

基于改进 NSGA- II 的无线 Ad-hoc 网络任务调度算法

杨红丽¹ 郭 华²

(西安工业大学电子信息工程学院 西安 710032)¹ (西安邮电大学电子工程学院 西安 710010)²

摘 要 针对无线 Ad-hoc 节点的移动性和易失效性导致的任务完成效率降低的问题,提出了一种无线 Ad-hoc 网络任务调度的多目标优化算法(MOTA)。该算法在追求最短的任务完成时间的同时,还考虑到节点的失效概率和能耗。它避免将任务分配到失效率较高的节点上执行,从而有效地降低了节点的失效对任务执行的影响。仿真分析表明,该算法能够有效地平衡任务完成时间最小化、任务完成概率最大化及能耗最小化的目标。与传统任务调度算法相比,其仿真实验取得了更好的结果。

关键词 无线 Ad-hoc 网络,任务调度,多目标优化,任务完成时间

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Task Scheduling Algorithm Based on Improved NSGA- II for Wireless Ad-hoc Networks

YANG Hong-li¹ GUO Hua²

(School of Electronic Information, Xi'an University of Technology, Xi'an 710032, China)¹

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710010, China)²

Abstract To solve the problem of the lower efficiency of task-performing caused by the mobility and failure-prone of Ad-hoc nodes, a multi-object optimization task scheduling algorithm(MOTA) was proposed for wireless Ad-hoc networks. This algorithm tries its best to make less make span, but meanwhile, it also pays much more attention to the failure probability and the energy-consuming of nodes. MOTA avoids the task assigned to the failure-prone node, which effectively reduces the effect of failed nodes on task-performing. Simulation results show that the proposed algorithm can trade off these three objectives well. Compared with the traditional task scheduling algorithms, the simulation experiments obtain better results.

Keywords Wireless Ad-hoc networks, Task scheduling, Multi-object optimization, Make span

无线网络技术是近年来发展迅速的一门通信技术,它允许用户采用更加便捷、灵活的方式接入网络,人们可以通过配有无线接口的便携式计算机或个人数字助理来实现移动中的通信。目前,无线网络根据其结构分为有中心网络和无中心网络(又称 Ad-hoc 网络)。与有中心网络有固定的基站设备不同,Ad-hoc 网络中,没有固定的基站设备,无线节点通过运行特定的协议,互相发现,联接成网。节点在通信中既作为终端又作为路由器,担负为数据寻路和转发的功能。在战争及灾害救援中,很难保证可靠的有线通信设施,因此,通过通信节点自己组合,组成一个通信系统非常有必要。Ad-hoc 网络可以满足这些要求。目前,Ad-hoc 网络主要用于军事和灾难救援。

目前针对于无线 Ad-hoc 网络任务调度的建模工具主要是有向无环图^[1]、独立任务集^[2]和可分负载理论^[3]等,这些调度模型主要以任务完成时间作为调度目标,将任务调度到具有最短期望完成时间的节点上执行,以获得尽可能短的任务完成时间。然而无线 Ad-hoc 网络一般应用环境恶劣,网络复杂性高,节点可能会因为电池能量耗尽或者物理故障而无法

完成分配的任务,因此降低了无线 Ad-hoc 网络的执行效率和服务质量。如何利用状态不稳定的网络系统协调网络上节点的任务分配,提高整个系统的综合性能,是一个非常复杂的问题,同时也构成了无线 Ad-hoc 网络任务调度新的技术难点。

鉴于无线 Ad-hoc 网络的任务分配问题,为了减少节点能耗,保证网络动态变化情况下的合理分配,本文引入了多目标遗传算法来刻画无线 Ad-hoc 网络任务调度的多目标遗传模型,提出了一种基于改进 NSGA- II 的任务调度算法,并对算法进行改进,以保证算法的收敛性。

1 相关工作及本文贡献

由于 Ad-hoc 网络本身所具有的动态拓扑性、节点资源有限性、数据的不可靠性等特性,需要从实时性、节能性和协调性 3 方面改善和满足无线 Ad-hoc 网络对任务调度算法的性能要求。

