

基于 QoS-PSO 的无线传感器网络路由方法

刘 敏,徐世军,孙思毅,严隽薇

(同济大学 电子与信息工程学院,上海 201804)

摘要: 过去,大部分的无线传感器网络(WSN)的应用局限于数据的采集,比较少地关注网络中各节点的协同合作,现有的 WSN 路由算法对于网络的动态性的支持力度非常弱,不能满足分布式的无线网络和无线传感器网络应用对于网络服务质量的需求,路由优化能力不足.通过综合考虑多个服务质量指标,然后基于智能遗传算法微粒群算法进行路由寻优,为路由寻优提供了很好的搜索能力.仿真结果表明,基于微粒群优化算法,以综合服务质量(QoS)指标为目标的路由很好地改善了其服务质量性能.

关键词: 微粒群算法;无线传感器网络;综合服务质量;智能 Agent 路由;仿真环境

中图分类号: TP 393

文献标识码: A

Routing Method in Wireless Sensor Network Based on Quality of Service and Particle Swarm Optimization

LIU Min, XU Shijun, SUN Siyi, YAN Junwei

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In the past, most of the wireless sensor network (WSN) applications were limited to data collection, and less attention was paid on the collaboration in the network. The weak support of the existing WSN routing algorithm for dynamic in network can not meet the service requirements of the distributed wireless networks and wireless sensor network applications. Based on a comprehensive consideration of the quality of service (QoS) indicators, and a routing search according to an intelligent particle swarm optimization (PSO) algorithm. New algorithm provides a very good search capabilities. The simulation results show that the PSO-based routing with a comprehensive QoS indicator improves well the service quality.

Key words: particle swarm optimization; wireless sensor network; comprehensive quality of service; intelligent Agent routing; simulation environment

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)由大量密集部署在监控区域的微型廉价低功耗传感器节点构成,通过无线通信方式形成一个多跳的无线网络系统^[1].无线传感器网络在军事、民用和工业生产等领域具有广阔的应用前景.与传统网络相比,其节点的能量、通信和计算能力较有限,网络设计需考虑容错性、可扩展性、可靠性和节能等需求^[2-3].

随着网络的飞速发展,一些新的问题也随之而来.最为关键的问题是网络如何满足应用的需求,也就是网络的服务质量(quality of service, QoS)的问题^[4].对那些有带宽、延时、延时抖动等特殊要求的应用来说,现有的尽力而为的服务无法满足服务质量的需要.由于应用和网络拓扑结构的特点决定了无线传感器网络的 QoS 的研究的重要性,因而有必要在网络路由协议中研究 QoS.

作为一种新的进化计算技术,微粒群优化(particle swarm optimization, PSO)算法是一种很有效的搜索与优化技术.它除了具有简单、通用、鲁棒性强和适于并行处理等优点外,还具有采用实数编码的优势.粒子群优化算法近些年得到迅速发展,已广泛应用于函数优化、神经网络训练、模糊系统控制以及其他遗传算法的应用领域^[5-7].

本文对微粒群算法和无线传感器网络路由进行了研究,提出了综合服务质量(QoS)度量值,以综合 QoS 为微粒群算法的目标函数,实现了对无线传感

收稿日期: 2009-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61073090);上海市科学技术委员会科研计划项目(09DZ1122300,09510701300);上海市重点学科建设项目(B04);广东省教育部产学研结合项目(2009GJE00026,2009B090300429)

作者简介: 刘 敏(1972—),男,副研究员,工学博士,主要研究方向为智能生产系统. E-mail: lmin@tongji.edu.cn

孙思毅(1985—),男,硕士.主要研究方向为智能生产系统. E-mail: ssy29ssy@yahoo.com.cn

器网络路由优化的迭代过程,并与传统算法的结果进行了比较,得到了满意的结果.

