

基于蚁群优化的 WSN 负载均衡数据汇集算法^①

唐云建^② 石为人 易 军 王燕霞

(重庆大学自动化学院 重庆 400030)

摘 要 针对无线传感器网络(WSN)数据汇集应用中负载分配不均衡,使得网络节点出现早死,网络寿命缩短的问题,提出了一种基于蚁群优化(ACO)的负载均衡的数据汇集(Load-balancing data gathering based on ACO, L-ACO)算法。根据不同的任务, L-ACO 算法将蚂蚁分为三类:前向探索蚂蚁(FD-ANT)、前向运输蚂蚁(FT-ANT)和后向蚂蚁(B-ANT)。此算法定义蚂蚁的转移概率与路径信息素成反比,并采用父节点负载作为启发因子,使得蚂蚁趋向于走负载低的路径。通过前向蚂蚁与后向蚂蚁的分工合作,使得各条路径上的负载逐渐趋于均衡,从而延长网络寿命。仿真实验表明 L-ACO 算法可行。

关键词 无线传感器网络(WSN), 数据汇集, 负载均衡, 蚁群优化(ACO)

0 引 言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)具有低成本、低功耗和自组织的特点,其应用前景非常广阔^[1,2]。WSN 经常应用于监测领域,如水质监测、大气监测、农业大棚温湿度监测、工厂设备状态监测、建筑物状态监测等。在这些应用中,各个传感器节点周期性地获取监测数据,并源源不断地将数据向 Sink 节点汇集,我们称这种类型的应用为数据汇集应用。在数据汇集应用中,除 Sink 节点外的每个网络节点都是数据源。数据经过多跳方式,多点向一点(Sink 节点)汇集,形成多对一的网络数据流。相对于 Sink 节点,处于上游的节点需要承担转发下游节点数据的工作,使得上游节点负载大于下游节点负载,从而形成所谓的“漏斗效应”^[3]。在数据汇集过程中,由于各个数据流分支的流量分配不均衡,容易导致部分上游节点负载过重,形成热节点(hot spots)。过重的负载使得热节点的能量快速耗尽,造成其提前“死亡”,致使网络寿命缩短。

负载均衡是一种有效缓解热节点的技术^[4],通过对节点进行负载均衡,可以一定程度上避免形成热节点,缓解网络拥塞,降低关键节点的能耗,从而延长 WSN 的生命周期。本文针对 WSN 数据汇集应用的特点,采用了蚁群优化(ant colony optimization, ACO)^[5]的思想,提出一种基于 ACO 的负载均衡的

WSN 数据汇集(Load-balancing data gathering based on ACO, L-ACO)算法。L-ACO 算法作用于层次网络结构,减少搜索路径的盲目性。此算法根据不同的任务将蚂蚁分为前向探索蚂蚁、前向运输蚂蚁和后向蚂蚁三类,采用节点的负载信息作为启发因子,使得蚂蚁具有负载感知功能,并趋向于走负载低的路径。在数据汇集过程中,前向探索蚂蚁充当路径搜索者的功能,前向探索蚂蚁和前向运输蚂蚁承担数据搬运功能,其转移概率按照信息素少、概率大的原则进行。后向蚂蚁用于整条路径信息素的更新,通过向路径洒信息素的方式将上游节点的负载信息反馈给下游的前向蚂蚁,使得前向蚂蚁在路径选择时具有更多的路径负载信息。前向蚂蚁与后向蚂蚁的任务协作充分体现了群体智能的社会分工合作能力。仿真实验表明 L-ACO 算法可行,且负载均衡的效果明显。

1 相关研究

近几年来,国内外的研究人员提出了一些针对 WSN 的负载均衡策略。张重庆等人^[4]提出采用货币商品交易的思想构建交易平衡的负载均衡网络,但在算法执行过程中需要保存大量的交易信息,存储开销比较大,并且在最坏情况下,网络中的每条边都要被遍历才能够遍历所有节点,因此算法的代价

^① 863 计划(2006AA780201-2)和教育部博士点基金(20060611010)资助项目。

^② 男,1981 年生,博士生;研究方向:自组织网络,无线传感器网络;联系人, E-mail: eqy_tyi@126.com (收稿日期:2009-05-25)