现有研究者主要从实时性和节能性角度就无线 Ad-hoc 网络任务调度问题展开了研究,从分析 Ad-hoc 网络任务调度的特征和主要规律入手,结合嵌入式实时系统和分布式实时

到稿日期:2012-11-20 返修日期:2013-03-13 本文受国家自然科学基金项目(60972047),陕西省教育厅科研项目(11JK0927),高等学校学科创新引智计划(B08038)资助。

杨红丽(1977-),女,讲师,E-mail:yanghong_li102@sina.com。

系统的任务调度理论基础,根据其共性和不同,对传统算法进行科学的改造和重构,并对 Ad-hoc 网络节点的潜能进行深层次挖掘,提出了一系列的网络节点内部的单处理器任务调度策略^[4,5]。文献[6]对异构 Ad-hoc 网络环境下 Min-Min、A*、Generic Algorithm 等 6 种启发式任务调度算法的综合考虑能耗和任务完成时间的任务调度做出了研究,但没有考虑节点的不确定性因素。文献[7]使用移动代理进行任务分配,虽然提出了节点自私的问题,但仅依靠节点剩余能量范围来定义节点的自私性是不真实的,因而不能满足用户对资源可信方面的服务质量要求,导致当前的任务分配算法难以在开放、动态真实的环境中有效使用。文献[8]提出了一种同时考虑最小化平均任务延时和能耗的动态任务调度算法,但也没考虑到节点的易失效性带来的问题。Bokar 提出的 SEADTA^[9]算法考虑了节点能耗、全网的网络寿命及可扩展性,但是实时性效果不佳。文献[10]提出了一种能够充分利用网络资源和最大化网络连续运作性的遗传算法,该算法考虑到了节点的性能、网络资源及节点能耗。Alsali 在文献[11]中提出了一种移动 Ad-hoc 网络的贪婪算法,其保证了节点能耗的最小。

这些调度策略主要在最小节点能耗的前提下,以任务完成时间作为调度目标,将任务调度到具有最短期望完成时间的节点上执行,以获得尽可能短的任务完成时间。然而分配到远程节点的任务可能会因为节点的移动、物理故障或者受到攻击而无法完成,并且无线 Ad-hoc 网络部署环境的复杂性、动态性和开放性增加了这种情况发生的可能性,而目前的调度策略都没有考虑到这个问题,因此会导致任务被分配到可靠性较低的节点上去执行,使任务很容易因为节点的失效而被中断,降低了无线 Ad-hoc 网络的效率和服务质量。

与这些工作相比,本文的主要贡献在于提出了任务执行概率的概念,给出了一个同时考虑总任务完成时间、任务执行概率和节点能耗的任务调度多目标优化算法。该算法在追求最短的任务完成时间和能耗均衡的同时,还考虑到任务执行概率,避免将任务分配到可靠性比较低的节点上执行,从而有效地降低了节点的失效对任务执行的影响。算法在实际应用中,通过对任务的合理分配和适应度的合理计算使完成任务时间性能和节点失效概率、能耗性能之间取得较好的均衡。

2 问题描述

无线 Ad-hoc 网络一般由部署在恶劣环境下大量的无线节点组成。任务正常执行的前提是节点能够提供一个稳定的硬件和软件执行环境,而节点的移动、硬件故障、能量耗尽、链路中断以及软件错误都会导致这种任务无法正常执行完成。每个节点都有“正常”和“失效”两个状态,当节点进入失效状态时任务无法在该节点执行,并且执行状态信息会丢失或无效。节点会出现失效的概率称为节点失效率,令 λ_i 表示节点 n_i 的失效率,则在 n_i 上的任务完成概率为 $(1-\lambda_i)$ 。假设节点的失效过程是相互独立的,并且符合泊松过程。定义任务集为 $\Gamma = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$,假设任务集中的任务之间都是相互独立的,并且这些任务是不可分解的,该集合被称为元任务。