1 WSN 的综合 QoS 指标

1.1 QoS 路由问题

路由的 QoS 度量值是通过量化的各 QoS 指标来计算的.这些度量值可以是一个或多个参数.例如,延时、带宽、抖动等.保证 QoS 的路由协议是指在路由建立时,考虑延时、丢包率、带宽等 QoS 参数,从众多的可行路由中选择一条最适合的 QoS 应用要求的路由.

基于 QoS 路由的目的就是在网络中寻找最优路径,要求从源节点出发,到达目的节点,且满足所有的 QoS 约束条件,达到特定的服务水平,这里的特定的服务水平不是单指某一个指标而是各 QoS 指标的一种平衡.

首先建立无线传感器网络的模型.一个无线传感器网络可以定义为无向图 $G(V, E)$,其中 V 是具备无线连接的传感器节点的集合,网络中有 $n+1$ 个节点, $V = \{v_0, v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$,每一个节点的无线通信半径为 r_i ,通信区域为 A_{v_i} ,边 $e = (v_i, v_j) \in E$ 表示一对节点 (v_i, v_j) 的双向无线连接. G 中的一条路径 $P(v_1, v_n)$ 是边的有序组合序列, $P(v_1, v_n) = ((v_1, v_2), (v_2, v_3), \dots, (v_{i-1}, v_i), \dots, (v_{n-1}, v_n))$.

对任一路径 $P(v_s, v_d)$,其中 v_s 和 v_d 分别代表源节点和目的节点,可定义综合 QoS 指标.本文考虑延时、带宽和包丢失率.路径 $P(v_s, v_d)$ 的 QoS 可以在每一个节点和每一条链路上得到体现,对于任一网络节点 $v \in V$,分别为延时函数 $\text{delay}(v)$,带宽函数 $\text{bandwidth}(v)$,包丢失率函数 $\text{packet_loss}(v)$ 和能量函数 $\text{energy}(v)$.相应地对于网络中的任一链路 $e = (v_i, v_j) \in E$ 也有对应的 QoS 指标,分别为延时函数 $\text{delay}(e)$ 、带宽函数 $\text{bandwidth}(e)$ 、包丢失率函数 $\text{packet_loss}(e)$ 和能量函数 $\text{energy}(e)$.

通过对节点和链路的 QoS 指标的定义,可以计算的路径的 QoS 指标.对于给定的源节点 $v_s \in V$,目的节点 $v_d \in V$,一条路径 $P(v_s, v_d)$ 对应的 QoS 指标存在下列关系:

$$\text{Delay}(P(v_s, v_d)) = \sum_{v \in P(v_s, v_d)} \text{Delay}(v) + \sum_{e \in P(v_s, v_d)} \text{Delay}(e)$$

$$\text{Bandwidth}(P(v_s, v_d)) = \min_{e \in P(v_s, v_d)} \{\text{Bandwidth}(e)\}$$

$$\text{Packet_loss}(P(v_s, v_d)) = 1 - \prod_{e \in P(v_s, v_d)} (1 - \text{Packet_loss}(e))$$

如果路径 $P(v_s, v_d)$ 是一条满足各 QoS 指标的路径,必须满足如下条件:

$$\text{Delay}(P(v_s, v_d)) = \sum_{v \in P(v_s, v_d)} \text{Delay}(v) +$$

$$\sum_{e \in P(v_s, v_d)} \text{Delay}(e) < D$$

$$\text{Bandwidth}(P(v_s, v_d)) =$$

$$\min_{e \in P(v_s, v_d)} \{\text{Bandwidth}(e)\} > B$$

$$\text{Packet_loss}(P(v_s, v_d)) = 1 -$$

$$\prod_{e \in P(v_s, v_d)} (1 - \text{Packet_loss}(e)) < PL$$

其中 D, B 和 PL 是网络的 QoS 要求.

1.2 综合 QoS 的应用

在定义了无线传感器网络路由模型的各 QoS 函数后,建立应用到每一条路径上的综合 QoS 指标.这一指标计算的前提是每一项 QoS 指标都符合其 QoS 约束要求,如果有一项不符合,则指标对于综合 QoS 的贡献大为降低,并产生对于综合 QoS 的负面和惩罚性的影响.