比较高。该算法仅适合静态的网络结构,不能适应网络拓扑的变化。Hsiao 等人^[6]假设最初建立的路由树不是一棵负载均衡的树,通过随机地选择邻居节点来对负载进行调整,因此该方法具有一定的盲目性。Hui 等人^[7]针对文献[6]的缺点提出利用节点的拓扑信息,采用拓扑控制来调整树的拓扑结构,以达到负载均衡的目的,但是对于资源非常有限的 WSN 节点,获取和保存全局的拓扑结构信息的方法是不可取的。Perillo 等人^[3]对传感器网络中多对一传输模式的负载不均衡问题进行了分析,将负载均衡问题转化为节点传输半径的优化问题,通过使用节点的位置信息,控制节点的传输距离以到达网络负载均衡。但该方法需要位置信息的支持,对于随机部署在复杂环境中的 WSN 节点获取位置信息代价比较大,并且该方法假定网络中所有节点能与 Sink 节点或其他节点直接通信,这在很多应用场合都是不成立的。文献[8-11]采用基于分簇网络结构的负载均衡方法,但是分簇网络结构不但需要节点能控制发送功率,还必须满足网络中所有节点能与 Sink 节点或其他节点直接通信,这使得应用范围受到很大限制。文献[12-14]采用多路径路由策略来解决负载均衡,但这些策略都是基于点对点的数据传输思想,不适合多对一的 WSN 数据汇集应用。

上述的负载均衡策略大部分是基于功率控制的策略或者静态网络拓扑结构的调整,在 WSN 的很多应用场合都是不成立的,应用范围受到很大限制。本文针对 WSN 数据汇集应用,提出的 L-ACO 算法充分考虑了节点资源的有限性和应用场景的适应性,完全采用分布式控制方式,使得算法有更好的环境适应能力和扩展能力。

2 ACO 的优点与不足

ACO 是由意大利学者 Dorigo 等人通过模拟自然界中蚂蚁集体觅食行为提出的一种利用正反馈原理

解决全局优化问题的启发式算法。蚁群的每个个体能力有限,只能感知局部信息,不能拥有全局信息,行为规则简单。WSN 单个节点计算能力、存储器空间、能量和通讯半径有限,使得每个节点只能感知邻居节点,并与之发生信息交互。WSN 单个节点与 ACO 中的个体情况非常相似。因此,用 ACO 的思想来解决 WSN 中的相关问题是十分契合的。ACO 采用分布式控制,不存在直接的控制中心,算法具有潜在的并行性,路径搜索可以同时从多个点进行,非常符合 WSN 的相关应用场景。ACO 已在 WSN 的相关应用中取得了较好的效果^[15-17]。

虽然 ACO 在 WSN 的一些领域取得了较好效果,但在 WSN 的数据汇集应用方面有不合理之处,存在一定的局限性。由于 ACO 本身所具有的收敛性质,会使得大量蚂蚁汇聚到少数路径上,这些路径上的节点能量将急剧消耗,导致节点提前死亡,缩短整个网络的生命周期,严重时造成这些路径上出现拥塞,最终导致整个网络瘫痪。这种现象对于要求负载均衡的 WSN 数据汇集应用是不合理的。如图 1 所示,蚂蚁从食物源 F 到蚁巢 H 的过程中,存在 3 条路径。根据 ACO 的收敛性质,必然产生绝大多数蚂蚁汇聚到其中的某条路径上(假设为 $F \rightarrow B \rightarrow H$),造成其路径上的转发节点 B 负载过重,严重时发生拥塞,如果网络没有其他路由修复机制,则会使网络瘫痪。传统的 ACO 算法在路径搜索完成后就终止,网络陷入瘫痪的可能性更大。即使不发生拥塞,节点 B 的能量快速消耗,会导致其提前死亡,缩短整个网络的生命周期。WSN 数据汇集应用中的数据源在网络的整个生存期有效,网络拓扑或者路径信息一旦发生变化,传统的 ACO 需要重新搜索路径,这将带来很大的开销。

