

基于蚁群优化解决传感器网络中的能量洞问题*

宋超¹⁺, 刘明¹, 龚海刚¹, 陈贵海², 王晓敏¹

¹(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 610054)

²(计算机软件与新技术国家重点实验室(南京大学), 江苏 南京 210093)

ACO-Based Algorithm for Solving Energy Hole Problems in Wireless Sensor Networks

SONG Chao¹⁺, LIU Ming¹, GONG Hai-Gang¹, CHEN Gui-Hai², WANG Xiao-Min¹

¹(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

²(State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Nanjing 210093, China)

+ Corresponding author: E-mail: scdennis@163.com

Song C, Liu M, Gong HG, Chen GH, Wang XM. ACO-Based algorithm for solving energy hole problems in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2009,20(10):2729–2743. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3462.htm>

Abstract: In a multi-hop wireless sensor network (WSN), the sensors closest to the sink tend to deplete their energy faster than other sensors, which is known as an energy hole around the sink. No more data can be delivered to the sink after an energy hole appears, while a considerable amount of energy is wasted and the network lifetime ends prematurely. This paper investigates the energy hole problem, and based on the improved corona model with levels, it concludes that the assignment of transmission ranges of nodes in different coronas is an effective approach for achieving energy-efficient network. It proves that the optimal transmission ranges for all areas is a multi-objective optimization problem (MOP), which is NP hard. The paper proposes an ACO (ant colony optimization)-based distributed algorithm to prolong the network lifetime, which can help nodes in different areas to adaptively find approximate optimal transmission range based on the node distribution. Furthermore, the simulation results indicate that the network lifetime under this solution approximates to that using the optimal list. Compared with existing algorithms, this ACO-based algorithm can not only make the network lifetime be extended more than two times longer, but also have good performance in the non-uniform node distribution.

Key words: WSN (wireless sensor network); energy hole problem; network lifetime; MOP (multi-objective optimization problem); NP hard; ACO (ant colony optimization)

摘要: 基于多跳的无线传感器网络,越靠近 sink 的传感器节点因需要转发更多的数据,其能量消耗就越快,从而在 sink 周围形成了一种称为“能量洞”的现象。“能量洞”问题会导致整个网络由于内部节点能量过早耗尽而结束寿

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60703114, 60673154 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.2006CB303000 (国家重点基础研究发展计划(973)); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2007AA01Z443 (国家高技术研究发展计划(863)); the Young Scholar Foundation of UESTC under Grant Nos.L08010601Jx0746, L08010601Jx0747 (电子科技大学校青年基金)

Received 2008-01-17; Accepted 2008-08-11; Published online 2008-11-19

命,同时,网络中离 sink 较远的节点仍有大量能量剩余.研究“能量洞”现象,基于改进的分级环模型,总结出调节各环节内节点的数据传输距离是实现网络节能的有效方法.证明搜索各区域最优的传输距离是一个多目标优化问题,即是 NP 难问题.从而提出一种基于蚁群优化的分布式算法,各区域根据其节点分布情况自适应地探索近似最优的传输距离,延长网络寿命.模拟实验结果表明,该算法在较短的时间内能够收敛到合理的解,并且得到的网络寿命接近于理想情况下的最优时间,与现有的类似算法相比,该算法提供了更长的网络寿命,并能适用于非均匀节点分布情况.

关键词: 无线传感器网络;能量洞问题;网络寿命;多目标优化;NP 难;蚁群优化

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

近年来,无线通信和电子技术的进步使得微型的短距离无线传输的传感器在低功耗、低能量、多功能方面得到了迅猛的发展.传感器包含了感应、数据处理和通信三大模块.传感器网络是传统传感器技术的一次显著进步.传感器网络由一定数量的传感器节点组成并按照一定密度分布在需要探索的地区附近.由于传感器的能量是有限的且不能被补充,所以需要通过能量管理来延长传感器网络的寿命.一种方法是采用低能耗的硬件设计和相应的信号处理技术,另一种方法是在网络层中提供节能的算法.

通常,传感器网络与外界的接口是一个或多个 sink 节点,传感器节点将感应的数据收集起来以多跳的方式传输给最近的 sink.最近的研究发现,离 sink 越近的传感器,其能量消耗也就越快^[1-6],这种现象被称为在 sink 周围形成的“能量洞”.当 sink 周围出现“能量洞”时,“能量洞”外围传感器的所有数据将不能够传输到 sink.因此,大量的能量被浪费,而网络的生命也会过早地被终结.文献[2]中的实验结果显示,当一个传感器网络生命结束后,总的节点能量剩余超过 90%.

在解决“能量洞”问题的研究中,很多文献提出了不同的方法,有些方法是辅助性的,如文献[7]中的部署辅助;有些^[2,8]则是调整不同区域的节点分布密度,接近 sink 的区域具有较高的节点密度,从而能够承受更大的网络流量.然而这些方法对节点部署的要求很高,在现实情况下难以实施.还有如文献[1]的研究是基于网络在均匀节点分布的情况,但其对各区域内节点的传输距离是可调的这种情况的讨论存在一定的问题,第 1 节有详细讨论,因此需要重新调整模型,本文则引入了分级的思想,通过分析“能量洞”现象,指出解决该问题的本质在于不同区域节点传输距离的调节,进而提出一种基于蚁群优化的分布式算法 AASTRL(ACO(ant colony optimization)-based algorithm for searching transmission range list),不同区域的节点根据当前的节点分布情况,自适应地调节其数据传输距离,从而延长网络寿命.这一方法不仅适合于均匀节点分布情况的网络,也适合不均匀的节点分布情况.

本文第 1 节介绍相关工作.第 2 节介绍本文采用的系统模型并分析“能量洞”现象.第 3 节提出一种基于蚁群优化的自适应算法 AASTRL.第 4 节通过模拟实验,研究算法 AASTRL 的性能,并与理想最优情况和现有主要算法进行比较.第 5 节总结全文.