如对于延时指标 f_{delay} ,如果 $\text{Delay}(P(v_s, v_d)) < D$,即路径的延时满足约束条件,则

$$f_{\text{delay}} = 1 - \frac{(1 - k)\text{Delay}(P(v_s, v_d))}{D} \quad (1)$$

其中取 k 接近于 1 如 0.9,那么 f_{delay} 的值将在 0.9 到 1 之间.如果 $\text{Delay}(P(v_s, v_d)) > D$,表明路径的延时指标不能满足应用对于延时的约束要求,则

$$f_{\text{delay}} = (1 - k) - \frac{\text{Delay}(P(v_s, v_d))}{D} \quad (2)$$

这样 f_{delay} 的值将非常小,在 0 到 0.1 之间.另两个指标带宽 $f_{\text{bandwidth}}$ 和包丢失率 $f_{\text{packet_loss}}$,进行同样的处理.最后的综合 QoS 值即是对 3 个 QoS 指标函数的综合乘积而得.

$$\text{QoS} = f_{\text{delay}} \cdot f_{\text{bandwidth}} \cdot f_{\text{packet_loss}} \quad (3)$$

综合 QoS 的值在 0 到 1 之间.

在无线传感器网络中,每一个节点都充当了一个路由器,存放着一张路由表,在每一次的路由选择中起着路由路径发现的作用.表 1 给出了一个路由表的示例,表中第一列对应着目标节点,第一行是源节点 A 的邻居节点.表中的值代表了从节点 A 经过其邻居节点到达目的节点的路径的综合 QoS 的指

标,例如从节点 A 经过邻居节点 C 到达目标节点 Y 的综合 QoS 指标是 0.43,而节点 A 经过邻节点 D 到达目标节点 Y 的综合 QoS 指标高达 0.89. 这样,用综合 QoS 指标代替了传统路由表中的各个 QoS 指标或者能量指标,只用一个指标即完成了对于每个节点路由表的建立.

表 1 节点 A 的路由表
Tab.1 Routing table of node A

源节点 A	邻节点 B	邻节点 C	邻节点 D
目标节点 X	0.86	0.56	0.77
目标节点 Y	0.73	0.43	0.89
目标节点 Z	0.76	0.32	0.21

2 基于 PSO 的 WSN 路由优化

将路由的发现优化过程看成是一个最优目标的发现过程,可以看到网络中的最佳路径的发现,完全类似于微粒群算法中通过种群间个体协作来实现对问题最优解的搜索.

2.1 微粒群算法(PSO)

微粒群算法 PSO 是由 Kennedy 和 Eberhart 等人于 1995 年提出的一种基于种群搜索的自适应进化计算技术^[7]. 算法最初受到飞鸟和鱼类集群活动的规律性启发,用组织社会行为代替了进化算法的自然选择机制,通过种群间个体协作来实现对问题最优解的搜索. PSO 算法随机产生一个初始种群并赋予每个微粒一个随机速度,在飞行过程中,微粒的速度通过自身以及同伴的飞行经验来进行动态调整,整个群体有飞向更好搜索区域的能力. 由于 PSO 算法概念简单、实现容易、参数较少、能有效解决复杂优化任务,故在过去几年中获得了飞速发展. 采用微粒群优化算法用于无线传感器网络的路由算法应该是一种比较好的选择.

