

基于分布式层次化结构的非均匀聚类负载均衡算法

郭晋秦^{1*}, 韩 焱²

(1. 太原工业学院 自动化系, 太原 030008; 2. 电子测试技术国家重点实验室(中北大学), 太原 030051)

(*通信作者电子邮箱 jinjin_guo@126.com)

摘要:考虑到无线传感器网络(WSN)负载不均衡导致节点存活时间较短、能量消耗量较多的问题,提出一种基于分布式层次化结构的非均匀聚类负载均衡算法(DCWSN)。首先,建立了一个WSN的多层分簇的网络拓扑结构,并分析了该网络拓扑的簇内节点运作的能量消耗方式。接着,采用非均匀聚类的负载均衡算法,在簇头的选择上考虑了节点连通密度、节点剩余能量和簇头选择时间,通过竞选出最高权重的节点成为簇头;在簇的建立阶段,通过簇大小的决定阈值和簇头的更新机制来均衡簇头的能量负载,防止簇头节点过早死亡。通过网络生命周期和网络能量消耗对提出算法的有效性进行验证,并与算法 EDDIE、M-TRAC、DDC 和 EELBC 进行比较,结果显示 DCWSN 算法的节点存活率为 37.7%,高于对比算法,且能量效率也高于对比算法。实验结果表明,DCWSN 算法对节点负载分配具有良好的均衡性,有效控制了节点负载过量的问题,提高了节点的能量效率。

关键词:分布式;层次化结构;非均衡聚类;负载均衡;无线传感器网络

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Load balancing algorithm for non-uniform clustering with distributed hierarchical structure

GUO Jinjin^{1*}, HAN Yan²

(1. Department of Automation, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan Shanxi 030008, China;

2. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology (North University of China), Taiyuan Shanxi 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems such as short survival time and great energy consumption caused by load imbalance in Wireless Sensor Network (WSN), a kind of load balancing algorithm for non-uniform clustering with distributed hierarchical structure named DCWSN was proposed. First, the network topology structure with multilayer clusters for WSN was established, and the energy consumption mode of the nodes in the clusters of it was analyzed. Second, the load balancing algorithm for non-uniform clustering was used to choose the node with highest weight to be cluster head node with considering the node connected density, node residual energy and cluster head choose time. In the establishment of the cluster stage, the energy load of the cluster head was balanced by cluster size decision threshold and the cluster updating mechanism to prevent the premature death of cluster nodes. Comparison experiments on life cycle of the network and the network energy consumption were conducted with EDDIE, M-TRAC, DDC and EELBC to verify the effectiveness of the proposed algorithm, and DCWSN achieved a higher survival rate of node at 37.7% and a higher energy efficiency. The experimental results show that DCWSN has good performance in load balance, effectively controls the overload of node, and also improves the energy efficiency of node.

Key words: distribution; hierarchical structure; non-equilibrium clustering; load balancing; Wireless Sensor Network (WSN)

0 引言

低成本、体积小的智能传感器的开发以及通信技术的发展促进了无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的发展,到目前为止,WSN的应用领域越来越广,在目标跟踪、入侵检测、环境监测、智能交通等方面都发挥了重要的作用^[1-2]。在WSN中,网络节点的能量通常是有限的,因此,在拓扑控制中有效利用能量是必须的。同时,由于WSN中有大量节点,节点只能得到网络拓扑信息的一部分^[3-4]。因此,需要一种聚类算法,使节点能够在利用本地网络局部信息的基础上选择适当的子簇,不仅能通过子簇来起到转发数据的作用,

还能够有效地节约能量。

WSN的拓扑结构往往因为多种原因而发生动态变化,包括传感器节点出现电池耗尽的故障、环境因素的影响,以及节点位置变动等^[5-6]。由于能量的限制,传感器节点可以直接与其他传感器在有限的距离内进行通信,并形成是一个多跳通信网络^[7-8]。本文采用聚类算法形成一个层次化网络拓扑,实现WSN的数据汇总及能量管理,有利于网络的分布式控制。此外,通过分簇的方法,不仅节约了能量,而且减少了网络节点之间的竞争。