1 相关工作

一些研究表明,传感器网络中存在一种不均衡能量消耗的现象.文献[2]提出在大型网络的静态模型下,当网络生命结束时,会有超过 90%初始能量的剩余能量未被使用.因此,均匀分布下的同构传感器静态模型不能有效地利用能量.作者提出了一种非均匀的节点分布策略,节点的密度随着与 sink 节点距离的缩短而增加.仿真实验显示,在高密度的网络中,该非均匀的节点分布策略能够有效地延长网络寿命.文献[7]研究了在大型多对一(many-to-one)的传感器网络中的能量不均衡消耗问题.作者通过一个环模型来描述能量洞问题,并给出了每个节点流量负荷(per node traffic load)和 ECR(per node energy consuming rate)的定义.在多对一的传感器网络中,所有的传感器节点都产生并发送 CBR(constant bit rate)数据,通过多跳传输到 sink.观察发现,sink 周围的传感器节点的网络流量远大于外围的节点,分析证明,内环的能量会更快地被消耗而其生命时间也更短.作者称这种不平衡的能量消耗现象为“能量洞”问题(energy hole problem),它会导致整个网络过早瘫痪.同时提出一些辅助性的解决办法,如部署辅助、流量压缩和聚合.同样地,文献[9]中也提出了一种解决“能量洞”问题的辅助性方法,是采

用移动的传感器节点,移动传感器用并行方式解决“能量洞”问题,能够避免人工部署传感器带来的巨大代价。

根据“能量洞”现象的特点,文献[1]提出用由一些同心环组成的模型来分析“能量洞”。作者假设一个传感器网络包含了多个 sink,每个 sink 都有充沛的能量支持,并且其无线信号能够覆盖以该 sink 为中心、半径为 R 的圆形区域。sink 组织其周围的传感器形成一个动态结构,这个过程被称作“训练(training)”^[6,10],即将半径为 R 的区域 D 分成相连的称作“环”的同心区域。作者研究了环模型中网络寿命与各环宽度之间的关联并得出结论:为了能够最小化从环中传感器到 sink 节点的路由路径上的能量消耗,所有环的宽度必须相同,且等于 $\left(\frac{2c}{\alpha-2}\right)^{\frac{1}{\alpha}}$ 和最大传输半径两者的最小值,其中 $\alpha \geq 2$ 是一个能量衰减系数, c 是与技术相关的正常数。但该结论的前提是作者假设环 C_i 之外的所有环生成的数据在传递至 sink 节点的过程中都必须经过环 C_i 转发,并且为了讨论各环采用不同传输距离的情况,作者还假设环 C_i 中所有节点的传输距离等于该环宽度,即 $(r_i - r_{i-1})$,其中 C_i 是在以 sink 为圆心、半径为 r_{i-1} 到 r_i 圆环之间的子区域。当各环采用不同的宽度和传输距离时,我们认为这种假设就会导致数据传输中能量的浪费。

因为造成“能量洞”现象的原因是由于内外环能量消耗负荷的不均衡,有些文献则提出增加负荷相对大的内环的节点密度,以均衡各环的能量消耗。Wu 和 Chen 等人在文献[8]中提出了一种非均匀的节点分布策略用于实现网络中的次平衡能量消耗,即网络中除了最外环所有环内节点的能量被同时消耗完。作者提出,如果从环 C_{R-1} 到最内环 C_1 中的节点数按比率为 $q > 1$ 的几何级增长,并且在环 C_R 中有 $N_{R-1}/(q-1)$ 个节点,从而实现了网络的次平衡能量消耗,其中 R 为总环数, N_i 是指环 C_i 中的节点数。但是,这种非均匀的节点分布策略在实际中较难实现,因为大多数情况下节点的分布都是随机的,局部区域的节点密度难以控制。

Jarry 和 Leone 等人在文献[11]中提出了一种混合式策略,用于平衡各区域的能量消耗以延长网络寿命,即通过算法分配环内一部分节点直接发送数据到 sink,而另一部分节点则通过多跳的方式接力传递到 sink,两部分比例是根据算法调节的。但这样做存在两个方面的不足,一方面是作者提出的算法仅用于所有传感器都能直接传递数据到 sink 的情况,即任何一个传感器到 sink 的距离均小于其最大传输距离,对于网络区域半径大于传感器最大传输距离的情况就不适合了;另一方面,平衡了各区域的能量消耗的网络的寿命不一定就是最长的,文献[1]就是将最长网络寿命和平衡能量消耗作为两个方面的问题进行讨论的。

2 网络模型与问题分析

本节将介绍采用的网络模型,在已有的环模型基础上引入分级思想,用于分析各环内节点采用不同的传输距离的情况。并在该模型下分析“能量洞”现象,寻找解决“能量洞”问题的有效方法。

2.1 基本假设

本文假设传感器网络具有以下性质:(1) 传感器一旦被部署,将会独立工作,并且所有传感器节点都是静止不动的,每个传感器的能量不能补充,即当其能量耗尽的时候,传感器则不能工作,各传感器初始能量均为 $\epsilon > 0$;(2) 每个传感器都有一个最大传输距离,用 t_x 表示,假设它比离 sink 节点最远的传感器节点到 sink 节点的距离 R 还小很多;(3) 所有传感器都按照一个特定的频率发送它们感应的数据。为了简单化起见,我们假设所有传感器节点在每个单位时间内生成并发送 L bits 的数据;(4) 假设网络中有一个完美的数据链路层,即传输策略是完美的,没有冲突和重传。网络初始时具有很好的连结性。怎样的节点密度能够保证网络良好的连结性这个问题在文献[12]中有所研究;(5) 传感器节点基于贪婪转发策略来传输数据到 sink 节点。很多文献提出了各种方法(如文献[13])。在贪婪转发中,数据包被传递到更接近于目标方向的下一跳节点。

定义 1(网络寿命)。Li 和 Mohapatra 在文献[7]中给出了系统寿命的定义,即从开始直到一部分传感器节点死去的时间。网络中一个环的传感器死去是指当该环不能转发任何数据或发送其自己的数据时。本文定义的网络寿命是指从开始直到第一个环的传感器死去的时间。

2.2 能量模型

一个典型的传感器节点包括 3 个基本的单元:感应单元、处理单元和数据收发单元.在本能量模型中,我们只考虑了接收和发送时所消耗的能量.而感应和处理所消耗的能量本文不予考虑,它们依赖于硬件结构和计算复杂度.本文后面部分采用文献[7]中的能量消耗公式用于我们的分析和仿真:

$$E_{trans} = (\beta_1 + \beta_2 d^\alpha)L \quad (1)$$

$$E_{rec} = \beta_3 L \quad (2)$$

其中, E_{trans} 表示发送数据消耗的能量, E_{rec} 表示接收数据消耗的能量, L 表示每个传感器节点产生和发送数据的频率, α 取值 2 或 4, d^α 部分是路径消耗所导致的,即发送距离越远,能量消耗就越大.根据文献[7],本文采用如下参数的设定:

$$\beta_1 = 45 \times 10^{-9} \text{ J/bit},$$

$$\beta_2 = 10 \times 10^{-12} \text{ J/bit/m}^2 \text{ (当 } \alpha=2 \text{ 时)},$$

$$\text{或 } \beta_2 = 0.001 \times 10^{-12} \text{ J/bit/m}^4 \text{ (当 } \alpha=4 \text{ 时)},$$

$$\beta_3 = 135 \times 10^{-9} \text{ J/bit}.$$

2.3 基于可调传输距离的环模型

为了节省能量,传感器能够使用不同的传输距离(如图 1 所示).简化问题,我们将最大传输距离 t_x 分成 k 个等级,构成集合 $\left\{ \frac{1}{k}t_x, \frac{2}{k}t_x, \dots, \frac{k}{k}t_x \right\}$,即每个传感器都有 k 种传输距离可以选择,其中单位传输距离用 d 表示,则有:

$$d = t_x / k \quad (3)$$

将整个半径为 R 的区域分成 m 个相邻的同心环和若干个角度相同的扇形区域(如图 2 所示),训练方法参考文献[6,10].每个环的宽度为 d .第 i 个环用 C_i 表示,环 C_i 是包括到 sink 的距离在 $(i-1)$ 至 i 个单位传输距离之间的节点.因此有:

$$m = R/d \quad (4)$$

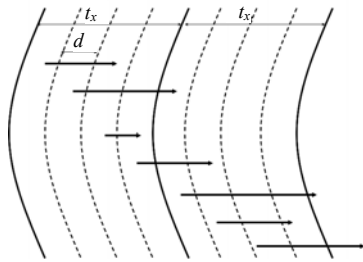


Fig.1 Adjustable transmission ranges

图 1 可调的传输距离

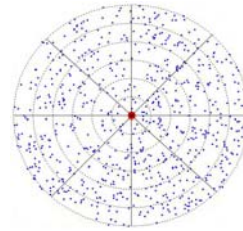


Fig.2 Concentric coronas

图 2 同心环

假设同一环内的所有节点采用相同的传输距离,称为该环的传输距离,而不同环的节点可以采用不同的传输距离.因此,当一个环的传输距离是 i 个单位传输距离时,其传感器的传输距离为

$$i \times d = i \times (t_x / k) \quad (5)$$

在环模型下,环之间的数据转发有两种方式:

1) $k=1$,环 C_i 中的每个节点为环 C_{i+1} 中节点的下一跳提供服务.图 3(a)是从最外环一个节点到 sink 的一条路径,传输的每一跳都是到相邻环的节点中.文献[1,8]就是基于这样的方式;

2) $k>1$,每个环中的节点不一定是其相邻外环传输数据的下一跳,一个数据包在一跳中的传输可能会跳过多个环.图 3(b)就是这种方式下的一种数据传输路径.各环的传输距离组成的序列称为传输距离序列 (transmission range list,简称 TRL).

本文基于第 2 种方式来讨论通过采用恰当的传输距离序列来延长网络寿命.

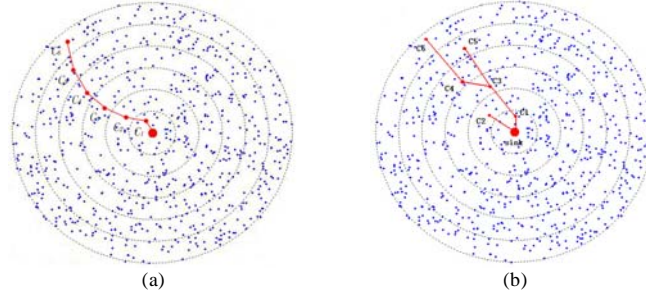


Fig.3 Two relationships of data forwarding among coronas
图 3 环之间数据转发的两种方式

2.4 问题分析

x_i 表示环 C_i 中节点的传输距离,以 d 为单位,向量 $\vec{x}=[x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ 表示网络中所有 m 个环的传输距离序列,
 $1 \leq x_i \leq k$, 其中 $k = t_x / d$ (6)

S_i 表示直接发送数据到环 C_i 的所有环的序号组成的集合,即,
 $S_i = \{k \mid k - x_k = i, k = 1, 2, \dots, m\}$ (7)

N_i 表示环 C_i 中的节点个数,从而得到 m 个环节点数向量,
 $\vec{N}=[N_1, N_2, \dots, N_m]^T$ (8)

根据第 2.2 节的能量公式,环 C_i 传输自己产生的数据所消耗的能量是
 $E_{trans i}(\vec{x}) = N_i L[\beta_1 + \beta_2(x_i d)^\alpha]$ (9)

每个环除了要传输自己环内产生的数据以外,还要转发外环生成的数据, $N_{rec i}(\vec{x})$ 表示产生的数据要在环 C_i 转发的外环节点总数,称为环 C_i 的接收节点数,因此,

$$N_{rec i}(\vec{x}) = \begin{cases} \sum_{j \in S_i} (N_j + N_{rec j}), & \text{if } S_i \neq \emptyset \\ 0, & \text{if } S_i = \emptyset \end{cases} \quad (10)$$

根据式(7)和式(10)可以看出,每个 $N_{rec i}$ 是由序号大于 i 的所有 x 决定的.从而得到 m 个环的接收节点数向量,

$$\vec{N}_{rec}(\vec{x}) = [N_{rec 1}(\vec{x}), N_{rec 2}(\vec{x}), \dots, N_{rec m}(\vec{x})]^T \quad (11)$$

环 C_i 转发外环的数据消耗的能量包括两部分,即接收数据消耗的能量和发送数据消耗的能量.根据第 2.2 节的能量公式,环 C_i 中转发外环生成的数据时所消耗的总能量是

$$E_{forward i}(\vec{x}) = N_{rec i}(\vec{x}) L[\beta_1 + \beta_2(x_i d)^\alpha + \beta_3] \quad (12)$$

$E_i(\vec{x})$ 表示单位时间里环 C_i 消耗的总能量,包括了发送自己产生的数据消耗的能量和转发外环数据消耗的能量,因此有,

$$E_i(\vec{x}) = E_{trans i}(\vec{x}) + E_{forward i}(\vec{x}) \quad (13)$$

代入式(9)、式(12),有,

$$E_i(\vec{x}) = N_i L[\beta_1 + \beta_2(x_i d)^\alpha] + N_{rec i}(\vec{x}) L[\beta_1 + \beta_2(x_i d)^\alpha + \beta_3] \quad (14)$$

$W_i(\vec{x})$ 表示环 C_i 的 ECR(per node energy consuming rate)^[1,7],因此有,

$$W_i(\vec{x}) = \frac{E_i(\vec{x})}{N_i} \quad (15)$$

代入式(14),有,

$$W_i(\vec{x}) = L[\beta_1 + \beta_2(x_i d)^\alpha] + \frac{N_{rec i}(\vec{x})}{N_i} L[\beta_1 + \beta_2(x_i d)^\alpha + \beta_3] \quad (16)$$

从而得到 m 个环的 ECR 向量函数,

$$\vec{W}(\vec{x}) = [W_1(\vec{x}), W_2(\vec{x}), \dots, W_m(\vec{x})]^T \quad (17)$$

$T_i(\vec{x})$ 表示环 C_i 的寿命, 因此有,

$$T_i(\vec{x}) = \frac{\varepsilon N_i}{E_i(\vec{x})} \quad (18)$$

代入式(14), 有,

$$T_i(\vec{x}) = \frac{\varepsilon N_i}{N_i L[\beta_1 + \beta_2(x_i d)^\alpha] + N_{rec_i}(\vec{x}) L[\beta_1 + \beta_2(x_i d)^\alpha + \beta_3]} \quad (19)$$

因此, 环 C_i 的 ECR 与其寿命之间的关系式有,

$$T_i(\vec{x}) = \frac{\varepsilon}{W_i(\vec{x})} \quad (20)$$

从而得到 m 个环的生命时间向量函数,

$$\vec{T}(\vec{x}) = [T_1(\vec{x}), T_2(\vec{x}), \dots, T_m(\vec{x})]^T \quad (21)$$

根据网络寿命的定义, 可以看出网络寿命就是集合 $\{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ 中的最小值.