将问题的多个可行解的集合称为一个种群 (swarm),种群中每个元素(可行解)称为一个微粒 (Particle),微粒的个数称为种群规模(size). 用 n 维向量 x_i 来表示第 i 个微粒的位置, v_i 来表示微粒的速度,微粒在搜索空间飞行过程中,它自身所经历的最佳位置记为 $P_{best i}$,在群体中,所有微粒经历过的最佳位置用 P_{gbest} 表示,微粒在每一代中的速度和计算评价函数的位置通过如下两个公式计算:

$$\begin{aligned} v_i &= \omega v_i + \eta_1 \text{rand}() (p_{best i} - x_i) + \\ &\quad \eta_2 \text{rand}() (p_{gbest} - x_i) \end{aligned} \quad (4)$$

$$x_i = x_i + v_i \Delta t \quad (5)$$

其中, ω 为惯性权重(inertia weight), η_1 和 η_2 为两个学习因子,通常 $\eta_1 = \eta_2 = 2.0$. $\text{rand}()$ 为介于 $(0, 1)$ 之间的随机数. 速度公式(4)的第 1 部分称为动量部分,表示微粒对当前自身运动状态的信任,为微粒提供了一个必要动量,使其依据自身速度进行惯性运动. 第 2 部分称为认知部分,代表了微粒自身的思考行为,鼓励微粒飞向自身曾经发现的最佳位置. 第 3 部分称为社会部分,表示微粒间的信息共享与相互合作,它引导微粒飞向微粒群中的最佳位置. 这 3 部分之间的相互平衡和制约决定了算法的主体.

通过上面的分析,清楚地表明 PSO 是一种基于迭代的优化算法. 系统初始化为一组随机解,然后通过迭代找到最优解. 在搜索过程中,PSO 结合本地及全局信息,但根据自身的历史信息,而且综合利用群体中邻居粒子的相关信息来调整当前位置,从而通过迭代搜索求得优化解. 在每次迭代过程中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己:第一个是粒子本身所找到的最优解,这个解叫做个体极值;另一个是整个种群目前找到的最优解,这个极值是全局极值. 另外也可以不用整个种群而只是用其中一部分作为粒子的邻居,那么在所有邻居中的极值就是局部极值.

2.2 初始路由路径的确立

基于 Agent 的路由为基于 PSO 的路由提供了很好的初始路径. 网络中每个节点都会为其余所有的节点创建和维护一张路由表,在源节点 s 和目的节点 d 之间会建立多条路由. 当一个源节点需要发送一个数据报到目的节点,但在源节点的路由表中没有发现对应路由信息,源节点就会希望与其目的节点建立路由,这时,启动一个基于 Agent 的路由发现机制. 路由发现机制是由源节点生成一个前向 Agent,并写入自己的地址和报文创建时间,然后以广播方式发送给周围的每一个相邻节点. 前向 Agent 在路由发现过程中是以广播形式传播前向 Agent.

当前向 Agent 到达目的节点时,一条路由路径就得到了,转换成后向 Agent,采用单播的方式将反向 Agent 沿着前向 Agent 的路径回到源节点,同时反向 Agent 会根据路由网络情况对沿途的节点和节点上的路由表做出调整. 这一过程就是基于 Agent 的路由发现过程.

由于前向 Agent 采用的是广播方式,故到达目的节点的前向 Agent 会有多个,同时意味着在源节点和目的节点之间建立了多条路径. 而这条多条路径

就是 PSO 对应的初始种群. 对比 PSO 算法,得到的多条路径即为多个可行解的集合,为一个种群 (swarm),每一个路径被认为是一个微粒 (particle).

2.3 基于 QoS-PSO 的路由

PSO 算法的迭代公式说明当一条路径在算法的驱动下搜索获得新的路径是通过路径的随机微调获得的. 然而在实际实现中,路径的改变 v_i 是不可得到的,因此采用改变路径经过的节点到其附近的节点的方法.

假定一条由源节点 v_s 到目的节点 v_d 的路径为

$$P(v_s, v_d) = (v_s, v_1, v_2, v_3, \dots, v_{i-1}, v_i, v_{i+1}, \dots, v_n, v_d)$$

如果节点 v_i 是随机选取的路径中的一个节点,如果存在 v_i 的一个邻节点 v ,与路径 $P(v_s, v_d)$ 中的两个节点 v_m, v_n 为邻节点,其中 $m \in \{s, \dots, 1, \dots, i-1\}, n \in \{i+1, \dots, n, d\}$, 则路径 $P'(v_s, v_d) = (v_s, v_1, v_2, v_3, \dots, v_m, v, v_n, \dots, v_d)$ 是路径的一个相邻路径.