综上所述,ACO 的个体特征与 WSN 节点情况相似,其算法思路适合于解决 WSN 相关问题,但针对 WSN 数据汇集应用,ACO 存在改进的必要性。

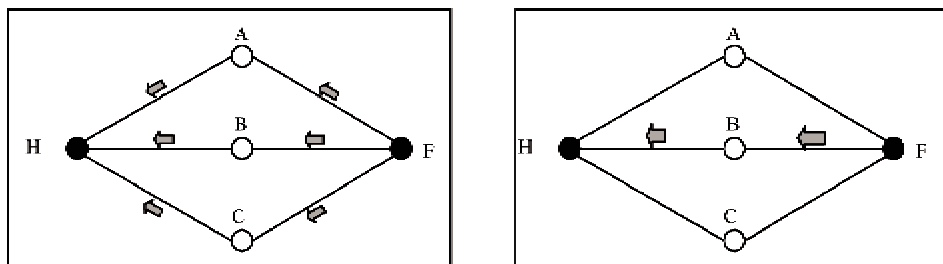


图 1 ACO 的局限性

3 L-ACO 算法描述

3.1 L-ACO 算法的术语与规则

对于一个数据汇集的 WSN,数据流的方向总是从数据源节点向 Sink 节点汇集,因此可以通过广播算法^[18-20]进行层次发现,得到节点的层次关系和父子关系。

L-ACO 算法作用于已建立的层次网络结构上,并根据不同的任务将蚂蚁分为三类:

(1)前向探索蚂蚁(FD-ANT):从食物源(数据源节点)产生的蚂蚁,用于路径探索,兼顾数据运输。FD-ANT 在行走过程中需要记住自己经过的路径,以便按原路径返回。

(2)前向运输蚂蚁(FT-ANT):从食物源(数据源节点)产生的蚂蚁,仅用于数据运输。FT-ANT 在行走过程中无需记住自己经过的路径,相对于 FD-ANT 开销小。

(3)后向蚂蚁(B-ANT):从蚁巢(Sink 节点)返回食物源(数据源节点)的蚂蚁,用于路径拥塞程度的检测和告知。

FD-ANT 和 FT-ANT 统称为前向蚂蚁,FD-ANT 到达蚁巢(Sink 节点)后转化为 B-ANT。

规则 1(前向蚂蚁产生规则):由于 FD-ANT 需要记住路径,会产生一些额外开销,因此 FD-ANT 仅在前向蚂蚁占一定的比例。FD-ANT 的产生速率为

$$M(i) = k \cdot f(i) \quad (1)$$

FT-ANT 的产生速率为

$$N(i) = (1 - k) \cdot f(i) \quad (2)$$

式(1)、(2)中, $k \in (0, 1]$ 为比例因子, $f(i)$ 为节点 i 产生数据包的速率(packet/min)。

规则 2(L-ACO 的转移概率):L-ACO 的转移概率为

$$P_{ij}(k) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{s \in F(i)} \tau_{is}^\alpha \eta_{is}^\beta}, & j \in F(i) \\ 0, & j \notin F(i) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $P_{ij}(k)$ 为第 k 只前向蚂蚁从节点 i 转移到节点 j 的概率; τ_{ij} 表示边 (i, j) 上的信息素量; η_{ij} 为启发因子,表示蚂蚁从节点 i 转移到节点 j 的期望程度; α 和 β 分别表示信息素和启发式因子的相对重要程度; $F(i)$ 为节点 i 的父节点。

对于 WSN 数据汇集应用,网络寿命最大化的关键在于延长关键节点的生存周期,因此,节点的负载集中体现于节点的剩余能量。

定义 1 无线传感器网络节点负载定义为

$$L(i) = e(i)^{-\lambda} \quad (4)$$

其中: $L(i)$ 为节点 i 的负载; $e(i)$ 为节点 i 的剩余能量。在实际应用中,节点的剩余能量通常以电池电压表示,因此 λ 为能量指数,反映电池压降速率。

定义 2 L-ACO 的启发因子 η_{ij} 定义为

$$\eta_{ij} = \frac{1}{L(j)} \quad (5)$$

启发因子为下跳节点 j 的负载倒数,这样使得前向蚂蚁趋向于走负载低的路径。

L-ACO 的转移概率与标准 ACO 的转移概率^[5]相比较有 3 个不同点:(1)系统参数 α 负变换。这样使得前向蚂蚁选择路径是按照信息素少优先的原则进行,将标准 ACO 的收敛性改为发散性;(2)下跳节点的可行域从邻节点域变成父节点域,减小了前向蚂蚁搜索路径的盲目性,并且路径不会出现回环,无需存储禁忌表,减少了算法对存储器的开销;(3)标准 ACO 通常定义启发因子 η_{ij} 为距目的地的距离,而 L-ACO 算法作用于层次网络,下跳节点到达 Sink 节点的距离相等,启发因子 η_{ij} 定义为下跳节点的负载倒数,更能体现负载均衡思想。