根据以上公式, 可以看出有 3 个因素影响 $\vec{W}(\vec{x})$ 或 $\vec{T}(\vec{x})$, 分别是 \vec{N} , $\vec{N}_{rec}(\vec{x})$ 和 \vec{x} . 其中 \vec{N} 是由节点分布而决定的, $\vec{N}_{rec}(\vec{x})$ 是由 \vec{x} 决定的, 因此, 当节点部署后, 影响网络寿命的因素只有一个, 即各环的传输距离 \vec{x} . 因此, 为了能够延长网络寿命, 即最大化 $\vec{T}(\vec{x})$, 就需要寻找最优的传输距离序列 \vec{x} .

定理 1. 搜索最优的传输距离序列 \vec{x} 是一个 NP 难问题.

证明: 为了能够证明定理 1, 先需要证明搜索最优的传输距离序列是多目标优化问题(MOP), 因为根据文献[14]可知 MOP 是 NP 难问题. 所以下面我们首先给出 MOP 的定义, 通过对比前文能量洞问题的数学描述, 就能证明搜索最优的传输距离序列是多目标优化问题, 从而得知定理成立. \square

定义 2(多目标优化问题)^[15]. 寻找向量 $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ 使得满足 m 个不等式约束:

$$g_i(\vec{x}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

以及 p 个等式约束:

$$h_i(\vec{x}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, p.$$

需要优化的向量函数:

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]^T,$$

其中向量 $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 是该向量函数的决定变量.

本节可以看出, 解决“能量洞”问题延长网络寿命就需要最大化向量函数 $\vec{T}(\vec{x})$, 根据等式(19), 向量函数 $T_i(\vec{x})$ 是由 N_i , $N_{rec_i}(\vec{x})$ 和 x_i 决定的. 根据式(10), 每个 N_{rec_i} 是由所有序号大于 i 的 x 所决定的. 向量 \vec{x} 满足不等式关系(6), 根据式(7)、式(10)、式(19)可以看出, 向量 \vec{x} 不但决定了 \vec{N}_{rec} , 而且还是 \vec{T} 的决定变量, 所以通过 \vec{x} 优化 \vec{T} 的问题是多目标优化问题(MOP). 根据文献[14], 多目标优化问题(MOP)是 NP 难问题. 因此, 通过寻找最优的传输距离序列来解决“能量洞”问题延长网络寿命同样是 NP 难问题.

3 搜索传输距离序列的算法

蚁群优化(ACO)是一种优化算法, 用于对复杂的组合优化问题寻找近似解. 在 ACO 中, 人工蚂蚁通过模拟真实蚂蚁在问题构建图上的移动来寻找解. 它们在图上留下人工信息素以便后面的蚂蚁能够找到更好的解. 基于蚁群优化的路由算法在网络技术中, 特别是无线传感器网络中, 都达到了很好的效果^[16-18]. ACO 算法首次用于解决多目标组合优化问题是以向多个目标赋予优先级为基础的, 例如 Gambardella 等人在文献[19]中提出的用于求解带有时间窗限制的车辆路由问题的双蚁群方法. 因此, 本文提出了一种基于蚁群优化的算法寻找最优的传输距离序列来解决“能量洞”问题以延长网络寿命.

如图 4 所示, 选择任意一个扇区 W , 其夹角为 θ . 将 W 分成 m 个子环, 分别为 C_1, C_2, \dots, C_m , 位于 m 个以 sink 为

圆心的同心圆之间,其半径单调递增,分别为 $r_1 < r_2 < \dots < r_m = R$. 假设 $r_0 = 0$ 且对应的 C_0 为 sink. 每个子环选择一个传感器节点作为“环头(corona-head)”,用于决定该环内所有节点的传输距离.

环头的选择过程如下:

- (1) 最外环 C_m 随机地选择一个点作为该环的环头 H_m ;
- (2) H_m 以传输半径 d 向内环发送内容为 head 的消息,在环 C_{m-1} 中 H_m 通信范围内的节点里随机选择一个节点接收该消息,并将该节点作为环 C_{m-1} 的环头 H_{m-1} ;
- (3) 同样地, H_{m-1} 也以传输半径 d 向内环发送 head 消息以确定环 C_{m-2} 的环头 H_{m-2} ,如此传递 head 消息,从而确定各个环的环头 H_m, H_{m-1}, \dots, H_1 .

环头的作用是在算法优化时间 t_0 结束后,统一环内节点的传输距离,通过 flooding 的方式通知环内各节点新的传输距离. 广播数据很短,仅包括环号和传输距离,所以能耗非常小.

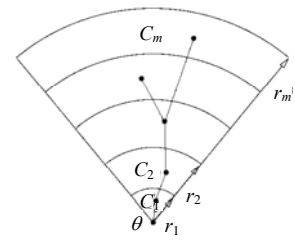


Fig.4 A sector W and the associated sub-coronas

图4 扇区 W 和相应子环

3.1 构建图

每个节点有 k 个传输距离等级可选, $1d, 2d, \dots, kd$, 因此,每个环内的传感器节点可选择的数据传输下一跳的环就有 k 种. 图 5(a)是在 $k=2$ 的情况下,根据各环不同的传输距离组成的可选择的传输路径,从而得到相应的完全连接图,在 ACO 中被称作构建图(construction graph),如图 5(b)所示. 构建图中的点表示每个子环,而如果环 C_i 的节点能够传输数据到环 C_j 中,则构建图中从 C_i 到 C_j 就有一条对应的有向边 (C_i, C_j) . 人工蚂蚁就可以在该构建图上通过随机游走(randomized walks)来构建解.

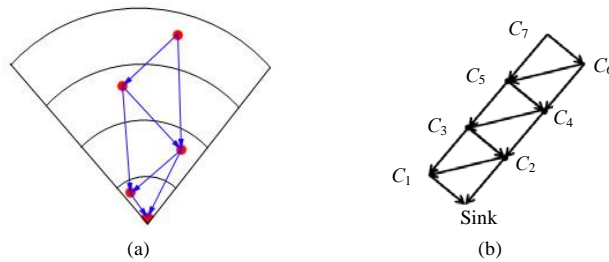


Fig.5 Construction graph

图5 构建图

构建图具有以下性质:

- (1) 环号大于 k 的顶点的出度为 k , 而环号小于等于 k 的顶点的出度等于其环号;
- (2) 最外层的 k 个顶点的入度等于 $(m-i)$ (其中 m 是总环数, i 是环号), 而其他所有顶点的入度均为 k , 包括 sink 节点;
- (3) 任意有向边 $(C_i, C_j) (1 \leq i, j \leq m)$ 满足 $i > j$.

