

无线传感器网络中的多 Sink 节点的放置问题

潘 耘¹ 李 嫣¹ 李晋凯¹ 陈志雄²

¹(中国传媒大学计算机学院 北京 100024)

²(兰州大学第一附属医院信息中心 兰州 730000)

(pany@cuc.edu.cn)

Multiple Sink Node Placement Problems in Wireless Sensor Networks

Pan Yun¹, Li Yan¹, Li Jinkai¹, and Chen Zhixiong²

¹(College of Computer, Communication University of China, Beijing 100024)

²(Information Center, the First Hospital of Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract In those time-sensitive wireless sensor network (WSN) applications such as forest fire monitoring, etc., the maximal delay on message transportation must be restricted within an acceptable range. By using multiple sink nodes, the distance between sensors and sinks can be effectively reduced and this leads to the decrease of the delay as well as the energy consuming. This paper at first builds an optimization model for WSN multiple sink deployment problem, and then designs a hybrid intelligent optimization algorithm that is divided into two stages. The first stage employs an ant algorithm to solve the association problem for a given deployment strategy, i. e., determining the associated sink for each sensor; The second stage uses a genetic algorithm to solve the optimization problem on deployment strategy, i. e., determining where the sink nodes are deployed. Finally, the simulation and the comparisons with the randomized optimization algorithm manifest that our method is practical.

Key words wireless sensor network; deployment problem; ant algorithm; genetic algorithm

摘 要 在诸如森林火灾监测等对时间敏感的无线传感器网络(WSN)应用系统中,所允许的最大消息传递延迟必须限制在可接受的范围内.通过使用多个 sink 节点不但能降低消息传递延迟,而且能有效降低通信中的能量消耗.首先为 WSN 中的多 sink 节点放置问题建立了优化模型,进而设计一个两阶段的混合智能优化算法:第 1 阶段使用蚂蚁算法解决给定多 sink 节点部署方案下的普通节点与 sink 节点间的关联问题;第 2 阶段使用遗传算法解决部署方案的寻优.最后,通过与随机优化算法的仿真对比,表明本文方法具有一定的可行性.

关键词 无线传感器网络;放置问题;蚂蚁算法;遗传算法

中图法分类号 TP393

无线传感器网络节点数量众多,且受成本、体积和功耗的限制,其处理能力、存储能量、通信能力及范围比普通计算机功能要弱小得多,在部署节点和设计各种协议时要考虑传感器节点的能量问题^[1].

对于大规模 WSN,数据需要经历多跳通信才能传递给 sink 节点,每个传感器节点不但是源,而且也承担路由的功能,要为许多源节点传递大量的信息,能量的消耗与通信的距离直接有关.可部署多个

收稿日期:2010-09-08

基金项目:中国传媒大学“211”工程和“382 人才工程”基金项目

sink 节点来减少传感器节点与 sink 之间的距离,有效地降低通信中的能量消耗.

寻找一个优化多 sink 节点部署的方法在许多文章中探讨, Kim 等人^[2]建立了优化模型,使用了整数规划的方法来求解; Oyman 等人^[3]提出了迭代聚类算法,首先定义了许多簇,然后重塑它们,目的是让 sink 节点处在簇的中心,这个过程不断的重复,直到簇不再重塑; Poe 等人^[4]用遗传算法结合网络微积分可以得出让最大最坏情况下的延迟达到最小的优化 sink 节点的部署方案; Ciciriello 等人^[5]为了提高数据传递的可靠性,让数据传递给多个 sink 节点来完成,给出一个分布式的求解方法. Vincze 等人^[6]提出了一个 1hop 的迭代算法,能依靠到邻近节点的距离信息,计算 sink 节点的部署位置.

由于不同的节点能量、处理能力等不同,以致它们要作为 sink 节点也表现出不同的汇聚能力,本文在考虑了让传输延迟减低的要求,而且也考虑了 sink 的能力不同,给出了相应的数学模型,针对传感器节点的特点,本文提出了求解该问题的蚂蚁算法和遗传算法相结合的方案,并作了大量的实验,验证算法的有效性.