规则 3(前向蚂蚁对环境信息素更新规则):如果路径 (i, j) 是前向蚂蚁 k 走过的路径,则按照式

$$\tau'_{ij} = (1 - \rho) \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (6)$$

进行信息素的局部更新,否则按照式

$$\tau'_{ij} = (1 - \rho) \tau_{ij} \quad (7)$$

更新。式(7)、(8)中: $\rho \in [0, 1]$, 表示环境对信息素的挥发系数;式(7)中 $\Delta \tau_{ij}^k$ 为蚂蚁 k 在路径 (i, j) 上洒下的信息素量。

前向蚂蚁对环境信息素的更新并不能使得上游链路的负载情况及时地反映给下游节点。如图 2 所示,食物源 F2 的出现,增加了(A, H)上的蚂蚁数量,但并不能影响从食物源 F1 出发的蚂蚁对(F1, B)和

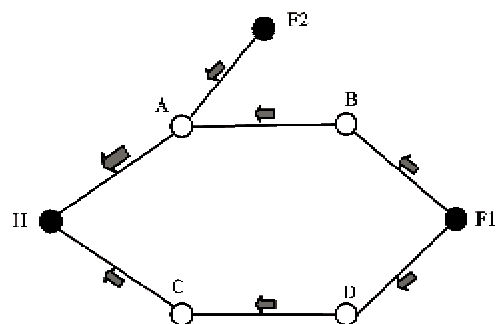


图 2 前向蚂蚁对环境信息素的更新

(F1,D)的路径转移概率。路径(F1,B,A,H)和路径(F1,D,C,H)的长度相等,两条路径上从 F1 出发的蚂蚁数量会几乎相当。设从食物源 F1 和 F2 出发的蚂蚁个数分别为 m 和 n 。则经过 A 的蚂蚁数量为 $(m/2 + n)$,而经过 C 节点的蚂蚁数量为 $(m/2)$,相比较节点 A 的负载比节点 C 的负载重。因此需要在后向蚂蚁从蚁巢回到食物源的过程中对路径上的信息素进行一次全局更新。

规则 4(后向蚂蚁对环境信息素更新规则):如果路径 (i,j) 是后向蚂蚁走过的路径,则按照式

$$\tau'_{ij} = \tau_{ij} + \frac{\max[\tau_{\text{path}(i,j)}]}{2} \quad (8)$$

进行信息素的局部更新,否则不更新。其中, $\max[\tau_{\text{path}(i,j)}]$ 表示从食物源节点到蚁巢节点经过 (i,j) 的路径上最大的信息素。

在后向蚂蚁对环境信息的更新过程中,将路径上的最大负载情况通告到下游节点的路径上,这就为前向蚂蚁感知整条路径的负载情况提供了参考信息。

3.2 L-ACO 算法步骤

步骤 1:通过广播算法进行层次发现,得到节点的层次关系以及父子关系。

步骤 2:初始化各条父子链路的信息素,节点的剩余能量和负载。

步骤 3:对数据源节点按照规则 1 产生前向蚂蚁。

步骤 4:对于每只前向蚂蚁按照规则 2 选择下一跳节点,并且按照规则 3 对环境信息素进行更新。

步骤 5:如果前向蚂蚁到达蚁巢(Sink 节点),则前向蚂蚁中的 FD-ANT 变为后向蚂蚁按原路径返回,并按照规则 4 对环境信息素进行更新;否则返回步骤 4。

步骤 6:如果后向蚂蚁返回食物源(数据源节点),则蚂蚁使命完成(死亡),否则继续按照规则 4 对环境信息素进行更新。

步骤 7:返回步骤 3。

在整个步骤中,前向蚂蚁需要负责数据运输,为了保障数据传输的可靠性,通常需采用 ACK 确认。因此,父节点的剩余能量和信息素可以通过 ACK 稍带方式告知子节点,以减少数据传输的额外开销。