第 3 节讨论了解决“能量洞”问题延长网络寿命就需要寻找最优的传输距离序列 \bar{x} , 所以相应地就转化为从图 5 中的构建图中寻找到以 sink 为根的最优生成树的问题(如图 6 所示).

该生成树具有以下性质:

- (1) 除了 sink 以外,所有顶点的出度均等于 1;
- (2) 所有节点的入度均不超过 k ;
- (3) 树中任意有向边 $(C_i, C_j) (1 \leq i, j \leq m)$ 满足 $i > j$.

因为搜索最优传输距离序列是 NP 难问题, 于是我们提出了一种基于蚁群优化的算法. 在构建图中, 人工蚂蚁从各个顶点出发向 sink 移动, 以探索低能耗的路径.

3.2 基于蚁群优化的算法搜索传输距离序列(AASTRL)

AASTRL 算法中,雇佣了两种蚂蚁:(1) 正向蚂蚁 F_{ant} ,它们是从源节点向 sink 节点移动;(2) 逆向蚂蚁 B_{ant} ,它们是在当正向蚂蚁到达 sink 时由该正向蚂蚁生成的.

各个环 C_i 中的环头 H_i 内都保存了 3 个数据结构(如图 7 所示):

(1) 对应构建图中以该环对应点为始发点的边的信息素表 $R_i, \tau_{i,j}$ 表示以 j 为传输距离的边 (i,r) 上的信息素 (pheromone),其中 i 为始发点的序号, r 为目的点的序号,因此有 $r=i-j$.边 (i,r) 的初始信息素为该环在单位时间内以 j 为传输距离发送自己产生的数据的 ECR 的倒数,即

$$\tau_{i,j}(0) = \frac{1}{W_{i,j}(0)} = \frac{1}{L[\beta_1 + \beta_2(x_i d)^\alpha]} \quad (22)$$

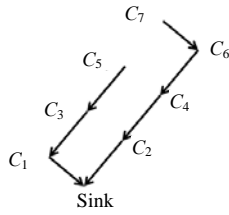


Fig.6 Optimal spanning tree
图 6 最优生成树

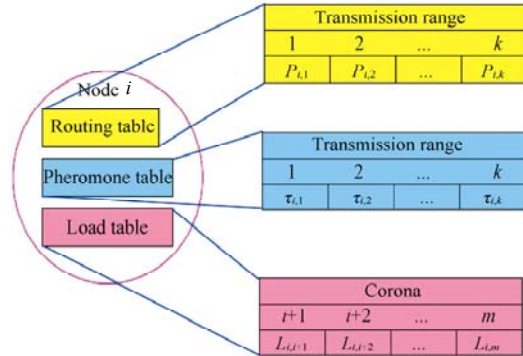


Fig.7 Node structures
图 7 节点结构

每隔 Δt 时间构建图中各边信息素会有一部分蒸发, γ 为蒸发系数.该系数平衡了算法的探索新路径的能力和记忆优秀路径的能力,有:

$$\tau_{i,j} \leftarrow \tau_{i,j} - \gamma \tau_{i,j}, \quad \gamma \in (0,1] \quad (23)$$

(2) 基于不同传输距离路由表 T_i ,记录不同传输距离下的路由概率. T_i 中定义了环 C_i 中环头的路由信息:对于传输距离 j, T_i 保存了其概率值 $P_{i,j}$ 用以表示在当前网络环境下选择传输距离 j 的优劣程度.基于这种概率分布,蚂蚁就能探索新的更好的路由路径.对于每个环,其存储的概率须满足:

$$\sum_{j=1}^k P_{i,j} = 1, \quad i \in [1, m] \quad (24)$$

(3) 外部各环对该环产生的每个节点流量负荷(per node traffic load),用 $L_{i,j}$ 表示,其中 i 表示本环环号, j 表示外环环号.该数据是由网络开始的一轮初始化过程得到的:网络初始一段单位时间内,各环按照数据产生率 l 生成数据,并且以传输距离 d 转发外环数据和本环产生数据至 sink,数据包中需记录源环号.因此,环 C_i 内节点会收到来自环 $C_{i+1}, C_{i+2}, \dots, C_m$ 的数据,由此每个节点包括环头 H_i 都能够分离出外环 $C_{i+1}, C_{i+2}, \dots, C_m$ 对其每个节点的流量负荷,分别用 $L_{i,i+1}, L_{i,i+2}, \dots, L_{i,m}$ 表示.若某一时刻环头 H_i 有 v 只蚂蚁,其中蚂蚁 g_j 按传输距离 u 移动到下一环头,其之前经过的环号组成集合 $path_j = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$,其中 $j_n \leq m-i$,并有对应的 $L_{i,j_1}, L_{i,j_2}, \dots, L_{i,j_n}$.因此,环头 H_i 以传输距离 u 转发蚂蚁 g_j 造成的 ECR 值,可由 u 与所有蚂蚁携带的 L_{i,j_y} 总和得到:

$$W_j = L[\beta_1 + \beta_2(ud)^\alpha] + \left(\sum_{j=1}^v \sum_{j_y \in path_j} L_{i,j_y} \right) \cdot L[\beta_1 + \beta_2(ud)^\alpha + \beta_3] \quad (25)$$

蚂蚁按照如下步骤来建立路径:

(1) 每隔 Δt 时间,各环头节点 s 就有一只正向蚂蚁 F_{ant} 朝 sink 出发.正向蚂蚁携带与普通数据流相同的数据包,所以它们遇到的流量负载也是相同的.其实蚂蚁的实现就是在普通的数据包中添加少量的几位数据,用以记

录传递过程中的情况,因此,传递蚂蚁的开销是可以忽略不计的.

(2) 在向 sink 前进的过程中,蚂蚁保存了其经过的环在当前情况下的 ECR 值.蚂蚁 g 将每个访问过的节点 r 和对应的 ECR 值都压入其记忆栈 $S_i(g)$ 中.

(3) 在每个节点 r 上,各蚂蚁在可以到达的没有访问过的内环头节点中随机选择下一个要访问的节点 t ,如果所有的相邻节点都访问过,则在它们全体中选择.选择相邻节点 t 作为下一遍历节点的概率 $P_{i,j}$ 是由每个传输距离对应的信息素 $\tau_{i,j}$ 和启发值 η_{ij} 计算出来的,其中启发值 η_{ij} 等于各边对应的传输距离(以 d 为单位):

$$P_{i,j} = \frac{\tau_{i,j}^a \eta_{i,j}^b}{\sum_{l=1}^k (\tau_{i,l}^a \eta_{i,l}^b)} \quad (26)$$

其中, a 和 b 是两个参数,它们分别决定了信息素和启发式信息的相对影响力.因为所有蚂蚁都是从大序号的环移动到大序号的环,所以它们的路径中不会有回路.

(4) 到达 sink 后,正向蚂蚁 F_{ant} 将生成另一个逆向蚂蚁 B_{ant} ,它把自己所有的记忆转移给逆向蚂蚁,而自身将被删除.

