

基于改进量子行为粒子群优化的无线传感器网络 QoS 路由算法

潘 果 徐雨明

(湖南大学信息科学与工程学院 长沙 410082)

摘 要 为了进一步减少无线传感器网络的能量损耗和延迟时间并且有效延长节点生存时间,提出一种改进的量子行为粒子群(quantum based particle swarm optimization, QPSO)优化算法,并将其用于解决无线传感器网络的 QoS 组播路由问题。该算法采用适应度函数和全局最好位置的更新方法来寻找无线传感器网络中满足阈值限制下的最优路由。实验仿真和对比情况表明,该算法在节省能量损耗、控制延迟时间和延长网络节点的生存时间上取得了较好的效果。

关键词 无线传感器网络, QoS 路由改进 QPSO, 适应度函数

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.07.040

Wireless Sensor Networks QoS Routing Algorithm Based on Improved Quantum-behaved Particle Swarm Optimization

PAN Guo XU Yu-ming

(College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract For further reducing energy consumption and delay time and prolonging the survival time of node in wireless sensor networks, an improved Quantum-behaved Particle Swarm Optimization algorithm was proposed, which is applied to QoS multicast routing problem in wireless sensor networks. The algorithm finds the optimal routing which meets the threshold limit by using the fitness function and global best position update method in wireless sensor networks. The comparison of simulation experiment shows that this algorithm achieves good results in saving energy consumption, controlling delay time and prolonging the survival time of the network node.

Keywords Wireless sensor networks, QoS routing improved QPSO, Fitness function

随着无线传感器网络在工业、农业、军工等行业的广泛应用,有关无线传感器网络的服务质量(Quality of Service, QoS)问题也越来越受到国内外学者的关注。通过 QoS 路由协议,可以改善无线传感器网络的能量利用效率,提高数据传输的可靠性,延长网络的生命周期等^[1]。Mohammad Java Rostami^[2]等人提出一种最大共享风险链路组(SRLG)的分离路由算法,算法基于蚁群优化的方法,搜索 SRLG 中源节点到目的节点之间平均带宽最大、能量消耗最小的链路,从而提高网络的生命周期。岳林等人^[3]提出一种无线传感器网络机会路由,该路由可以实现能量平衡并提供 QoS 保障,通过无线传感器节点的机会转发特征来建立优化模型,并通过多目标粒子群自适应转发的方法来提高能量效率,有效延长网络的生命周期。

粒子群算法(PSO, Particle Swarm Optimization)的思路来源于对鸟类群体行为的研究,是一种初始化一组随机值,再通过迭代来搜索最优解的智能算法^[4,5]。PSO 算法自提出以来,由于在解空间的搜索上有着控制参数少、实现简单、计算方便等特点,因此受到了国内外很多学者的关注,但它也存在着一些缺陷,例如收敛速度慢、容易陷入局部最优解等^[6],因

此在对 PSO 算法性能进行改进方面,学术界开展了较多的研究工作。基于粒子群算法(PSO)无法保证全局收敛等问题^[7],Sun Jun 等人^[8,9]利用量子力学中的相关理论,提出了基于势阱模型的量子行为粒子群优化算法(QDPSO)并对其加以完善,针对该算法的波函数特征长度等重要参数,通过基于全局水平的一种波函数参数控制方法,设计出一种新的粒子群算法:量子行为粒子群优化算法(QPSO)。QPSO 算法作为一种随机优化算法,在搜索能力、收敛速度以及解的精度等方面都体现了较好的性能,目前也有许多针对该算法的优化研究,例如对群体多样性信息进行改良的研究、在控制参数选取上的优化方案等。QPSO 多年来也被广泛应用于多个领域,例如函数优化、系统辨识、生物信息、图像处理、电力系统、机器人轨迹跟踪等。