2.1 任务完成时间

一个无线 Ad-hoc 网络由 m 个节点 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$

组成,有 n 个独立任务要竞争使用节点,则任务分配的目标是要把这 n 个任务合理地分配到这 m 个节点上执行,使总完成时间最小。任务调度的结果用 $n \times m$ 的二维矩阵 X 来表示, $x_{i,j} = 1 (x_{i,j} \in X)$ 表示任务 τ_i 调度到节点 n_j 上执行,否则 $x_{i,j} = 0$ 。

任务在各节点上的执行时间可以根据任务类型通过预测技术和实际历史处理来估计^[12,13],具体的执行时间可以用一个 $n \times m$ 的二维矩阵 Y 来表示,其中的元素 $y_{i,j}$ 表示任务 τ_i 在节点 n_j 上的估计执行时间。 n_j 的执行时间为分配到该节点上的所有任务的执行时间之和,具体表示如下:

$$T_j = \sum_{i=1}^n y_{i,j} \quad (1)$$

则 n 个任务按照调度结果 X 在 m 个节点上执行任务的总任务的完成时间具体表示如下:

$$T(\Gamma, N, X) = \text{Max}_{n_j \in N} T_j \quad (2)$$

2.2 任务完成概率

节点的任务完成概率由分布式系统中的生存性的概念引申而来。生存性表示任务能够被持续正常执行的能力。

定义 任务完成概率为任务在节点上能够正常完成的概率。

用 $P(\tau_i, n_j)$ 表示任务 τ_i 在节点 n_j 上的完成概率。根据前一节的说明,节点在时间 t 内处于“正常”状态的概率为 $\exp(-\lambda_j t)$,因为当处理节点处于“正常”状态时任务才能正常执行,于是可以得到:

$$P(\tau_i, n_j) = \exp(-\lambda_j T_j) \quad (3)$$

令 $P(\Gamma, N, X)$ 表示 n 个任务按照调度结果 X 在 m 个节点上执行任务的完成概率,则有:

$$P(\Gamma, N, X) = \exp\left[-\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_j x_{i,j} T_j\right] \quad (4)$$

把任务完成概率作为调度目标的目的就是避免任务被分配到可靠性较低的节点上去执行。降低节点失效对任务执行造成的影响,尽可能地最大化任务集合 Γ 正常执行的概率,即通过一定的调度策略获得合适的 X ,使 $P(\Gamma, N, X)$ 尽可能最大化,从而有效地提高无线 Ad-hoc 网络的服务质量。

令 $L(\tau_i, n_j) = -\lambda_j T_j$,可以看出,若要提高 $P(\tau_i, n_j)$,就要降低 $L(\tau_i, n_j)$,同理令:

$$L(\Gamma, N, X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_j x_{i,j} T_j \quad (5)$$

可以看出,尽可能最大化 $P(\Gamma, N, X)$ 也就是尽可能最小化 $L(\Gamma, N, X)$ 。因此,以最大化任务执行概率作为目标的调度算法就是要使 $L(\Gamma, N, X)$ 尽可能最小。

2.3 能量消耗

由于节点通常能量有限,难以补充,因此降低功耗、延长使用寿命成为无线 Ad-hoc 网络设计的核心问题。节点的能耗主要由通信能耗和执行任务能耗构成。设节点在处理任务时的能量消耗为 C_p ,在执行任务过程中的通信能耗为 C_c 。则网络中无线节点的总能耗为:

$$C(\Gamma, S, X) = \sum_{i=1}^m (C_p + C_c) \quad (6)$$

3 算法描述

多目标遗传算法的核心就是协调多个目标函数之间的关系,找出使各目标函数能尽量较小(或较大)的最优解集。

1989年 Goldberg 首先提出了基于 Pareto 最优解的概念计算个体适应度的方法,借助非劣解等级的和相应的选择算子使种群在优化过程中朝 Pareto 最优解的方向进化。这种思想已产生了多种基于 Pareto 最优解的多目标遗传算法(MO-GAs),如 FFGA、NPGA、NSGA、SPGA 等。其中 NSGA 算法是最直接体现 Goldberg 思想的算法。2001年 Deb 提出的 NSGA-II 算法^[14]是在 NSGA 算法基础上经过改进而得到的一种多目标遗传算法。它引入了快速分类、约束支配和精英策略,一次运行可以获得多个 Pareto 最优解,因此具有收敛快、计算量小、实时性好等优点。为了简化无线 Ad-hoc 网络处理复杂度,适应网络的动态变化,首次把 NSGA-II 算法引入无线 Ad-hoc 网络的任务调度方案中,利用其求解本文描述的多目标优化问题。

无线 Ad-hoc 网络任务调度问题有其特殊性,例如涉及大规模的约束条件,所以要对 NSGA-II 算法做以下的改进。

(1)个体编码方案:采用布尔型编码方案,即用一个布尔矩阵表示任务-节点关联矩阵。NSGA-II 采用的是浮点编码方案,而无线 Ad-hoc 网络任务调度问题关注的是任务-节点关联矩阵,这是一个 0/1 型的布尔矩阵,采用浮点方案会导致算法的进化效率低:一方面,遗传操作很难使个体的基因位置发生 0~1 转变,经常使遗传操作失效,而布尔型编码只要变化一个基因位置,就可以使个体有变化;另一方面,浮点编码遗传操作的执行速度比布尔型编码的执行速度慢得多。

(2)资源约束处理:无线 Ad-hoc 网络任务调度问题的资源约束规模与“任务个数 \times 无线节点个数”相当,种群个体要满足如此众多的约束条件是十分困难的。文献^[14]处理约束条件的方法是把不满足约束的个体的适应值设置成尽量小的数,使只有满足约束条件的可行个体才能进入下一代。由于无线 Ad-hoc 网络任务调度问题涉及的约束规模庞大,个体很难满足所有的约束,导致进化过程长期缺少可行的个体或者可行个体的数量过少,使得进化效率低。针对这种情况,采用强制修正个体的方法,即若个体不满足某项约束,则将该任务随机指派到某个节点,直到该个体满足所有约束为止。这种操作的目的是把所有不可行的个体都强制转化成可行的个体,至于得到的个体的优秀程度,不是此处关心的问题,至少经过该操作后整个种群都满足约束。

(3)个体强制变异操作:在每代进化之后,比较任意两个个体,若两个个体完全相同,则对其中某个个体执行变异操作,而且只对一个基因位置执行变异。引入该操作的原因是在实验中观察到出现大量重复个体的现象,其使得种群的进化速度缓慢。NSGA-II 在处理无线 Ad-hoc 网络任务调度问题时表现良好,是因为问题的 Pareto 解数量众多而且比较均匀地分布,适合 NSGA-II 搜索性能力强和优秀个体种群分布均匀的特点。但是在无线 Ad-hoc 网络任务调度问题中,优秀个体的个数只有几个,而且趋于集中,所以在实验中出现上述问题。采用个体强制编译操作后,使算法在进化过程中不断探索解空间,提升了算法的搜索能。针对进化搜索往往会陷入局部最小,通过在算法中合理进行进化粒子位置重置来避免这一问题。