(5) 逆向蚂蚁 B_{ant} 行进的路径与和它对应的正向蚂蚁完全相同,但是行进的方向却正好相反.逆向蚂蚁到达路径中的节点 r 时就更新其信息素.逆向蚂蚁不携带任何数据包,它们具有更高的优先级,因为它们的任务是要快速地传递正向蚂蚁收集的信息.更新的信息素增量等于对应的正向蚂蚁收集的其经过的各个环的 ECR 值之和的倒数,即

$$\Delta\tau = \frac{1}{\sum_{(i,(i-j)) \in path_g} W_{i,j}} \quad (27)$$

(6) 从相邻节点 f 到达节点 r 后,逆向蚂蚁更新边 (r,f) 的信息素:

$$\tau_{r,(r-f)} \leftarrow \tau_{r,(r-f)} + \Delta\tau, (r,f) \in path_g \quad (28)$$

通过增加信息素 $\tau_{i,j}$ (即选择相邻节点 f 的信息素) 的值和使用规格化来减少其他信息素,从而更新路由表 T_r ,而这种更新方法取决于正向蚂蚁遍历对收集的能量消耗的好坏的评估.当网络运行完优化时间 t_0 后,环 C_i 的环头 H_i 根据其路由表 T_i ,选择概率最大的传输距离作为该环的传输距离,并通知环内所有节点,从而确定了整个网络的传输距离序列.

定理 2. 在 AASTRL 算法中,构建图上由环头 H_i 产生的蚂蚁的数量至多为 i 只.

证明:首先给出构建图上由 H_i 产生的蚂蚁的数量为 i 只的情况.因为每隔 Δt 时间, H_i 产生一只蚂蚁,若由 H_i 产生的蚂蚁移动每一跳均选择传输距离为 1 的边,那么经过时间 $(i-1) \cdot \Delta t$ 后, $(i-1)$ 个内环上均有一只由 H_i 产生的蚂蚁,加上 H_i 上刚产生的蚂蚁,整个构建图上一共有 i 只由 H_i 产生的蚂蚁.

下面用反证法证明由 H_i 产生的蚂蚁的数量不超过 i 只.假设构建图上由 H_i 产生的蚂蚁的数量有 j 只,且 $j > i$. 因为从环 C_j 到环 C_1 的最远距离为 $(i-1)$ 跳,因此,由 H_i 产生的蚂蚁在构建图上存在的最长时间为 $(i-1) \cdot \Delta t$. 那么任意时刻在构建图上由 H_i 产生的蚂蚁存在的时间有 $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (i-1) \cdot \Delta t$ 这 i 种情况.然而前面假设构建图上由 H_i 产生的蚂蚁的数量有 j 只,且 $j > i$,根据鸽笼原理,至少有两只蚂蚁存在的时间是相同的,换句话说,这两只蚂蚁是在同一时间由 H_i 产生的.这与算法中规定的每隔 Δt 时间各环头仅一只蚂蚁向 sink 出发的要求相矛盾.因此命题得证. \square

定理 3. AASTRL 算法的时间复杂度上限为 $O(N_T k \cdot m^2)$, 其中 N_T 为算法的时间间隔次数.

证明:在 AASTRL 算法中,每隔 Δt 时间,所有蚂蚁都需要寻找下一跳节点,而每只蚂蚁至多有 k 种选择.假设所有 m 个环头上共有 z 只蚂蚁,因此,在时间间隔 Δt 内,算法的时间复杂度上限为 $O(k \cdot z)$,从而整个算法的时间复杂度上限为 $O(N_T k \cdot z)$. \square

下面讨论 z 的上限.根据定理 2 可知,构建图上由 H_i 产生的蚂蚁的数量至多为 i 只.因此蚂蚁总数 z 的上限为 $z_{\max} = 1 + 2 + \dots + m = \frac{m \cdot (m + 1)}{2}$, 所以整个算法的时间复杂度上限为 $O(N_T k \cdot m^2)$.

4 仿真实验

基于第 2 节的能量模型对本文提出的 AASTRL 算法进行仿真实验.考虑两种节点分布情况:(1) 均匀节点分布,节点出现在任何地方的概率都是相同的;(2) 均匀随机节点分布,各环内节点分布的概率是相同的,但不同环的节点分布概率是随机的.

4.1 仿真环境

仿真参数见表 1.每个传感器节点的初始能量(ε)为 50J;传感器节点的最大传输距离(t_x)为 20m;划分最大传输距离的等级数(k)为 4;每个传感器节点每秒钟产生和发送数据大小(L)为 4×10^2 bits;节点分布密度为每平方米 5 个节点;能量消耗公式(1)中的参数 α 取值为 4,其他参数按照第 2.2 节的设置.在 AASTRL 算法中,优化时间(t_0)为 1 000s;间隔时间(Δt)为 0.1s;蒸发系数(γ)取值 0.05;参数 a 和 b 分别取值为 1 和 0.3.

Table 1 Simulation parameters

表 1 实验参数

Parameter		Value
Initial energy of each node (ε)		50J
Maximum transmission range (t_x)		20m
Number of transmission range levels (k)		4
Length of unit data (L/s)		4×10^2 bits
Density (ρ)		$5/\text{m}^2$
Energy model	α	4
	β_1	45×10^{-9} J/bit
	β_2	10^{-15} J/bit/m ⁴
	β_3	135×10^{-9} J/bit
AASTRL	t_0	1000s
	Δt	0.1s
	γ	0.05
	a	1
	b	0.3

从 3 个方面进行仿真实验:(1) 以一次蚁群优化过程为例,展示其在整个优化过程中各边的概率变化;(2) 将本文提出的算法与其他算法针对不同情况进行比较,包括理想的最优网络寿命和其他文献的算法,并且每种情况都进行了 100 次以上的实验;(3) 讨论 AASTRL 的参数对算法性能的影响.

4.2 边概率变化

根据表 1 的参数,实验考察 12 个环的无线传感器网络在均匀节点分布情况下的不同环上各个传输距离概率的收敛变化情况.图 8 显示了环 C_4, C_7, C_{10} 和 C_{12} 的 4 种传输距离的概率在 1 000s 时间内的变化情况.可见,在蚁群优化过程中,越往外的环概率收敛得越慢,特别是环 C_{12} ,优化过程中概率的震荡幅度也是最大的.这是由于内环(如环 C_4)靠近 sink,路径的选择也比较少,能够在较早的时间内通过对局部网络流量的学习而确定自己的传输距离.而外环则需要在内环的传输距离被确定之后,才能确定自己的传输距离,以适应内环的路由结构.