基于量子行为粒子群算法(QPSO)在函数优化问题上的有效性,本文通过结合 QPSO 算法并进行相应改进,使算法能够充分利用平均最好位置的有效信息,更好地提高算法的收敛性能,并通过研究无线传感器网络的 QoS 组播路由问题,将问题转换为一个 N 维的最优规划问题,利用改进的 QPSO 方法进行解决。通过与两种解决无线传感器网络 QoS

到稿日期:2013-12-27 返修日期:2014-03-26 本文受湖南省教育厅资助项目(08D092)资助。

潘 果(1976—),女,博士,副教授,主要研究领域为并行计算、大数据等;徐雨明(1966—),男,博士,副教授,主要研究领域为并行计算、大数据、网络等。

路由问题的算法进行相同条件下的仿真实验并对分析数据结果,来评估本文算法的性能。

1 相关工作

自 QPSO 算法提出以来,算法性能改进和算法应用逐渐受到关注。黄泽霞等人^[10]为了改善 QPSO 算法的收敛速度和收敛早熟现象,提出一种惯性自适应调整的量子行为粒子群算法(DCWQPSO),算法引入了粒子聚集度以及进化速度因子,通过因子来调整惯性权值,从而改善 QPSO 算法的性能。王兆宇等人^[11]针对动态电网的优化自愈问题,提出一种结合 QPSO 和 BPSO(binary PSO, BPSO)的优化算法,通过算法来对分布式的发电单元的网络架构进行优化,使动态电网在出现故障时能够实施自愈方案,加快电网的重构自愈。陈伟等人^[12]为提高 QPSO 算法在全局收敛问题上的性能,提出一种完全学习策略,通过改变 QPSO 吸引子的更新方法来保证种群多样性,起到防止群体过早收敛的作用。Maolong Xi 等人^[13]根据粒子的适应值与加权最好平均位置提出一种改进的量子粒子群优化算法,称为加权 QPSO(WQPSO),算法可以达到全局搜索和局部搜索之间良好的平衡关系,并加快局部收敛速度。Wei Fang 等人^[14]采用全局优化的方法,设计了一种突变量子粒子群(MuQPSO)来优化自适应无限脉冲响应滤波器, MuQPSO 通过在 QPSO 中使用一个随机向量来增加 QPSO 算法的随机性,提高全局搜索能力。

2 QPSO 算法

假设在一个 M 维搜索空间中,代表 n 个问题解的粒子组成一个群体: $Y(t) = \{Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), \dots, Y_n(t)\}$, t 代表时刻。第 i 个粒子的位置为:

$$Y_i(t) = [Y_{i,1}(t), Y_{i,2}(t), \dots, Y_{i,M}(t)] (i=1, \dots, n)$$

个体最好位置为:

$$P_i(t) = [P_{i,1}(t), P_{i,2}(t), \dots, P_{i,M}(t)]$$

群体最好位置为:

$$G(t) = [G_1(t), G_2(t), \dots, G_M(t)]$$

且 $G(t) = P_j(t)$, 其中 j 表示处于全局最好位置的粒子的下标。

对于求解最小化值的优化函数,目标函数越小,粒子的适应值越好,在 QPSO 算法中粒子 i 的个体最好位置由下式表示:

$$P_i(t) = \begin{cases} Y_i(t), & \text{when } f(Y_i(t)) < f(P_i(t-1)) \\ P_i(t-1), & \text{when } f(Y_i(t)) > f(P_i(t-1)) \end{cases}$$

QPSO 算法中的群体全局最好位置则为:

$$G(t) = P_j(t) \quad (1)$$

其中, $j = \arg \min_{1 \leq i \leq n} \{f(P_i(t))\}$ 。

在算法的每一次迭代中,将每一个粒子的当前位置的适应值与全局最好位置的适应值进行对比,当前者较好时,全局最好位置开始更新。适应值方程为:

$$g_{i,k}(t) = \rho_i(t) \cdot P_{i,k}(t) + (1 - \rho_i(t)) \cdot G_k(t) \quad (2)$$