建立了源节点 v_s 到目的节点 v_d 路径 $P(v_s, v_d)$ 的一个随机相邻路径,为了应用 PSO 算法,对照 PSO 的算法要求和相邻路径的定义,将无线传感器网络中的元素与 PSO 算法作如下的对应.

设源节点 v_s 到目的节点 v_d 路径的集合为

$$P = \{P_i(v_s, v_d) \mid i = 1, 2, 3, \dots, n\}$$

P 对应为一个粒子群,其中每一个粒子是 $P_i(v_s, v_d)$, 粒子 $P_i(v_s, v_d)$ 包含了 PSO 算法需要的信息: ① $P_i(v_s, v_d) = (v_s, v_1, v_2, v_3, \dots, v_{i-1}, v_i, v_{i+1}, \dots, v_n, v_d)$ 是粒子位置信息; ② $P_{\text{pbest}_i}(v_s, v_d)$ 表示了粒子 $P_i(v_s, v_d)$ 的最优的目标值; ③ $P_{\text{gbest}}(v_s, v_d)$ 表示了粒子群的最优目标值.

基于 PSO 思想的路由算法有如下步骤:

(1) 选取源节点和目的节点,利用前向 Agent 和后向 Agent 建立源节点和目的节点之间的路径集 (种群 swarm).

(2) 为每一个路径 (微粒) 计算综合 QoS, 以取得 P_{best} , 选取最好的 P_{best} 为 P_{gbest} .

(3) 依据 PSO 迭代公式得到新的路径.

(4) 计算综合 QoS.

(5) 当每一个路径 (微粒) 的 QoS 好于对应的 P_{best} , 替换 P_{best} ; 当最好的 P_{best} 好于 P_{gbest} , 替换 P_{gbest} .

(6) 如果算法迭代次数达到指定的最大值或 QoS 计算达到要求,结束算法;否则转步骤 (3).

(7) 确定路径,修改路由表.

3 实验及结果分析

对于优化的算法,采用 NS2 进行模拟仿真,加入了 PSO 的代码. 在模拟实验中,网络范围为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,网络中的节点假定有相同的发射功率,节点移动速度为 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,性能指标采用上文所述的综合 QoS 指标. 路由被 PSO 算法不断优化,以综合 QoS 为目标函数,称作 QoS-PSO,把它和传统算法 QoS-AODV (无线自组网按平面距离矢量路由协议) 在不同节点数量下进行比较.

如图 1 所示,随着网络中节点数量的增加,引起了综合 QoS 指标的降低. 这是因为随着网络中节点的增加,端到端的延时也同样增加,也增加了端到端的 hop 距离,同时网络中的节点的通信冲突也增加. 在模拟实验中, QoS-AODV 随着节点增加,综合 QoS 指标的下降更为显著,而 QoS-PSO 随节点增加的 QoS 的降低幅度较小,甚至逐渐稳定于一定水平.

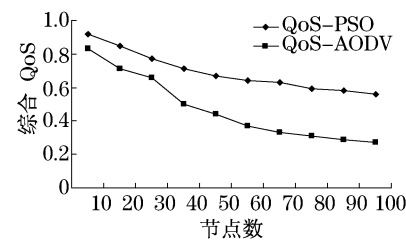


图 1 网络中节点数量与综合 QoS 指标的关系

Fig.1 Relationship between number of node and comprehensive QoS

4 结语

本文提出了无线传感器网络路由的综合 QoS 指标,基于 PSO 的路由优化能够有效快速地以综合 QoS 指标进行迭代优化,寻找到更好的路由,满足路由的服务质量的要求. 通过与传统算法的比较,得知在 WSN 中,基于 PSO 算法的路由算法可以获得更高的服务质量.