Javadi等^[9]提出一种异构WSN的分布式增强型节能分簇算法 EDDIE,该算法基于动态变化和更高的能量效率来选

收稿日期:2014-09-01;修回日期:2014-11-23。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61071193;60772102)。

作者简介:郭晋秦(1975-),女,山西运城人,副教授,硕士,主要研究方向:通信与控制工程、测试计量;韩焱(1957-),男,山西文水人,教授,博士生导师,主要研究方向:电子信息工程、信息对抗与信息安全、数字图像处理。

择簇头,实现异构 WSN 的分布式能量高效聚类;Shivaprakasha 等^[10]提出采用多阈值适应范围集群(Multi-Threshold Adaptation Cluster, M-TRAC)算法的能量平衡 WSN,该算法采用了可变门限的集中式网络管理,以确保节点之间的均匀负载分配,从而延长了网络的生命周期;Din 等^[11]提出了基于多层网络拓扑结构的 WSN 聚类算法 MAP,该算法对于一级和二级簇头的选取是算法的重要实体,通过辅助簇头的选择,实现 WSN 的多层次聚类;邓夏阳等^[12]提出一种 LEACH 算法最优数据方案,首先建立了该算法的通信模型,得出了在簇形成阶段和数据采集阶段网络节点的能量消耗,在理论上推导出了最优化的数据采集方案,提高了能量利用效率;王俊等^[13]提出一种基于粒子群优化聚类的温室 WSN 节能方法,针对温室 WSN 中节点感知数据的特点,同时考虑节点续航能力有限的因素,该系统能够极大地减少每轮中的工作节点,压缩发送的数据量,降低能耗。

假定传感器节点的剩余能量遵循随机分布的原则,在节点距离以及节点密度、节点剩余能量的基础上,本文提出了一种负载均衡的聚类算法 DCWSN,以构建更平衡的集群结构,延长网络的生命周期。

1 网络的系统模型

假设 WSN 可以建模为一个无向图 $G = (V, E)$, 其中: V 表示节点集合, E 表示节点链路集合。如果两个节点是在彼此的传输范围内,则两个节点之间有链路,本文所讨论的多跳 WSN 具有非均匀分布的特性,且每个节点分配了唯一标识符^[14-15]。本文的 WSN 节点未配备 GPS 设备并且不能定位,所有节点构成自组织网络的拓扑结构,以及在相同的频率下节点传送的数据具有相同的信号强度,且具有相同的最大距离 L 。算法的刷新时间由节点状态的切换所限制,在一定的周期内每个传感器节点的位置是固定的^[16],所有的传感器都按照泊松过程的强度 η 来分布。

在本文使用的无线电模型中,经过距离 d 发射一个 l 位的消息的功率消耗为:

$$E_{TX}(l, d) = \begin{cases} lE_c + l\varepsilon_1 d^2, & d < d_0 \\ lE_c + l\varepsilon_2 d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: l 表示发送的二进制位数; d 表示发射距离; E_c 表示射频能耗系数,其大小取决于数字编码、调制、滤波和信号的扩频等; ε_1 、 ε_2 的值表示不同信道传播模型下的功率放大电路能耗系数,其大小取决于接收器的距离及可接受的误码率。

节点接收一个 l 位的消息的功率消耗为:

$$E_{RX}(l) = lE_c \quad (2)$$

聚类算法一般应用在 WSN 中都是假设节点均匀分布,不考虑基站的距离。然而,在实际应用的 WSN 中,这些节点通常是随机排列的。在这种情况下,如果聚类算法没有考虑节点的分布,使用统一的聚类策略可能导致不平衡的拓扑结构,并且有些节点会因为能量消耗过多而过早死亡。DCWSN 算法的目的便是通过每个簇的能量消耗达到一种均衡状态,避免产生过多簇而使总体能量消耗过大。基于这些问题,DCWSN 算法考虑了节点的连通密度以及节点的位置,建立了一个能量更加平衡的簇分层架构。在图 1 中显示了本文 WSN 系统模型的分层架构,根据簇头与汇聚节点距离的大小