$\rho_i(t)$ 的取值在 0 至 1 之间。粒子的更新方程为:

$$Y_{i,k}(t+1) = g_{i,k}(t) \pm \lambda | \overline{P_j(t)} - Y_{i,k}(t) | \cdot \ln(1/u_{i,k}(t)) \quad (3)$$

其中, $u_{i,k}(t) \in (0, 1)$, $\lambda \in (0.5, 1)$ 。 $\overline{P_j(t)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{i,k}(t)$, 表示粒子个体最好位置的平均值。

3 改进的量子行为粒子群

在 QPSO 算法中,通过将每一个粒子当前位置的适应值与全局最好位置适应值进行对比,来进行全局最好位置的更新,这虽然能保证最终所得结果为函数的最优解,但可能会有粒子过早收敛。为了提高量子行为粒子群的收敛性能,在粒子适应值的计算公式中,将不再采用式(2),而是通过将“平均最好位置” $\overline{p_j(t)}$ 引入到适应值的计算公式中,来计算个体最好位置、全局最好位置与 $\overline{p_j(t)}$ 之差,并通过权值来最终决定适应值的大小,表示公式为:

$$g_{i,k}(t) = \sigma_1 | P_i(t) - \overline{P_j(t)} | + \sigma_2 | G_k(t) - \overline{P_j(t)} | \quad (4)$$

式中, σ_1, σ_2 表示权值, $0 < \sigma_1 + \sigma_2 < 1$ 。采用以上方法计算粒子适应值,能够充分利用种群中所有粒子平均最优位置提供的有用信息。具体的算法步骤如下:

Step1 首先初始化粒子位置,得到粒子的当前位置 $Y_i(t)$ 以及个体最好位置 $P_i(t)$ 。

Step2 计算粒子的目标函数值 $f(Y_i(t))$, 并与个体最好位置的目标函数值 $f(P_i(t))$ 进行比较,如果前者较小,则赋值为 $P_i(t) = Y_i(t)$ 。

Step3 得到全局最好位置,通过式(1)求得。

Step4 用式(4)求每一个粒子的适应值,并更新全局最好位置。

Step5 通过式(3)得到粒子更新后的位置。

Step6 重复 Step2—Step5,当到达给定的迭代次数或者满足函数求解的要求时终止。

4 QoS 路由算法

用一个加权有向图 $G = (O, E)$ 来表示一个无线传感器网络模型, $O = \{o_1, \dots, o_n\}$ 表示传感器节点, $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ 表示源节点与目的节点之间的链路。 $|O|, |E|$ 分别表示节点数目和链路数目。用 $S \in O$ 表示一个组播树的起始节点集合,用 $D \in O - S$ 表示该组播树的终止节点集合。对于链路,定义多个评价路由服务质量的度量:延迟 $delay(e)$ 、带宽(Bandwidth) $B(e)$ 、能量损耗 $loss(e)$;对于节点,定义多个评价路由质量的度量:延迟 $delay(o)$ 、丢包率 $Pl(o)$ 、剩余能量 $R(o)$;用 $W(S, D)$ 表示组播树,可以得到如下关系:

$$delay(W(S, D)) = \sum_{e \in W(S, D)} delay(e) + \sum_{o \in W(S, D)} delay(o) \quad (5)$$

$$B(W(S, D)) = \sum_{e \in W(S, D)} B(e) \quad (6)$$

$$loss(W(S, D)) = \sum_{e \in W(S, D)} loss(e) \quad (7)$$

$$Pl(W(S, D)) = \sum_{o \in W(S, D)} Pl(o) \quad (8)$$

$$R(W(S, D)) = \sum_{o \in W(S, D)} R(o) \quad (9)$$

组播路由问题是一个 NPC(NP-complete)问题,可以用一个满足限制条件的组播树来代表路由的服务质量要求,定义路由的延迟阈值为 T_D ,带宽阈值为 T_B ,能量损耗阈值为 T_{loss} ,丢包率和剩余能量阈值分别为 T_{Pl}, T_R 。则求解最佳