4.3 与其他算法比较

由于现有的无线传感器网络的文献中还没有提出用优化算法来解决能量洞问题,所以为了能够测试本文提出的算法的性能,就只能将算法与已有的非优化算法进行比较.实验将 AASTRL 算法与另外两种算法进行了比较:(1) Optimal list,最优传输距离序列,通过穷举所有可能的传输距离序列,比较选择网络寿命最长的序列作为最优序列,因此,该序列一定是当前网络下传输距离序列的最优解;(2) T_x ,文献[1]提出的算法是各边均采用最大传输距离,该算法只用于均匀节点分布的情况.实验仿真了节点均匀分布情况下,这 3 种策略的平均网络寿命,考虑到 T_x 算法的要求,传感器最大传输距离采用 5m.

对不同环数的网络的寿命进行了实验比较,结果如图 9(a)所示.可以看出,本文提出的 AASTRL 算法下的网络寿命接近于理想的最优序列,且明显优于 T_x 算法.图 9(b)显示了网络在不同算法下的平均能量剩余率.网络能量剩余率是指当网络生命结束时,整个网络剩余的能量总和与网络初始时网络总能量的比率.可以看

出,AASTRL 算法下的网络接近于最优情况网络的剩余能量率,且与 T_x 算法相比,较大程度地提高了能量利用率,从而延长了网络寿命.

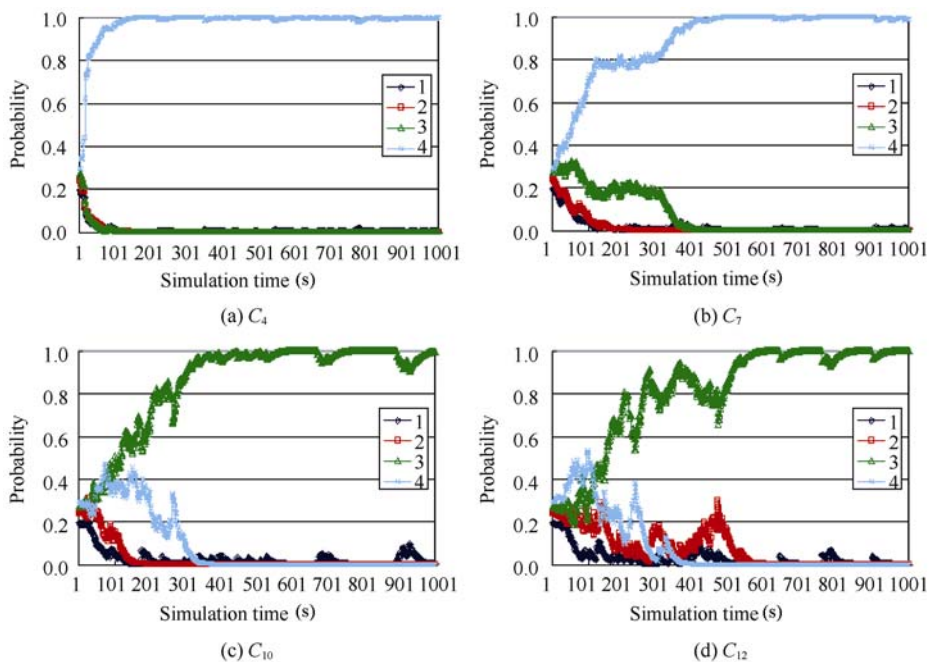


Fig.8 Probabilities variation of different transmission range of each corona in 12 coronas

图 8 12 个环的网络各环各边传输距离概率变化情况

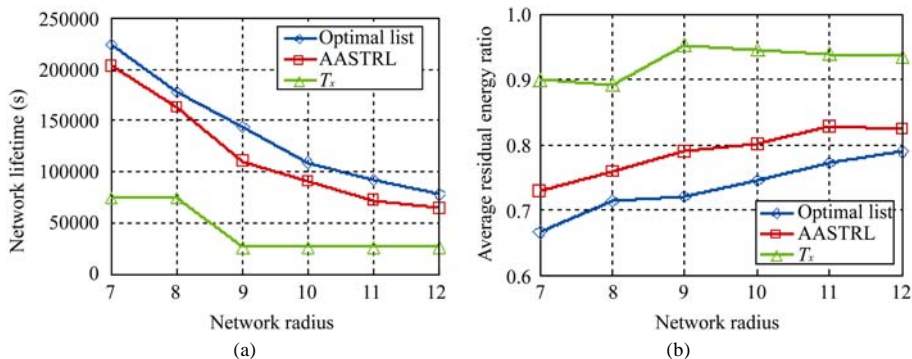


Fig.9 Network lifetime and average residual energy ratios of different algorithms

图 9 不同算法下的网络寿命和网络平均剩余能量率

图 10 显示的是 100 次不同的均匀随机节点分布下的传感器网络,在每种分布情况下,AASTRL 算法的 100 次实验结果的均值作为该算法在这种情况下得到的平均网络寿命,其与最优序列的网络寿命的比值在不同分布情况下的实验结果如图 10 所示,分别考察了环数为 8 和 10 两种情况.可以看出,在均匀随机分布情况下,AASTRL 的结果与理想最优网络寿命很接近,且波动较小,85%以上的结果大于 0.8.可见 AASTRL 不仅适应于节点均匀分布的情况,而且在节点随机均匀分布的情况下效果同样很好.

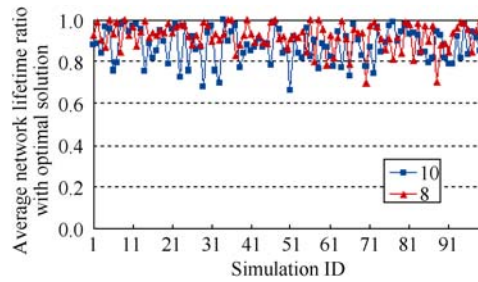


Fig.10 Network lifetime ratio with optimal solution in uniform random node distribution

图 10 均匀随机节点分布情况与最优序列的平均网络寿命比率

前面的实验都是针对环数小于 12 的小规模网络,然而在大规模的网络下难以穷举所有可能的传输距离序列,因此只能将 AASTRL 算法与现有的算法进行比较.在均匀节点分布的情况下我们将 AASTRL 与 T_x 进行比较实验,图 11 显示了两种算法下的网络随着环数的增加其生命时间和平均能量剩余率的变化.可以看出,与图 9 相似,在大规模的网络下 AASTRL 算法获得的网络寿命和平均能量剩余率都明显优于 T_x 算法.