将无线网络场景分为了 k 个层,越靠近汇聚节点的层,则该层上的簇的竞争半径就越小。该分层结构基于节点的连通密度和与基站的距离来计算 k 。聚类半径由节点密度和距离来确定:如果两个簇具有相同的连通密度,距离基站越远的簇就具有越大的竞争半径;如果两个簇与基站的距离相同,则连通密度越高的簇的竞争半径越小。

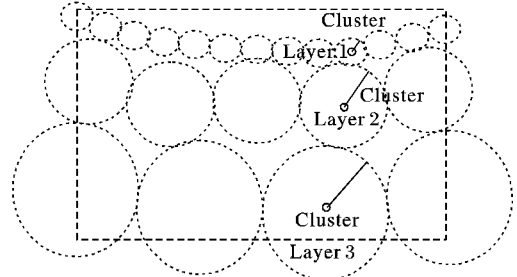


图1 传感器节点分布的分层结构

2 非均匀聚类的负载均衡算法

DCWSN 算法为了实现 WSN 的能量均衡,在算法中共进行了三个阶段,分别为簇头的选择阶段、簇的建立阶段和周期循环阶段。

2.1 簇头的选择阶段

DCWSN 首先随机选择节点来进行第一步,然后触发节点 $i(i \in V)$ 计算其连通密度,通过与基站的距离来确定簇半径 r_i ,并成为临时簇头。簇半径的计算公式如下:

$$r_i = \lambda_i F |d(i, s) / C_k(i)| \quad (3)$$

其中: $d(i, s)$ 表示触发节点 i 与基站的距离, $C_k(i)$ 表示节点 i 的连通密度, $F|\cdot|$ 表示一个取整函数, λ_i 表示距离参数。

λ_i 计算公式如下:

$$\lambda_i = \lceil d(i, s) / d_{\min} \rceil \times \lceil d_{\max} / d(i, s) \rceil \quad (4)$$

其中 d_{\min} 、 d_{\max} 分别表示网络节点到达基站的最近、最远距离。

$d(i, s)$ 的计算公式则为:

$$d(i, s) = 5 \exp[0.1(RSSI - D) / \exp(n)] \quad (5)$$

其中: $RSSI$ 表示接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication),而 D 表示与基站相距 1 m 时的信号强度, n 表示节点个数。

节点 i 的连通密度 $C_k(i)$ 为:

$$C_k(i) = \pi r_i^2 / N(i) \quad (6)$$

其中 $N(i)$ 表示在节点 i 的通信范围内的邻居节点数量:

$$N(i) = \{j | d(i, j) \leq r_i, j \neq i\} \quad (7)$$

在这个阶段,节点 i 及其邻居节点中权值越大的节点有越大的概率当选簇头,其中权值的计算考虑了节点剩余能量、节点连通密度以及选择时间。这样生成簇,可以使得节点的能量和位置更加均衡。以节点 i 为例,权值的计算公式为:

$$\sigma(i) = \alpha C_k(i) + \beta E_r(i) / E_s(i) + \varepsilon(t_o / t_i) \quad (8)$$

其中: α 表示节点连通密度的影响因子, $E_r(i)$ 表示节点 i 的剩余能量, $E_s(i)$ 表示节点 i 的初始能量, β 表示节点的能量因子, ε 表示选择时间的影响因子, t_o 表示最短的簇头选择时间, t_i 表示节点 i 的簇头竞争时间。