4 负载分析与负载均衡因子

通常网络关键节点是影响网络寿命的主要因

素。网络关键节点可以分为两种情况:一种是节点处于关键的地理位置上,必须承担大量的数据转发任务,从而形成网络关键节点,我们称这种类型的关键节点为位置关键节点。另一种是由于路由策略的不合理性导致某个或某些节点被大量其它节点选择为数据转发节点,从而形成网络关键节点,我们称这种类型的关键节点为路由关键节点(又称热节点)。位置关键节点不能通过算法避免,其产生的负载过重问题,可以通过在网络的关键位置部署冗余节点来缓解。路由关键节点可以通过算法缓解或避免,本文提出的 L-ACO 算法通过群体蚂蚁的合作方式感知和最大程度地避免路由关键节点的存在。在第 5 节的仿真实验中,本文通过对网络最大负载节点的剩余能量进行分析,从而评价算法在缓解或避免路由关键节点方面的性能。

为了进一步评价负载均衡算法的有效性,本文针对数据汇集层次网络提出负载平衡因子。在 WSN 数据汇集应用中,多对一的网络数据流会产生一种所谓的“漏斗效应”,即距离 Sink 节点越近的节点负载相对距离越远的节点负载重。依此类推可知,一般情况下 Sink 邻居节点的负载较其他节点重,因此定义负载均衡程度为 Sink 邻居节点的负载相近程度。假设 Sink 节点有 n 个邻居节点,其负载分别为 $L_1, L_2, \dots, L_n$, 且大于或等于 0。由于网络中每个数据源的数据采集率恒定,因此 $L_1 + L_2 + \dots + L_n = C$ (常量)。根据不等式原理^[7],有

$$\frac{(\sum_{i=1}^n L_i)^2}{n \sum_{i=1}^n L_i^2} \leq 1 \quad (9)$$

当 $L_1, L_2, \dots, L_n$ 相等(即负载均衡)时,不等式左边达到最大值,因此定义负载均衡因子为

$$\theta = \frac{(\sum_{i=1}^n L_i)^2}{n \sum_{i=1}^n L_i^2} \quad (10)$$

其中 θ 称为均衡因子,表示负载均衡程度。 θ 值越接近 1,说明负载越均衡。

5 仿真实验

5.1 仿真环境与参数

本文使用 TOSSIM(<http://www.tinyos.net/tinyos-1.x/>)进行仿真实验。网络节点数为 100,随机部署在仿真区域,其中一个节点为 Sink 节点。Raido

model 采用 Fixed radius(10.0), Distancse scaling factor 设置为 0.8。传感器节点的初始能量为 50J,为了简化计算,定义节点用于感知、接收与传送 1 个字节数据所消耗的能量分别为 $1 \times 10^{-5} \text{J}$, $5 \times 10^{-5} \text{J}$ 和 $1 \times 10^{-4} \text{J}$, Sink 节点能量无限制。仿真次数为 6,为了使不同的数据源节点具有不同的数据采集周期,在 6 次实验中,数据源节点在启动时分别在 $[5, 15) \text{s}$, $[15, 25) \text{s}$, $[25, 35) \text{s}$, $[35, 45) \text{s}$, $[45, 55) \text{s}$, $[55, 65) \text{s}$ 时间段内随机获得数据采集周期,一旦获取就不再改变。根据经验设置参数 $\alpha = 1, \beta = 0.5, \rho = 0.5, \Delta\tau_{ij} = 10, \lambda = 1$, 环境每隔 100ms 对节点的信息素进行一次更新,为了保证计算不溢出,设置每个节点的初始信息素和最小信息素为 1.0。

5.2 网络分组定义

网络定义了 5 种分组:HELLO 分组、FD_ANT 分组、FT_ANT 分组、ACK 分组和 B_ANT 分组。

(1)HELLO 分组

HELLO 分组用于层次发现,由 Sink 节点发起,分组包含数据域如表 1 所示。

表 1 HELLO 分组数据结构

HELLO 分组		
srcAddr	seqNum	hop
(16bit)	(8bit)	(8bit)

(2)FD _ ANT 分组

FD _ ANT 分组用于数据运输和路径探索,由数据源节点发起,分组包含数据域如表 2 所示。

表 2 FD _ ANT 分组数据结构

FD _ ANT 分组						
srcAddr	prevHop	seqNum	dataLen	hopCount	data	addrChain
(16bit)	(16bit)	(8bit)	(8bit)	(8bit)	(8bit * dataLen)	(16bit * hopCount)