QoS路由的限制条件为:

$$\begin{cases} delay(W(S,D)) \leq T_D \\ B(W(S,D)) \geq T_B \\ loss(W(S,D)) \leq T_{loss} \\ Pl(W(S,D)) \leq T_{Pl} \\ R(W(S,D)) \geq T_R \end{cases}$$

利用上述提到的改进量子行为粒子群方法来解决 QoS 组播路由问题,定义组播树的终止节点的个数为 $|N|$,到终止节点 i 有 $m_i (i \in |N|)$ 条链路,设其中的链路 $l_i \in m_i$ 为到终止节点的最优链路,则可以得到一个 N 维整数向量 $(l_1, \dots, l_{|N|})$ 来表示个体最好位置,这样可以将 QoS 路由问题转化为求一个 N 维的最优规划问题。采用改进量子行为粒子群方法,可以得到如下适应度函数:

$$f(x) = \sigma_1 f(delay) + \sigma_2 f(B) + \sigma_3 (f(loss) - f(R)) + \sigma_4 f(Pl) \quad (10)$$

其中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 4 个值是归一化系数,取值范围都在 $(0, 1)$ 之间。而 $f(delay), f(B), f(loss), f(R), f(Pl)$ 的计算公式为:

$$\begin{cases} f(delay) = \sum_{i \in N} U(delay(W(S,D)) - T_D) \\ f(B) = \sum_{i \in N} U(T_B - B(W(S,D))) \\ f(loss) = \sum_{i \in N} U(loss(W(S,D)) - T_{loss}) \\ f(Pl) = \sum_{i \in N} U(Pl(W(S,D)) - T_{Pl}) \\ f(R) = \sum_{i \in N} U(T_R - R(W(S,D))) \end{cases}$$

其中, $U(\cdot)$ 表示罚函数。整个路由算法的步骤为:

- Step1 初始化节点和链路信息。
- Step2 根据式(10)计算路由的适应值。
- Step3 通过式(1)求得全局最好位置。
- Step4 更新平均最好位置,即路由中代表服务质量要求的阈值。
- Step5 通过式(3)更新个体最好位置和全局最好位置。
- Step6 重复 Step2—Step5,直到满足收敛条件或者达到迭代次数。

5 实验仿真与分析

对于本文提出的无线传感器网络 QoS 路由算法,在实验中仿真工具采用 NS2,仿真配置的网络节点有 100 个,随机位于一个 $100m \times 100m$ 的正方形区域中,所有节点的发射功率、初始能量都相同,模拟的仿真时间为 600s。在仿真过程中所有节点都是固定的,且目的地节点位于该场景中心,每个数据包大小为 100 字节。实验的对比组为文献[2]中 Mohammad Java Rostami 提出的一种最大共享风险链路组(SRLG)的分离路由算法,以及文献[3]中岳林提出的无线传感器网络机会路由。

图 1 为仿真时间在 300s 内的网络延迟对比情况,从图中可以看出,在无线传感网络 QoS 路由算法中引入改进量子行为粒子群优化的方法,在控制延迟时间上起到了较好的效果。其中,本文算法的平均延时时间为 48.2ms,文献[2,3]的平均延时时间分别为 52ms、53.9ms,本文算法相比两种对比算法平均延时时间分别缩短了 3.7ms、5.7ms。

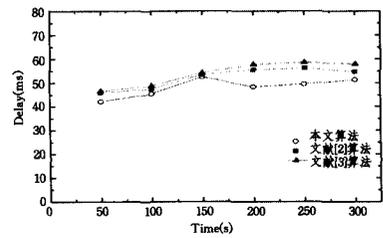


图 1 网络延迟情况

图 2 为仿真过程中的网络能量消耗总量情况,由于基于改进量子行为粒子群的方法在路由的选择中考虑了链路的能量损耗问题,因此最后得到的全局最优链路可以有效地减少网络的能量损耗。从图 2 的对比情况可以看出,本文算法的网络总能耗情况较好,相比文献[2,3]可以更好地节省能量损耗。当实验结束(仿真时间 600s)时,本文算法的能量总损耗为 122.4J,文献[2,3]算法的能量总损耗分别为 153.6J、163J,相比之下,本文算法的能量总损耗分别为文献[2,3]的 79.7%、75.1%。