在初始阶段,节点触发聚类过程,并发送 Hello 消息至其邻居节点。邻居利用式(8)来计算相应的权重,然后竞选出最高权重的节点成为簇头。接着,簇头节点广播信息 Head_

message 给邻居节点宣称自己成为了簇头,并要求它们加入到簇中。Head_message 包括簇头节点的 ID、发送节点的 ID (DID) 以及跳数 m 。当节点接收到消息 Head_message 时,发送节点能够使用一条路径到达簇头。当邻居节点收到 Head_message,即使自己已经在簇中,只要该节点的权值低于簇头,它还能发送 Join_message 信息到簇头来请求加入新簇中。

2.2 簇头的建立阶段

考虑到簇内的节点数量越多、簇越大,将会导致簇头的能量开销过大,容易过早死亡,这样降低了网络的生命周期。因此 DSWSN 算法需要对簇大小设置一个阈值,当簇头节点接收到由其他节点所发送的 Join_message 信息,该簇头将通过与阈值的比较来决定是否接收该新成员,并更新簇内节点的计数,如果在假设加入了新成员后簇的大小大于阈值时,则簇头会拒绝该成员的加入,宣布聚类过程结束。

簇内节点数量的阈值可以通过下式获得:

$$N(i) = n \times r_i r_{\max}^{-1} \times \pi r_i^2 S^{-1} \quad (9)$$

其中: n 表示网络中总的节点数量, r_{\max} 表示最大的簇半径, S 表示无线网络的覆盖面积。

簇中的每个成员节点维护一个簇的信息表,保存了 ID、DID、 m 以及其他信息。如果一个节点接收到发送的工作包,它会相应地更新它的集群信息表。DSWSN 算法可以防止因簇头的固定性而引发的能量消耗问题,因为簇头担负着管理簇成员、数据融合、数据转发的责任,因此消耗的能量比其他节点要多,通过定期更换簇头可以平衡节点的能量消耗。簇头的更换由簇头的剩余能量决定,设置一个剩余能量阈值,当簇头的剩余能量低于该阈值时,簇头的更换工作便开始展开。

2.3 周期循环阶段

簇会稳定一段时间直到簇头更换工作的展开,簇头节点收集所有成员节点的权重,然后选择具有最高权重的节点作为下一个簇头。通过这种方式可以降低簇头更换过程中所产生的通信成本。因为下一个簇头的产生是通过原先的簇头以权值大小的方式决定,省去了广播消息等步骤。在每个簇中更换簇头的过程中整体平均的通信开销为:

$$E_B = \eta \times 4k(k-1)(k+1)/3e \quad (10)$$

其中: E_B 表示节点的每一跳平均能量消耗, k 表示簇内节点将数据发送给簇头的平均跳数。

算法中能量开销的计算复杂度为:

$$E_C + E_F + E_B = E_C + E_F + \eta \times 4(k-1)(k+1)/3e \sim O(k^3) \quad (11)$$

其中: E_C 表示算法广播消息所需要的能量开销, E_F 表示节点在进行发送、接收以及数据融合等反应所消耗的能量。

3 实验仿真及分析

3.1 仿真参数设置

为验证本文算法的有效性和优越性,将其与现有的 WSN 的聚类算法进行比。仿真实验采用 Matlab 7.0,传感器节点随机分布在一个 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的环境中,基站的位置坐标为区域中心 (50,50),节点数量为 100,初始能量为 2 J, Data packet header 为 4 000 b,数据包大小为 100 b,通信半径为 20 m, $\alpha = 0.3$, $\beta = 0.5$, $\varepsilon = 0.2$, $T = 0.2\text{ s}$ 。