(3)FT _ ANT 分组

FD _ ANT 分组用于数据运输,由数据源节点发起,分组包含数据域如表 3 所示。

表 3 FT _ ANT 分组数据结构

FT _ ANT 分组				
srcAddr	prevHop	seqNum	dataLen	data
(16bit)	(16bit)	(8bit)	(8bit)	(8bit * dataLen)

(4)ACK 分组

ACK 分组用于对 FD _ ANT 分组和 FT _ ANT 分组的数据运输确认,以及节点信息素和负载告知,分

组包含数据域如表 4 所示。

表 4 ACK 分组数据结构

ACK 分组				
srcAddr	dstAddr	seqNum	load	pheromone
(16bit)	(16bit)	(8bit)	(16bit)	(16bit)

(5)B _ ANT 分组

当 Sink 节点收到一个 FD _ ANT 分组后就产生一个 B _ ANT 分组,用于路径拥塞程度检测和告知,分组包含数据域如表 5 所示。

表 5 B _ ANT 分组数据结构

B _ ANT 分组					
dstAddr	prevHop	seqNum	pheromone	hopCount	addrChain
(16bit)	(16bit)	(8bit)	(16bit)	(8bit)	(16bit * hopCount)

5.3 仿真结果

网络寿命定义为:从网络开始工作到第 1 个传感器节点消耗完自己能量所经历的时间间隔。时间间隔越长,其网络寿命越长。

在前向蚂蚁产生的规则中,比例因子 k 控制 FD-ANT 产生的速率。由于 FD-ANT 需要存储路径

信息,会增加额外开销,从开销方面考虑 k 值越小越好。FD-ANT 到达蚁巢(Sink 节点)后变为 B-ANT。B-ANT 的主要任务是将路径上游的拥塞程度情况反馈到下游节点的路径上,为前向蚂蚁感知整条路径的负载情况提供参考信息。拥塞程度信息反馈越及时就越需要多的 FD-ANT,从负载均衡方面考虑 k 值

越大越好。因此比例因子 k 的选择需要从额外开销和反馈实时性两个方面综合考虑。表 6 显示平均数据采集周期为 60s 时, k 在不同取值下的负载均衡因子和网络寿命情况。在本次仿真环境下, k 取 0.2 使得网络寿命最长。

表 6 比例因子 k 对网络性能的影响

比例因子(k)	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
平均负载均衡因子(θ)	0.85	0.88	0.90	0.91	0.912
网络寿命(单位:h)	1086	1194	1178	1028	897

本次仿真实验对比了 5 种方法:(1)最短路径树(shortest path tree, SPT)方法。这种方法,随机选择距离 Sink 最近的父节点。(2)静态负载均衡树(static load-balancing tree, SLBT)方法,网络节点构成一棵负载均衡树,数据通过平衡树传输到 Sink 节点。构造平衡树的算法使用了文献[7]中提出的方法,静态平衡树的结构在数据汇集过程中不发生改变。(3)动态负载均衡树(dynamic load-balancing tree, DLBT)方法,该方法基于文献[21]所提出的方法,节点使用动态负载均衡树将数据包发送到 Sink 节点,在数据收集过程中,节点之间交换剩余能量信息,并根据剩余能量情况调整树的结构。(4)基于标准 ACO 的路由算法($\alpha = 0.5, \beta = 2$)。(5)本文提出的动态负载均衡方法 L-ACO。

图 3 显示了负载最大节点的能量消耗情况,由于标准 ACO 使得大量数据收敛到少数路径上,使得最大负载节点的能量消耗最快。本文 L-ACO 算法最大程度地均衡了上游节点的负载,使得负载最大节点的负载相比其他 4 种算法达到更小,因此其能量消耗速率也更小。图 4 给出了 4 种算法随时间变化的负载均衡程度,标准 ACO 路径收敛的特点使得其负载均衡因子为 0.18,相比其他算法最小。SPT 和 SLBT 算法的负载均衡程度不随时间变化而变化,其中 SPT 随机选择距离 Sink 节点最近的父节点,因此负载均衡因子为 0.35,SLBT 算法由于没有考虑各个节点数据采集量的差异,因而负载均衡程度不如 DLBT 算法和本文所提出的 L-ACO 算法。DLBT 算法的均衡因子的平均值为 0.7,本文提出的 L-ACO 算法的均衡因子的平均值为 0.85。由此可见,本文提出的 L-ACO 算法的负载均衡程度较其他 4 种更好。图 5 显示了在不同的数据采集周期下的网络寿命,标准 ACO 的网络寿命最短,因此最不适合要求负载均衡的数据汇集应用。在 L-ACO 算法