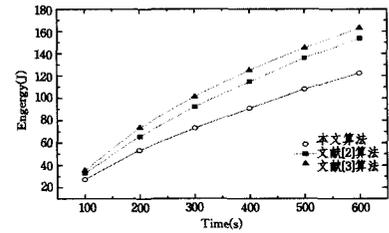


图 2 网络总能耗情况

图 3 示出在相同的仿真条件下,逐渐增加网络节点时,网络节点的生存时间,即网络中第一个节点的死亡时间,其中横坐标表示节点个数,纵坐标表示时间。从图中可以看出,本文算法的节点生存时间大概在 220s 至 240s 之间波动,文献[2]算法的节点生存时间大概在 200s 至 220s 之间波动,而文献[3]算法则处在 160s 至 180s 之间。从比较情况来看,本文算法的节点生存时间较长,可以有效地延长网络的生命周期。

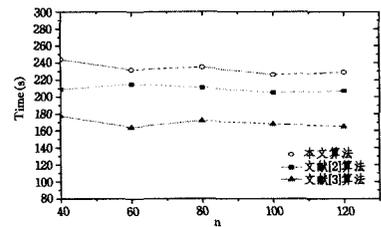


图 3 网络节点的生存时间

结束语 基于量子行为粒子群优化算法在全局搜索、收敛速度和函数优化等方面的有效性,针对无线传感器网络的 QoS 组播路由问题,提出一种改进量子行为粒子群的 QoS 路由算法,该算法改进了适应度函数的计算方法,提高了量子行为粒子群的收敛性,在组播路由问题上也充分考虑了能量损耗、延迟时间、带宽等。从仿真实验结果可以看出,本文算法在能量损耗、延迟时间的优化上都能取得较好效果,并且能够进一步延长网络节点的生存周期。

参考文献

- [1] 刘敏,徐世军,孙思毅,等. 基于 QoS-PSO 的无线传感器网络路

- 由方法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(12): 1846-1850
- [2] Rostami M J, Emrani Zarandi A A, Hoseininasab S M. MSDP with ACO: A maximal SRLG disjoint routing algorithm based on ant colony optimization[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35(1): 394-402
- [3] 岳林, 易本顺, 肖进胜. 能量平衡与 QoS 保障的无线传感器网络机会路由[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2011, 38(11): 82-87
- [4] 李擎, 张超, 陈鹏, 等. 一种基于粒子群参数优化的改进蚁群算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(6): 874-884
- [5] 刘衍民. 一种求解约束优化问题的混合粒子群算法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2013(2): 242-246
- [6] 胥小波, 郑康锋, 李丹, 等. 新的混沌粒子群优化算法[J]. 通信学报, 2012, 33(1): 24-37
- [7] 万智萍, 吕志民. 一种自适应物种寻优的无线 Mesh 网络 QoS 路由算法[J]. 山东大学学报:理学版, 2013, 48(9): 10-16
- [8] Sun J, Feng B, Xu W. Particle swarm optimization with particles having quantum behavior[C]//Congress on Evolutionary Computation, 2004(CEC2004). IEEE, 2004, 1: 325-331
- [9] Sun J, Xu W, Feng B. A global search strategy of quantum-behaved particle swarm optimization[C]//2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. IEEE, 2004, 1: 111-116
- [10] 黄泽霞, 俞攸红, 黄德才. 惯性权自适应调整的量子粒子群优化算法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(2): 228-232
- [11] 王兆宇, 艾芊. 基于 QPSO 与 BPSO 算法的动态微电网多目标优化自愈[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 23-29
- [12] 陈伟, 周颀, 孙俊, 等. 一种采用完全学习策略的量子行为粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(5): 719-730
- [13] Xi M, Sun J, Xu W. An improved quantum-behaved particle swarm optimization algorithm with weighted mean best position[J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 205(2): 751-759
- [14] Wei F, Jun S, Wenbo X. A new mutated quantum-behaved particle swarm optimizer for digital IIR filter design[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2009, 10(2): 1-7
- [15] 彭小峰, 杨川, 王凯立. 采用喷泉码的无线传感器网络数据编解码算法[J]. 重庆工学院学报:自然科学版, 2013, 27(11): 69-73