算法流程图如图 1 所示。

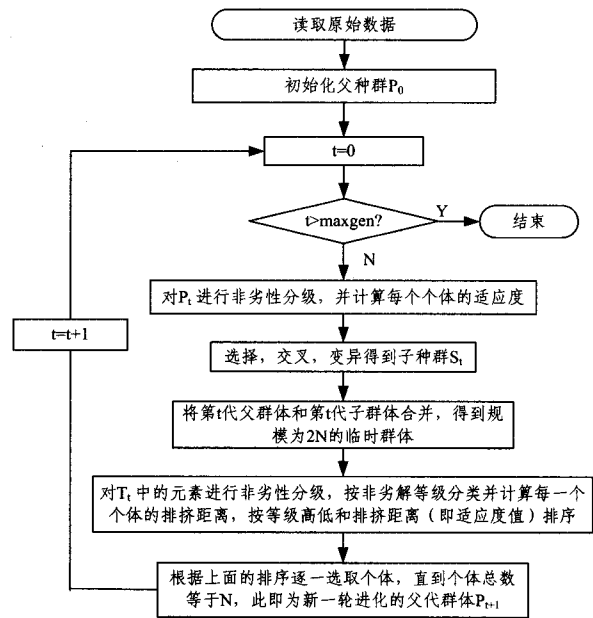


图 1 算法流程图

4 仿真分析

在仿真实验中,参数设置如下:

(1)设置种群大小 $P=50$,交叉概率 $P_c=0.9$,变异概率 $P_m=0.025$ 。

(2)假定网络中一共有 50 个节点。节点的内在能量消耗为执行 80 个估计执行时间的消耗成本,成本为在 0.5~1.5 范围内服从中心点为 1 的正态分布。无线 Ad-hoc 网络的通信能耗由一个 $m \times m$ 的矩阵表示,矩阵为在 2~8 范围内服从中心点为 5 的正态分布。

(3)每个任务在各个节点上的执行时间满足 0.01~0.1 的均匀分布。

(4)处理节点的失效率满足 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 区间的均匀分布。

将 5 次实验结果取平均,得到最终的实验结果。

图 2 为该方案的统计信息的三维示意图。由图可见,经 NSGA-II 算法优化后的各方案之间的关系均为非支配,较好地分布在一个三维曲面上。说明给出的方案很好地体现了在多个目标准则间的均衡考虑,优化解的分布性很好。

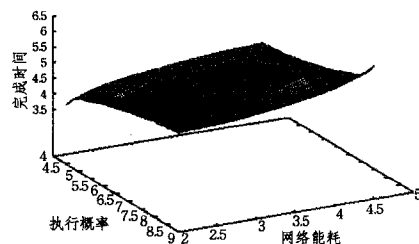


图 2 调度算法统计信息示意图

与算法 EADTA^[8]、SEADTA^[9] 比较,考察其任务完成时间和节点能耗情况。

从图 3 可以看出,本文提出的 MOTA 由于以最小总任务完成时间为目标,与其他算法相比,具有最短的时延。从图 4 所示的能耗均衡示意图来看,MOTA 算法和 SEADTA 算法

(下转第 72 页)

[5] Wang Yu, Wu Hong-yi. The Delay/Fault-Tolerant mobile sensor network(DFT-MSN). A new paradigm for pervasive information gathering[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2007, 6(9):1021-1034

[6] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks[R]. Technical Report CS-200006. 2000

[7] Wang Y, Wu H Y. Replication-Based efficient data delivery scheme (RED) for delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN)//Gregori E, ed. Proc. of the 4th Annual IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops. Washington: IEEE Computer Society Press, 2006; 485-489

[8] Wnag Y, Wu H Y, Dang H, et al. Analytic, simulation, and em-

[9] 朱金奇, 刘明, 龚海刚, 等. 延迟容忍移动传感器网络中基于选择复制的数据传输[J]. 软件学报, 2009, 20(8): 2227-2240

[10] 许富龙, 刘明, 龚海刚, 等. 延迟容忍传感器网络基于相对距离的数据传输[J]. 软件学报, 2010, 21(3): 490-504

[11] 刘唐, 彭舰, 王建忠, 等. 延迟容忍移动传感器网络中基于节点优先级的数据转发策略[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 140-143

[12] 朱金奇, 刘明, 龚海刚, 等. 延迟容忍移动传感器网络中基于选择复制的数据传输[J]. 软件学报, 2009, 20(8): 2227-2240

[13] 张可, 曾家智, 刘伟. 延迟容忍移动传感器网络中基于概率复制的数据传输策略及其性能研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 677-681

(上接第 63 页)