参考文献:

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393.
- [2] Chong C Y, Kumar S. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenge[J]. Proceedings of the IEEE (S0018 - 9219), 2003, 91(8): 1247.
- [3] Estrin D, Govindan R, Heidemann J. Next century challenges:

- scalable coordination in sensor networks[C]//Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Seattle:ACM,1999:263-270.
- [4] Crawley E, Nair R, Rajagopalan B, et al. A framework for QoS-based routing in the internet[EB/OL]. [1998-08-28]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc.2386.txt>.
- [5] 李爱国, 覃征. 粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(21):1.
- LI Aiguo, TAN Zheng. Particle swarm optimization[J]. Computer Engineering and Application, 2002, 38(21):1.
- [6] 许福永, 梅中磊. 基于现代超启发式搜索方法的计算机通信网中路由选择优化的研究[J]. 兰州大学学报, 2001, 37(2):63.
- XU Fuyong, MEI Zhonglei. Routing optimization in computer communication network based on modern ultra heuristic searching method[J]. Journal of Lanzhou University, 2001, 37(2):63.
- [7] Eberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization[C]//Proc of the IEEE Int Conf on Neural Networks. Piscataway: IEEE Service Center, 1995:1942-1948.

(上接第 1835 页)

Fourier 变换所需要的时频转换函数;进一步通过 Fourier 变换可以将电源主成份转换成新的时频域的恒频成分,可以突出故障特征. 仿真结果表明,该方法效果良好. 由于仿真是在理想环境下实施的,实际的变频器输出电压和电流谐波成分复杂,且运行方式多样,需要提取其主分量并经过识别以确定运行模式. 故故障特征及其量化指标等还有待进一步深入研究.

参考文献:

- [1] Benbouzid M E H. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4):1065.
- [2] Cruz S M A, Cardoso A J M. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by Extended Park's Vector approach[J]. Electric Machines and Power Systems, 2000, 28(4):289.
- [3] 侯新国, 吴正国, 夏立. 基于 Park 矢量模平方函数的异步电动机转子故障检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9):137.
- HOU Xinguo, WU Zhengguo, XIA Li. A method for detecting rotor faults in asynchronous motors based on the square of the Park's vector modulus[J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23(9):137.
- [4] 邱阿瑞. 提取感应电动机转子故障特征的新方法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 1997, 37(1):35.
- QIU Arui. New approach of extracting rotor fault feature in induction motors[J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science, 1997, 37(1):35.
- [5] LIU Zhenxing, ZHANG Xianglong, YIN Xianggen, et al. Rotor cage fault diagnosis in induction motors based on spectral analysis of current Hilbert modulus[C]//2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Denver: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2004:1500-1503.
- [6] 黄进, 牛发亮, 杨家强. 基于双 PQ 变换的感应电机转子故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13):135.
- HUANG Jin, NIU Faliang, YANG Jiaqiang. Rotor faults diagnosis for induction motors based on the double PQ transformation[J]. Proceeding of the CSEE, 2006, 26(13):135.
- [7] 黄进, 牛发亮, 杨家强. 考虑负荷及惯量影响的感应电机转子故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14):120.
- HUANG Jin, NIU Faliang, YANG Jiaqiang. Rotor faults diagnosis for induction motors considering effects of the load and inertia[J]. Proceeding of the CSEE, 2006, 26(14):120.
- [8] Huang N E, Shen Z. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for non-linear non-stationary time series analysis[C]//Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. London: The Royal Society Press, 1998:903-995.
- [9] 杨宇, 程军圣, 于德介. 广义解调时频分析方法中的若干问题探讨[J]. 振动与冲击, 2008, 27(2):19.
- YANG Yu, CHENG Junsheng, YU Dejie. Study on some problems in the generalized demodulation time-frequency analysis method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(2):19.