实验过程中,与文献[9]中的 EDDIE 算法、文献[10]中的 M-TRAC 算法、文献[17]中的一种高能效自适应聚类的无

线传感器网络负载均衡算法(DDC),以及文献[18]中的无线传感器网络高效节能的负载均衡聚类算法(EELBC)进行对比。EDDIE 和 M-TRAC 这两个算法都是基于分簇的无线传感器网络节能算法;而算法 DDC 和 EELBC 与本文的研究思路则更为相近,都是研究分簇无线传感器网络能量优化的负载均衡算法。DDC 算法采用独立集的簇头选举机制来用于传感器节点的聚类,该选举机制是通过动态选择一个最佳的传感器作为集群中具有主导地位的传感器,然后将这些传感器组成一个独立组(IDS),只有 IDS 的成员被允许参加簇头选择;这种方法选举出来的簇头可以使得集群内汇聚数据时所消耗的能量达到最小,且簇头具有较大的剩余能量,因此可以实现负载均衡和高效的能量管理。EELBC 算法则根据簇头的剩余能量以及簇头与邻居节点、汇聚节点之间的距离进行讨论,采用 min-heap(最小二叉堆)原理为簇头分配传感器节点数量;这种方法可以考虑到簇头的能量负载情况,并防止簇内节点与簇头相隔太远而浪费较多的发射能耗,从而实现网络能量的高效利用。

3.2 网络生命周期

为了验证算法在延长网络生命周期上的性能,便于统一比较,存活时间是用轮数来表示,从簇头选择阶段至周期循环阶段为一轮。死亡节点所占总节点的百分比越少,说明该网络的生命周期越长。图2显示了在 800 至 2 600 轮这个过程中死亡节点占总节点的比率。从图中可以看出,DCWSN 算法 800 轮的占比为 6.5%,2 600 轮的占比为 62.3%,而 EDDIE 算法则分别为 8.3% 和 84%,M-TRAC 算法分别为 11.1% 和 88.9%。与采用了负载均衡方法的 DDC 和 EELBC 算法相比,EDDIE 算法和 M-TRAC 算法则更有效地控制了节点的死亡率,在 2 600 轮时节点死亡比率分别为 72.1% 和 71.2%,仍然高于本文提出的 DCWSN 算法。因此从数据上来看,M-TRAC 的节点死亡率最高,DCWSN、EDDIE、DDC 和 EELBC 算法都使用了聚类的方法,因此聚类在平衡网络能量上与其他能量均衡方法相比可以实现更好的效果,由于本文算法采用了网络能量分层的结构,并考虑了节点非均匀分布的问题,因此在延长网络生命周期上比 EDDIE 算法效果更好。

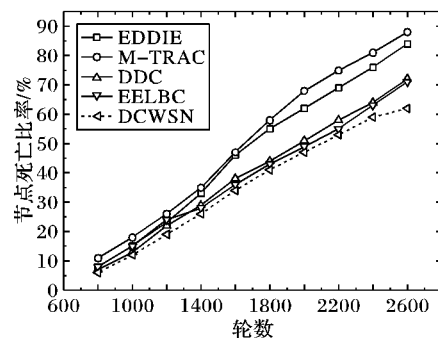


图2 死亡节点百分比

3.3 网络能量消耗情况

为了验证算法的节能效果,以算法运行的轮数为时间点,得到网络总体剩余能量情况以及节点的平均能量剩余情况。网络整体的能量情况可以反映算法整体上的节能效果,而节点的平均剩余能量可以反映算法在均衡节点能量、延长节点生命周期上的效果。

图3为从初始状态一直到 1 200 轮的过程中网络的整体剩余能量情况。从数据上看,各算法的初始能量都为 200 J,

当运行到 1 200 轮时,DCWSN 算法的剩余能量为 98 J,而 EDDIE 算法为 61 J,M-TRAC 算法为 73 J,DDC 和 EELBC 算法则分别为 84 J 和 79 J。DCWSN 算法比 EDDIE 算法、M-TRAC、DDC 和 EELBC 算法分别节省了 37 J、25 J、14 J 和 19 J 的能量,因此从整体的能量消耗情况来看,DCWSN 算法达到了更好的节能效果。

