Barr M I, Al-Otaibi M M, Youssef M A. Wireless Sensor Networks-Part II: Routing Protocols and Security Issues// 2005 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2005;69-72
- [6] Heinzelman W R, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks// Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE Conference on Mobile Computing and Networking. Seattle: ACM press, 1999;174-185
- [7] Haas Z J, Halpern J Y, Li L. Gossip-based ad hoc routing// Proceedings of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Communications Society, 2002;1707-1716
- [8] Kulik J, Heinzelman W R, Balakrishnan H. Negotiation based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. Wireless Networks, 2002,8(2/3):169-185
- [9] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2003,11(1):2-16
- [10] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. IEEE Personal Communications, 2000,7(5):16-27
- [11] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 2000,2:10
- [12] Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks// Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001;2009-2015
- [13] Lindsey S, Raghavendra C S. PEAGSIS: Power-efficient gathering in sensor information systems// Proceedings of the IEEE Aerospace Conference Montana; IEEE Aerospace and Electronic Systems Society. 2002;1125-1130
- [14] Yu Y, Estrin D, Govindan R. Geographical and energy-aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. Technical Report. UCLA-CSD TR-01-0023. UCLA Computer Science Department, May 2001