1 模 型

在 WSN 上选取多个 sink 节点放置位置时,需要考虑以下问题:第一,评估放置 sink 节点的能力——承担汇聚的能力;第二,对于每个普通传感器节点都必须有一个 sink 为其提供相应服务;第三,每个普通传感器节点到其对应的 sink 节点之间的延迟不能太大. sink 节点放置问题的优化目标就是如何优化放置的位置,可使普通传感器节点到 sink 节点之间的最大延迟达到最小,并且满足 sink 节点的汇聚能力. 我们把该问题称为(multiple sink node placement problem, MSNPP)问题.

首先我们给出无线传感器网络的形式化表示——带权无向图 $G=(V, E)$, V 是传感器节点的集合; E 是边的集合(若两个节点之间信号可达,就连接一条边),边权(edge weight)表示节点之间的权值,可解释为延迟、信号强弱等,定义为 $e: V \times V \rightarrow (0, \infty)$, $e(i, j) = e(j, i)$. MSNPP 模型可定义为:普通节点集合为 $D \subseteq V$, $F \subseteq V$ 为可以放置 sink 节点的潜在集合(即功能强大的节点),整数 u_i 表示 sink 节点 i 的汇聚能力,引入两组 0-1 变量:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 是 sink 节点;} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 不是 sink 节点;} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } j \text{ 由 sink 节点 } i \text{ 来汇聚信息;} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

该模型可以归为以下的整数规划问题:

$$\min \max_{i \in F} d(i, D)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i \in F} x_{ij} = 1, j \in D, \quad (1)$$

$$\sum_{j \in D} x_{ij} \leq u_i y_i, i \in F, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in F} y_i \leq K, \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq y_i, i \in F, j \in D, \quad (4)$$

$$x_{ij}, y_i \in \{0, 1\}, i \in F, j \in D. \quad (5)$$

其中 $d(i, D)$ 表示分配给 sink 节点 i 进行汇聚的所有普通节点 j 到其的最小的边权和:

$$d(i, D) = \min_{j \in D} \sum_{e \in \text{path}(i, j)} e(i, j)$$

$$\text{s. t. } x_{ij} = 1 \quad i \in F, j \in D.$$

公式中 $\text{path}(i, j)$ 表示普通传感器节点 j 到其对应的 sink 节点 i 所经过的最短路径. 约束条件: (1)表示集合 D 中的每个节点一定要分派给唯一的 sink 节点; (2)表示每个 sink 节点要汇聚的普通节点不能超过自己的负载能力; (3)考虑到成本的问题, sink 节点数目不超过 K 个; (4)表示给普通节点分派的 sink 节点一定是存在的; (5)表示变量的取值范围.

2 两阶段混合智能优化算法

求解 MSNPP 问题,我们设计了两阶段混合智能优化算法(Two-stage hybrid intelligent optimization algorithm, HIOA)来求解,可分成两个问题:

问题 1 简称为关联问题,即对于给定的 sink 节点部署方案,为每个普通传感器节点关联或分配合适的 sink 节点(离普通节点最近的 sink 节点),计算每个 sink 节点覆盖下的普通传感器节点到 sink 节点的最短距离,获得最大的一个值,即 $\max_{i \in F} d(i, D)$, 采用蚂蚁算法来求解;

问题 2 简称为部署问题,即选择合适的 sink 节点部署方案. 该问题的求解需要调用问题 1 的求解,最终获得最优的全局部署方案,即 $\min_{i \in F} \max d(i, D)$, 采用遗传算法来求解. 限于篇幅,只对部署问题给与详细的求解.

2.1 关联问题的求解

无线传感器网络是一个没有集中控制的网络,

需要靠网络中的每个节点相互协作来完成一个任务,单个节点的失效不应该影响到其他节点乃至整个网络的工作.蚁群算法具有很强的可靠性和可扩展性,在没有集中控制并且不提供全局模型的前提下,为寻找复杂的分布式问题的解决方案提供了基础.