图 4 为节点从初始状态一直到 1 200 轮的过程中的平均剩余能量。节点的初始能量都为 2 J,五种算法在运行过程中节点的能量效果情况各不相同,其中:EDDIE 算法的节点剩余能量最少,在 1 200 轮时仅为 0.56 J;M-TRAC 算法次之,为 0.68 J;DDC 和 EELBC 算法则分别为 0.74 J 和 0.77 J;DCWSN 算法的节点剩余能量最高,为 0.99 J。DCWSN 算法的节点节能效果优于 EDDIE 和 M-TRAC 算法是因为采用了负载均衡的方法;而对于同样采用了负载均衡方法的 DDC 和 EELBC 算法,DCWSN 算法考虑到簇头的能量负载情况,通过能量阈值来决定簇头的更换周期,因此更有效地实现了节点能量负载均衡。

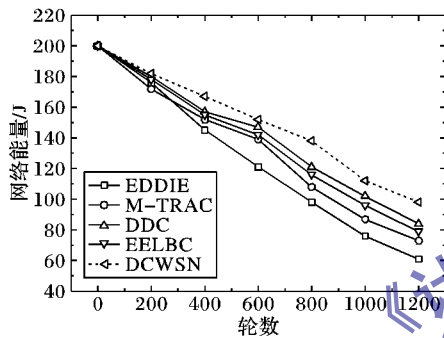


图3 网络剩余能量

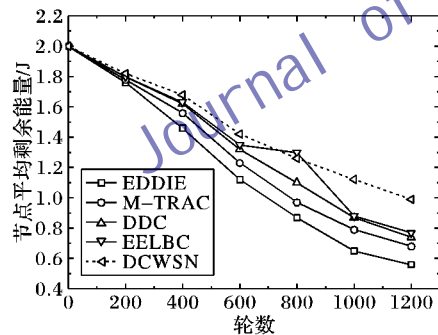


图4 节点平均剩余能量

4 结语

针对 WSN 负载不均衡引起节点过早死亡、网络能量效率降低等问题,本文提出了一种基于分布式层次化结构的非均匀聚类负载均衡算法 DCWSN。该算法有以下特点:建立了节点不均匀聚类的多层分簇的网络拓扑结构;考虑了节点剩余能量、节点连通密度以及选择时间来选择簇头,更有效地平衡节点负载;簇头的产生是通过原先的簇头以权值大小的方式决定,省去了广播消息等步骤,节省了通信能耗。实验从节点死亡比率、网络剩余能量、节点平均能耗三方面与 EDDIE、M-TRAC、DDC 和 EELBC 算法进行了对比分析,验证了 DCWSN 算法对节点负载分配具有良好的均衡性,有效控制了节点负载过量的问题,提高了节点的能量效率。

参考文献:

- [1] SHU Q, HU Q, ZHENG J, *et al.* A dependable Slepian-Wolf coding based clustering algorithm for data aggregation in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 2013 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2013: 1-6.
- [2] HACKMANN G, GUO W, YAN G, *et al.* Cyber-physical codesign of distributed structural health monitoring with wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(1): 63-72.
- [3] JAIN A, REDDY B V R. Optimal degree centrality based algorithm for cluster head selection in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences. Piscataway: IEEE, 2014: 1-6.
- [4] ZHANG S, ZHANG H, ZHANG S. Multi-hop routing algorithm for wireless sensor networks based on fixed cluster and energy-balance [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(8): 117-120. (张世伟, 张海涛, 张士杰. 基于固定分簇和能量均衡的无线传感器网络多跳路由算法[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(8): 117-120.)
- [5] MAO S, ZHAO C, ZHOU Z, *et al.* An improved fuzzy unequal clustering algorithm for wireless sensor network [J]. Mobile Networks and Applications, 2013, 18(2): 206-214.
- [6] BACCI H, YAZICI A. An energy aware fuzzy approach to unequal clustering in wireless sensor networks [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(4): 1741-1749.
- [7] TRIOATHI R K, SINGH Y N, VERMA N K. Clustering algorithm for non-uniformly distributed nodes in wireless sensor network [J]. Electronics Letters, 2013, 49(4): 299-300.
- [8] CHEN G, WANG Y. Optimization time synchronization in cross-layer service for WSNs [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3231-3238. (陈桂芬, 王义君. 无线传感器网络跨层服务优化时间同步机制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3231-3238.)
- [9] JAVAID N, QRRESHI T N, KHAN A H, *et al.* EDDEEC: Enhanced developed distributed energy-efficient clustering for heterogeneous wireless sensor networks [J]. Procedia Computer Science, 2013, 19: 914-919.
- [10] SHIVAPRAKASHA K S, KULKARNI M, JOSHI N. Improved network survivability using Multi-Threshold Adaptive Range Clustering (M-TRAC) algorithm for energy balancing in wireless sensor networks [J]. Journal of High Speed Networks, 2013, 19(2): 99-113.
- [11] DIN W I S W, YAHYA S, TAIB M N, *et al.* MAP: the new clustering algorithm based on multitier network topology to prolong the lifetime of wireless sensor network [C]// CSPA 2014: Proceedings of the IEEE 10th International Colloquium on Signal Processing & its Applications. Piscataway: IEEE, 2014: 173-177.
- [12] DENG X, HUANG J. Optimal data acquisition scheme about LEACH [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(1): 20-24. (邓夏阳, 黄杰. LEACH 算法最优数据采集方案[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(1): 20-24.)

UME策略的固定旋转角步长让种群每代向下一代进化时所面临的旋转状态都是一致的,也就是说,在背包问题中,某一Qubit在趋于0或1的过程中每一步走的长度都是固定。但是在AEM中,同样把问题细化到某一Qubit上时,Qubit向合理的方向进化所走的步数要远远少于固定脚步长时所用的步数;而且根据表2,当前状态越是有趋于一个0或1状态的趋势,选择的步长就越大。这也就解释了为什么在实际应用中,AQEA、MPQEA-AM要比QEA进化的收敛速度快得多。

对于多宇宙拓扑结构的并行模型,因为其在算法资源分配和运行时的并行控制,所以MPQEA-AM在时间效率上有明显的优势。理论上讲,主宇宙和从宇宙之间的移民通信可以非常有效地剔除适应度较差的个体,在保证宇宙内物种多样性的前提下对种群的进化能起到一定的积极作用,所以在背包问题中可以看到MPQEA-AM的收敛速度比AQEA快。

在进化代数较小的情况下,MPQEA-AM单个宇宙内的种群规模是AQEA的1/4。较小的进化代数使得MPQEA-AM各宇宙内种群的多样性受到影响,所以在算法进化初期,MPQEA-AM的性能并不明显;但随着进化代数的增加,MPQEA-AM不管是进化的收敛速度还是运行时的效率都有显著的提高。

4 结语

本文针对传统量子衍生进化算法在选择进化参量时未充分考虑种群中个体间的差异导致的收敛速度较慢、容易陷入局部解等问题,提出了一种基于自适应进化的改进型量子衍生进化算法。算法中通过评估当前代的进化状态,以一定模型自适应地选取旋转角步长,从而大大提高了算法的收敛速度和搜索全局最优解的能力。此外,针对自适应量子衍生进化算法运行时间代价高的问题,采用量子多宇宙方法将自适应量子衍生进化算法分布于多宇宙中并行实现,从而提高算法执行速度,使得算法效率进一步提升。

参考文献:

- [1] LU T, ZHU J. Genetic Algorithm for energy-efficient QoS multicast routing [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(1): 31–34.
- [2] JIANG Y, JIANG J, ZHANG Y. A novel fuzzy multi-objective model using adaptive genetic algorithm based on cloud theory for service restoration of shipboard power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 612–620.
- [3] KAUSHIK D, SINGH U, SINGHAL P, *et al.* Medical image segmentation using genetic algorithm [J]. International Journal of Computer Applications, 2013, 81(18): 10–15.
- [4] DAVID O E, van den HERIK H J, KOPPEL M, *et al.* Genetic algorithms for evolving computer chess programs [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(5): 779–789.
- [5] NARAYANAN A, MOORE M. Quantum-inspired genetic algorithms [C]// Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE, 1996: 61–66.
- [6] XING H, PAN W, ZOU X. A novel improved quantum genetic algorithm for combinatorial optimization problems [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(10): 1999–2002. (邢焕来, 潘炜, 邹喜华. 一种解决组合优化问题的改进型量子遗传算法[J]. 电子学报, 2007, 35(10): 1999–2002.)
- [7] XING H, QU R. A non-dominated sorting genetic algorithm for bi-objective network coding based multicast routing problems [J]. Information Sciences, 2013, 233: 36–53.
- [8] HO S L, YANG S, NI P, *et al.* A quantum-inspired evolutionary algorithm for multi-objective design [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(5): 1609–1612.
- [9] HAN K-H, KIM J-H. Quantum-inspired optimization algorithms with a new termination criterion, H gate, and two-phase scheme [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(2): 156–169.
- [10] LI B, WANG L. A hybrid quantum-inspired genetic algorithm for multi-objective flow shop scheduling [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2007, 37(3): 576–591.
- [11] ZHAO Z, ZHENG S, SHANG J, *et al.* A study of cognitive radio decision engine based on quantum genetic algorithm [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(11): 6760–6766. (赵知劲, 郑仕链, 尚俊娜, 等. 基于量子遗传算法的认知无线电决策引擎研究[J]. 物理学报, 2007, 56(11): 6760–6766.)
- [12] LV Y, LIU N. Application of quantum genetic algorithm on finding minimal reduct [C]// GRC 2007: Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Granular Computing. Piscataway: IEEE, 2007: 728–733.
- [13] XING H, JI Y, BAI L, *et al.* An adaptive-evolution-based quantum-inspired evolutionary algorithm for QoS multicasting in IP/DWDM networks [J]. Computer Communications, 2009, 32(6): 1086–1094.
- [14] YANG J, ZHUANG Z, SHI L. Multi-universe parallel quantum genetic algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6): 923–928. (杨俊安, 庄镇泉, 史亮. 多宇宙并行量子遗传算法[J]. 电子学报, 2004, 32(6): 923–928.)
- [15] WNAJ J, LIU G. Method of energy saving based on particle swarm optimization clustering for greenhouse wireless sensor networks [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(7): 172–177. (王俊, 刘刚. 基于粒子群优化聚类的温室无线传感器网络节能方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 172–177.)
- [16] RIJIN I K, SAKTHIVEL N K, Subasree S. Development of an enhanced efficient secured multi-hop routing technique for wireless sensor networks [J]. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, 2013, 1(3): 507–512.
- [17] SINGH B, LOBIYAL D K. An energy-efficient adaptive clustering algorithm with load balancing for wireless sensor network [J]. International Journal of Sensor Networks, 2012, 12(1): 37–52.
- [18] KUILA P, JANA P K. Energy efficient load-balanced clustering algorithm for wireless sensor networks [J]. Procedia Technology, 2012, 6: 771–777.

(上接第335页)

- [13] WNAJ J, LIU G. Method of energy saving based on particle swarm optimization clustering for greenhouse wireless sensor networks [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(7): 172–177. (王俊, 刘刚. 基于粒子群优化聚类的温室无线传感器网络节能方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 172–177.)
- [14] CHEN D, LIU Z, WANG L, *et al.* Natural disaster monitoring with wireless sensor networks: a case study of data-intensive applications upon low-cost scalable systems [J]. Mobile Networks and Applications, 2013, 18(5): 651–663.
- [15] ADNAN M A, RAZZAQUE M A, AHMED I, *et al.* Bio-mimic optimization strategies in wireless sensor networks: a survey [J]. Sensors, 2014, 14(1): 299–345.