要优于 EADTA 算法。但是随着任务规模的增大, MOTA 算法比 SEADTA 算法能耗更加均衡。

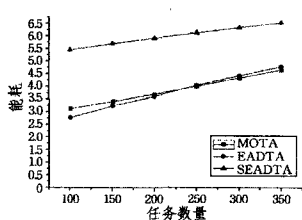
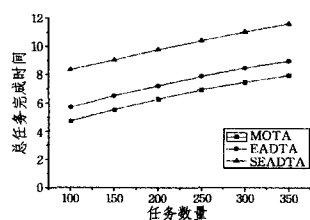


图 3 总任务完成时间对比图

图 4 能耗均衡指数对比图

结束语 本文提出了一种无线 Ad-hoc 网络任务调度问题的多目标优化算法, 首次将 NSGA-II 应用于无线 Ad-hoc 网络的任务调度分析。根据无线 Ad-hoc 网络的特点, 以总任务完成时间、能量消耗、任务执行概率这 3 个设计目标进行任务的优化调度。建立了问题的数学模型, 并给出了利用 NSGA-II 算法进行求解的详细方案。仿真结构表明, 方案很好地体现了在多个目标准则间的均衡考虑, 优化解的分布性很好, 与其他算法相比, 在总任务完成时间和能耗均衡性方面具有优势。

参 考 文 献

[1] Hu Z, Tang X S, Wang X. A Distributed Algorithm for DAG-Form Service Composition Over MANET[C]// International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2007; 1664-1667

[2] Xie T, Qin X. An Energy-Delay Tunable Task Allocation Strategy for Collaborative Applications in Networked Embedded Systems[J]. IEEE Transactions on Computers, 2008, 57(3): 329-343

[3] Moges M, Ramirez L A, Gamboa C. Monetary Cost and Energy Use Optimization in Divisible Load Processing[C]//Proceedings of the 2004 Conference on Information Sciences and Systems. Princeton University, March 2004

[4] Kim J K, Siegel H J, Maciejewski A A. Dynamic Resource Management in Energy Constrained Heterogeneous Computing Systems Using Voltage Scaling[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(11): 1445-1457

[5] Thakkar A, Pradhan S N. Power aware scheduling for Adhoc Sensor Network nodes[C]// Proceedings of 3rd International Conference on Signal Processing and Communication Systems. 2009: 1-7

[6] Shivle S, Castain R, Siegel H J, et al. Static mapping of subtasks in a heterogeneous Ad Hoc grid environment[C]// Proceedings of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium. Santa Fe: IEEE Computer Society, 2004; 110-123

[7] Wang Z, Chen Q, Gao C S. Implementing grid computing over mobile Ad Hoc networks based on mobile agent[C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Grid and Cooperative Computing Workshops. Washington: IEEE Computer Society, 2006; 321-326

[8] Lu X S, Hassanein H, Akl S. Energy aware dynamic task allocation in mobile ad hoc networks[C]// Proceedings of the International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing. 2005; 534-539

[9] Bokar A, Bozyigit M, Sener C. Scalable Energy-Aware Dynamic Task Allocation[C]// Proceedings of International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. 2009; 371-376

[10] Xu M. Research of Task Scheduling of Ad-hoc Cluster Computing Based on Genetic Algorithm[C]// Proceedings of International Conference on Wireless Networks and Information Systems. 2009; 137-139

[11] Alsalih W, Akl S, Hassanein H. Energy-aware task allocation over MANETs[C]// Proceedings of International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. 2005; 315-322

[12] Iverson M A, Ozguner F, Potter L. Statistical prediction of task execution times through analytic benchmarking for scheduling in a heterogeneous environment[J]. IEEE Transactions on Computers, 1999, 48(12): 1374-1379

[13] Gong L, Sun X H, Waston E. Performance modeling and prediction of non-dedicated network computing[J]. IEEE Transactions on Computers, 2005, 51(9): 1041-1055

[14] Kalyanmoy D, Amrit P, Sameer A. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197