作用下负载最大节点的数据流量得到最大程度的下降,使得网络寿命相对于其他 4 种最长。

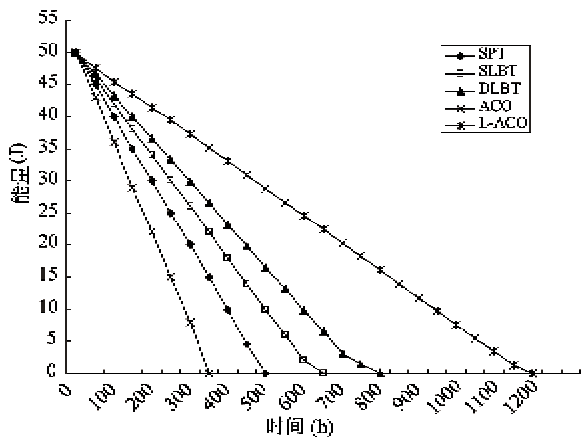


图 3 最大负载节点能量消耗比较

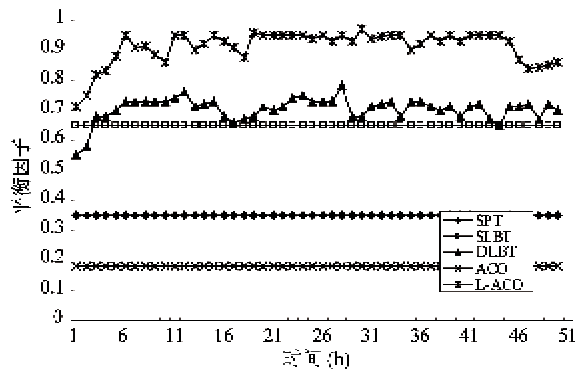


图 4 负载均衡因子比较

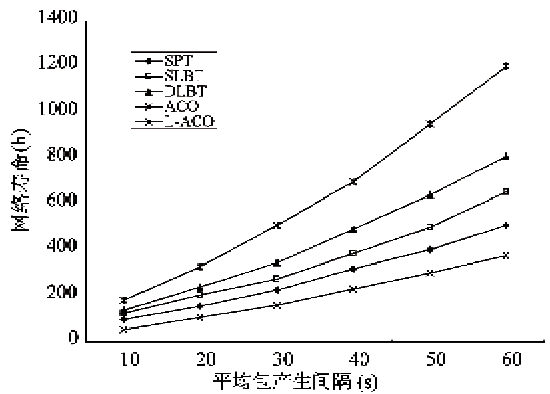


图 5 网络寿命比较

综上所述,仿真实验结果表明本文提出的 L-ACO 算法相对于其他 4 种典型方法效果更优。

6 结 论

在 WSN 数据汇集应用中,多对一的数据产生和

传输方式会不可避免地形成“漏斗效应”。在负载均衡的情况下,上游节点(特别是 Sink 邻居节点)容易出现早死,缩短网络寿命。本文针对 WSN 数据汇集应用,采用了蚁群优化的思想,将 WSN 的数据汇集考虑为一个蚂蚁搬运数据的动态过程。本文针对 WSN 数据汇集应用的特点,改进了蚁群优化算法,仿真实验表明,提出的 L-ACO 算法较其他算法能够更大程度地均衡网络负载,延长网络寿命。另外,本文算法无需位置获取、功率控制等其他手段支持,对网络节点和应用环境要求低,使得其更加实用。本文算法不仅可以应用于 WSN,还可以应用于其他类似要求负载均衡的数据汇集网络。