问题1的求解中,牵涉两类对象,一类是普通节点,一类是 sink 节点.我们需要考虑这两类对象的动作.利用路径越短,信息素增加得越多原理,通过蚂蚁算法为普通节点求解与之对应的 sink 节点.

2.2 部署问题的求解

遗传算法(genetic algorithms)^[7]是模拟达尔文遗传选择和自然淘汰学说的计算模型,其核心思想源于这样的认识:从简单到复杂、从低级到高级的生物进化过程本身是一个自然的并行发生的稳健的优化过程.这一优化过程的目标是生物(个体及种群)对环境的适应性,而生物种群则通过“优胜劣汰”及遗传变异来达到进化的目的.

现给出求部署问题的遗传算法求解方案.设 $|F|=n$,该模型的解空间为 $y \in \{0,1\}^n$, $y(j)=0$ 表示节点 j 为普通节点;否则,为1表示 sink 节点.

第1步.随机给定一个部署解 y ,并且满足以下约束条件:

$$\sum_{j=1}^n y(j) \leq K; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n u(j) \times y(j) \geq |D|. \quad (7)$$

式(6)表示 sink 节点的个数不能超过 K 个;式(7)汇聚节点的汇聚能力之和应该大于普通节点的数目.

第2步.根据 y ,调用蚂蚁算法获得

$$g(x) = \max_{i \in F} d(i, D).$$

第3步.确定 y 的适应值

$$f(y) = \frac{1}{g(y) + 1}.$$

第4步.由第2步到第3步构成了完整的个体评价环境 $y \leftrightarrow f(y)$,根据此评价环境编写遗传算法,选择最优的 y 值,在求解的过程中如 y 不满足式(7)中的约束条件,还需要进行修正.

修正方法:

$repairchromosome(y, D, U)$

{

$/ * y$ 是染色体;

U 是 sink 节点的承载能力;

D 为需要分配 sink 的节点,应该为所有的节点集 V 数减去 sink 节点个数 $*$ /

$$1) \text{ 计算 } \sum_{j=1}^n u(j) \times y(j).$$

2) 如果 sink 节点的承载能力小于需要服务的节点数,那么,就将承载能力最大的、未被选中的节点选为 sink 节点.直到承载能力大于等于需要服务的节点数为止.

3) 修正 K 的约束,若 $\sum_{j=1}^n y(j) > K$,则把选为 sink 节点的并负载能力最小的节点变为普通节点,反复修正满足该约束条件.

4) 如果还是不能满足 $\sum_{j=1}^n u(j) \times y(j) \geq |D|$ 约束条件,就删除这条染色体,即 $y=0$.

}

3 仿真与结果分析

3.1 对比算法

把随机放置算法(random placement algorithm, RPA)作为对比算法,在集合 F 中随机地选择 K 个节点 i 为 sink 节点,在满足负载能力 u_i 约束的情况下,把到节点 i 代价最小的集合 D 中的 u_i 个节点分配给 i .重复以上过程,直到集合 D 中的所有节点都分派给了集合 F 中的节点.再重复随机算法若干次,找到总代价最小的一组解.

3.2 仿真实验

我们采用 Marmol 等人^[8]做的 TRMSim-WSN 仿真工具来生成网络的拓扑图.节点随机散落在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的区域内,节点的发射功率为 20 m .蚂蚁算法的各个参数: α 为信息启发式因子,表示轨迹的相对重要性,反映了蚂蚁在运动过程中所积累的信息在蚂蚁运动时所起的作用,其值越大,则该蚂蚁越倾向于选择其他蚂蚁经过的路径,蚂蚁之间协作性越强,取值为 1.0 ; β 为期望启发式因子,表示可见度的相对重要性,反映了蚂蚁在运动过程中启发信息在蚂蚁选择路径中的受重视程度,其值越大,则该状态转移概率越接近于贪心规则,取值为 1.0 ; $\varphi=0.01$ 为信息素局部更新时的信息素的挥发系数;初始 $Pheromone=0.59$ 就是初始的信息素大小; q_0 是一个 $0 \sim 1$ 的常数,用在蚂蚁状态转移公式里; ρ 为信息素全局更新时的挥发系数.