(上接第 175 页)

结束语 本文提出了一种基于虚拟队列的启发式区分服务路由协议 VSDR。协议通过一个基于聚合权重的路由函数, 将数据包向 sink 的前进距离、下游节点的队列长度以及下游节点的剩余能量考虑在内, 选择聚合权重最大的节点作为转发节点。权重参数随着节点的地理位置以及下游节点队列长度和剩余能量的方差的变化而变化, 从而更好地适应动态的网络环境。VSDR 通过虚拟队列机制, 优先服务实时数据包, 使得实时数据包更快地到达 sink。通过为数据包提供要求的前进速度来保证时延, 并通过在数据包中添加冗余码来达到可靠性要求。通过一系列仿真实验, 对其性能进行全面分析和评价。实验结果表明, VSDR 能很好地保证实际应用的 QoS 要求, 并在此基础上为不同类型的数据包提供区分服务, 同时均衡了节点能耗, 延长了网络生命周期。

参 考 文 献

- [1] Chong C Y, Kumar S P. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(8): 1247-1256
- [2] Waharte S, Boutaba R, Iraqi Y, et al. Routing protocols in wireless mesh networks: Challenges and design considerations[J]. Multimedia Tools and Application, 2006, 29(3): 285-303
- [3] Karkvandi H R, Pecht E, Yadid-Pecht O. Effective Lifetime-Aware Routing in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(12): 3359-3367
- [4] 马华东, 陶丹. 多媒体传感器网络及其研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(9): 2013-2028
- [5] Wei Y, Heidemann J, Estrin D. An energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]//Proceedings of 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies(INFOCOM). June 2002: 1567-1576
- [6] Wang He-ping, Zhang Xiao-bo, Nait-Abdesselam F, et al. Cross-Layer Optimized MAC to Support Multihop QoS Routing for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(5): 2556-2563
- [7] Ehsan S, Hamdaoui B. A Survey on Energy-Efficient Routing Techniques with QoS Assurances for Wireless Multimedia Sensor Networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(2): 265-278
- [8] He T, Stankovic J, Lu C, et al. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks[C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems(ICDCS). May 2003: 46-55
- [9] Felemban E, Lee C-G, Ekici E. MMSPEED: Multipath multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6): 738-754
- [10] Akkaya K, Younis M. An Energy-Aware QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of IEEE Workshop on Mobile and Wireless Networks (MWN2003). Providence, Rhode Island, May 2003
- [11] Chipara O, He Z, Xing G, et al. Real-time power-aware routing in sensor networks[C]//Proceedings of the 14th IEEE International Workshop on Quality of Service. New Haven, CT: IEEE Press, 2006: 83-92
- [12] Or-Rashid M M, Razzaque M A, Alam M M, et al. Multi-Constrained QoS Geographic Routing for Heterogeneous Traffic in Sensor Networks [J]. Inst. of Electronics, Information and Comm. Engineers Trans. Comm., 2010, 91(8): 2589-2601
- [13] Djenouri D, Balasingham I. Traffic-differentiation-based Modular qos localized routing for wireless sensor networks [J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2011, 10(6): 797-809
- [14] Woo A, Culler D. Evaluation of Efficient Link Reliability Estimators for Low-Power Wireless Networks[R]. Technical Report, Univ. of California, 2003
- [15] Dai R, Wang P, Akyildiz I F. Correlation-Aware QoS routing for wireless video sensor networks[C]//Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conf. on Globecom (GLOBECOM 2010). Miami: IEEE, 2010: 1-5