参考文献

- [1] Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*. 2005, 3(3): 325-349
- [2] Akyildiz I F, Weilian S, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks. *Ad Hoc Networks*. 2002, 40(8): 102-114
- [3] Perillo M, Zhao C, Heinzelman W. On the problem of unbalanced load distribution in wireless sensor networks. In: *Proceedings of the Global Telecommunications Conference Workshops*, Texas, USA. 2004. 74-79
- [4] 张重庆,李明禄,伍民友. 数据收集传感器网络的负载均衡网络构建方法. *软件学报*. 2007, 18 (05) :1110-1121
- [5] Dorigo M, Stutzle T. *Ant Colony Optimization*. MA : MIT Press, 2004.
- [6] Hsiao P H, Hwang A, Kung H T, et al. Load-balancing routing for wireless access networks. In: *Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Hong Kong, China. 2001. 986-995
- [7] Hui D, Han R. A node-centric load balancing algorithm for wireless sensor networks. In: *Proceedings of the Global Telecommunications Conference*, San Francisco, CA, USA. 2003. 548-552
- [8] Ruihua Z, Lin W, Shichao G, et al. A balanced cluster routing protocol of wireless sensor network. In: *Proceedings of the International Conference on Embedded Software and Systems Symposia*, Chengdu, China. 2008. 221-225
- [9] Liansheng T, Yanlin G, Gong C. A balanced parallel clustering protocol for wireless sensor networks using k-means techniques. In: *Proceedings of the International Conference on Sensor Technologies and Applications*, Cap Esterel, France. 2008. 300-305
- [10] Yanlin G, Gong C, Liansheng T. A balanced serial k-means based clustering protocol for wireless sensor networks. In: *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications*, Dalian, China. 2008. 1-6
- [11] He H, Yun X, Yu-E S, et al. Cluster-based load balancing multi-path routing protocol in wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China. 2008. 6692-6696
- [12] I-Shyan H, Cheng-Ching Y, Chiung-Ying W. Link stability, loading balance and power control based multi-path routing (SBPMR) algorithm in ad hoc wireless networks. In: *Proceedings of the International Conference on Telecommunications Tahiti*, Papeete, French Polynesia. 2003. 406-413
- [13] Ganjali Y, Keshavarzian A. Load balancing in ad hoc networks: single-path routing vs. multi-path routing. In: *Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. Hong Kong, China. 2004. 1120-1125
- [14] Pham P, Perreau S. Multi-path routing protocol with load balancing policy in mobile ad hoc network. In: *Proceedings of the International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network*, Stockholm, Sweden. 2002. 48-52
- [15] 王潮,贾翔宇,林强. 基于可信度的无线传感器网络安全路由算法. *通信学报*. 2009, 29(11):105-112
- [16] Zhicheng Z, Zhizhong T, Li Z, et al. An ant colony optimization competition routing algorithm for WSN. In: *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications*, Dalian, China. 2008. 1-4
- [17] Okdem S, Karaboga D. Routing in wireless sensor networks using ant colony optimization. In: *Proceedings of the Conference on Adaptive Hardware and Systems*, Istanbul, Turkey. 2006. 401-404
- [18] Srinivasan A, Jie W. A novel k-parent flooding tree for secure and reliable broadcasting in sensor networks. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Glasgow, Scotland, UK. 2007. 1497-1502
- [19] Williams B, Camp T. Comparison of broadcasting techniques for mobile ad hoc networks. In: *Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, Lausanne, Switzerland. 2002. 194-205
- [20] 唐勇,周明天. 无线传感器网络中最小化能量广播算法. *通信学报*. 2007, 28(4):80-86
- [21] Yang H, Ye F, Sikdar B. A dynamic query-tree energy balancing protocol for sensor networks. In: *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Atlanta, Georgia, USA. 2004. 1715-1720

Load-balancing data gathering algorithm for wireless sensor networks based on ACO

Tang Yunjian, Shi Weiren, Yi Jun, Wang Yanxia

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract

To solve the problem that the unbalanced load in wireless sensor networks (WSNs) performing data gathering causes premature death of sensor nodes and shortens the network lifetime, the paper proposes an algorithm of L-ACO, a new load-balancing data gathering algorithm based on the ant colony optimization (ACO) for WSNs. According to different tasks, the algorithm divides ants into three categories: forward ants (FD-ANT), forward transport ants (FT-ANT) and backward ants (B-ANT). In L-ACO, ants choose the next hop according to the lower pheromone higher probability principle, and the load of parents is taken as the heuristic factor. Through the cooperation of forward ants and backward ants, a certain degree load-balancing is reached step by step, and the network lifetime is extended. The simulation results validated the effectiveness of this approach.

Key words: wireless sensor networks (WSN), data gathering, load-balancing, ant colony optimization (ACO)