在求解问题时,我们取最大进化代数 100 ,种群规模为 30 .早熟控制对于提供遗传算法的全局寻优能力有重要作用,而交叉概率和变异概率的设定

也是每个遗传算法实现时必须考虑的问题,为此,我们设计实现了自适应的早熟控制算法. 自适应的交叉概率 $p_c = 1 - md$ 和变异概率 $p_m = md/20$, 基因片翻转概率 p_r 和基因片迁移概率 p_s 均设为 0.005.

图 1 给出了 sink 节点个数为 7 时,在网络节点从 30 变化到 400 时,与随机放置算法的运行结果的对比,可以看出:随着节点的增多,HIOA 算法得出了代价值小于随机放置算法. 图 2 给出了在网络节点为 100 时,sink 节点个数与代价之间的关系,实验表明 sink 节点个数的增加会引起代价的降低.

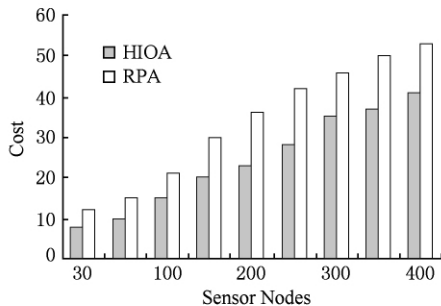


图 1 MSNPP 算法与随机放置算法的对比

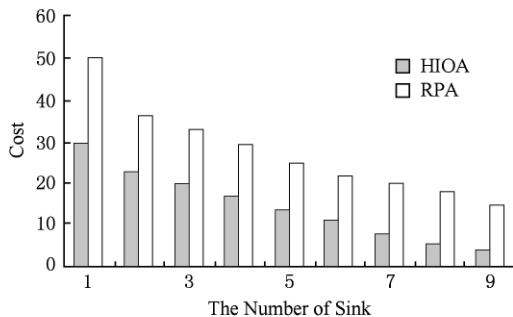


图 2 sink 节点个数与代价之间的关系

4 结 论

由于不同的节点能量、处理能力等不同,以致它们要作为 sink 节点也表现出不同的汇聚能力,本文中在考虑了让传输延迟减低的要求,而且也考虑了

sink 的能力不同,给了相应的数学模型,针对传感器节点的特点,提出了求解该问题的蚂蚁算法和遗传算法相结合的方案,并作了大量的实验,验证算法的有效性.

参 考 文 献

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291
- [2] Kim H, Seok Y, Choi N, et al. Optimal multi-sink positioning and energy-efficient routing in wireless sensor networks. Information Networking, 2005, 3391: 264-274
- [3] Oyman E I, Ersoy C. Multiple sink network design problem in large scale wireless networks //Proc of IEEE ICC2004. Piscataway, NJ: IEEE, 2004: 3663-3667
- [4] Poe W Y, Schmitt J B. Minimizing the maximum delay in wireless sensor networks by intelligent sink placements. Kaiserslautern: University of Kaiserslautern, 2007
- [5] Ciciriello P, Mottolal L, Picco G P. Efficient routing from multiple sources to multiple sinks in wireless sensor networks //Proc of EWSN2007. Berlin: Springer, 2007: 34-50
- [6] Zolt'an V, Rolland V, Attila V. Deploying multiple sinks in multi-hop wireless sensor networks //Proc of IEEE Pervasive Services 2007. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 55-63
- [7] [日]玄光男, 程润伟著, 汪定伟等译. 遗传算法与工程设计. 北京: 科学出版社, 2000
- [8] Marmol F G, Perez G M. TRMSim-WSN, Trust and Reputation Models Simulator for Wireless Sensor Networks //Proc of the IEEE Int Conf on Communications, Communication and Information Systems Security Symposium (IEEE ICC2009). New York: IEEE Computer Society, 2009: 14-18

潘 耘 女, 1974 年生, 副教授, 主要研究方向为网络系统结构.

李 嫣 女, 1986 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络.

李晋凯 男, 1986 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络.