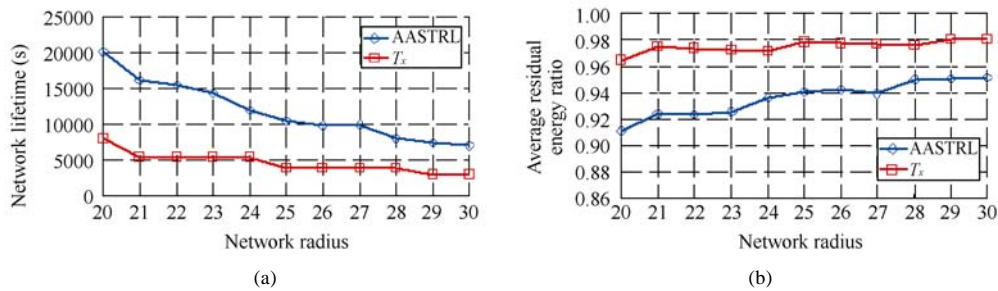


Fig.11 Network lifetime and average residual energy ratios of different algorithms with more than 20 coronas

图 11 不同算法下的 20 环以上网络的寿命和平均剩余能量率

由于文献[1]提出的 T_x 算法中各节点均采用最大传输距离,然而 AASTRL 算法需要经过一段优化时间才能计算出各环内节点应当采用的传输距离,我们从 3 个方面来分析 AASTRL 算法的优化时间对整个网络的影响:(1) AASTRL 在优化时间过后固定了各环内节点的传输距离,以后不再调整;(2) 从图 9(a)和图 11(a)可以看出,算法的这段优化时间与整个网络的寿命相比,所占的比例是很小的;(3) 在第 3.2 节讨论过传递蚂蚁的开销是可以忽略不计的,因此算法本身消耗的能量是非常小的,即对网络寿命的影响也可以忽略不计;(4) 从图 9(a)和图 11(a)可以看出,算法以这段优化时间为代价,使得网络寿命与 T_x 相比有明显提高,AASTRL 能够通过付出一段优化时间为代价可以换来更长的网络寿命.因此,可以看出 AASTRL 算法是优于 T_x 算法的.

文献[8]提出了一种非均匀的节点分布策略以实现最大的能量利用率,即从环 C_{R-1} 到最内环 C_1 中的节点数按比率为 $q>1$ 的几何级增长,并且在环 C_R 中有 $N_{R-1}/(q-1)$ 个节点,其提出的 q -Switch 路由协议中各传感器节点均采用最大传输距离.作者利用这种分布策略结合 q -Switch 路由协议实现了网络的次平衡能量消耗,使得网络寿命达到最优.因此我们在该决定性的分布策略下将 AASTRL 与 q -Switch 比较,以测试 AASTRL 在非均匀节点分布情况下大规模网络中的性能.因为在文献[8]中采用的环模型中环的宽度为最大传输距离 t_x ,而 AASTRL 算法是基于本文提出的分级环模型,因此为了公平比较,我们将文献[8]中的非均匀节点分布策略转化为在分级环模型下,即将环宽为 t_x 的环分为 k 个子环,从外向内,每 k 个子环为一组,每组环之间的节点数比例关系仍然按照文献[8]中的分布策略,相同组内各子环节点数相同.本实验中的参数设置: $q=2$,最外面 4 个环的节点数均为 20.以 12 个环的网络为例,环 C_8 到环 C_5 中的节点数为 20,环 C_4 到环 C_1 中的节点数为 40.实验结果如图 12 所示.可以看出,无论是网络寿命(如图 12(a)所示),还是能量剩余率(如图 12(b)所示),AASTRL 算法都接近于 q -Switch

下的最优值,这说明该算法在非均匀节点分布情况的大规模网络下适应性很强.虽然 *q-Switch* 的性能更优越,但其局限于文献[8]的非均匀节点分布策略,这种分布策略对节点部署的代价太高.因此从图 11 和图 12 的实验中可以看出,AASTRL 算法不受节点分布策略的影响,在大规模网络下的性能同样优秀.

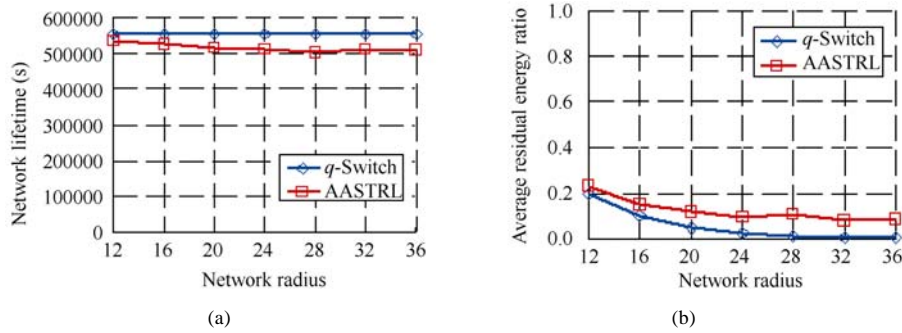


Fig.12 Network lifetime and average residual energy ratios with non-uniform deterministic node distribution

图 12 决定性的非均匀节点分布情况下的网络寿命和平均剩余能量率

4.4 算法参数对性能的影响

实验考察在节点均匀分布情况下,蚁群优化算法中的不同蒸发系数下的平均网络寿命与 Optimal list 的理想网络寿命的比率变化情况,结果如图 13 所示.可以看出,蒸发系数为 0.05 时算法的效果最好.当 $\gamma=0.01$ 时,信息素的蒸发效果比较弱,蚂蚁难以在整个搜索过程中探索其他不同的路线,具有较差的探索性.当 $\gamma=0.1$ 时,蒸发系数过大,信息素就不能很快积累起来,这种正反馈机制就会由于信息素的蒸发而受到抑制.

图 14 是 30 个环的传感器网络在节点均匀分布情况下,并比较了优化时间 t_0 分别为 10^2 s 和 10^3 s,即 10^3 和 10^4 次时间间隔(Δt)两种情况,每种情况各做了 100 次实验得到的网络寿命.可以看出,虽然每次的时间不同,但波动比较小,同时, t_0 的增加对实验结果也有一定的提升.

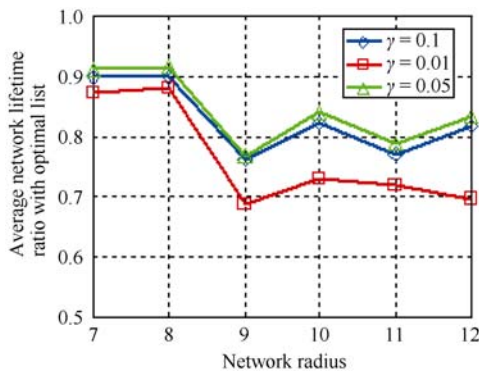


Fig.13 Average network lifetime ratio with optimal list in uniform node distribution

图 13 均匀节点分布情况与最优序列的平均网络寿命比率

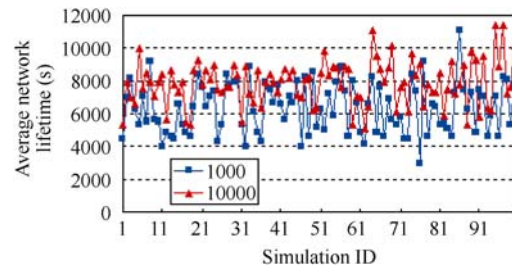


Fig.14 Network lifetime in 30 coronas with different optimizing time

图 14 不同 t_0 下 30 环的网络寿命

蚂蚁产生率是指每个间隔时间 Δt 内各节点产生蚂蚁的数量,下面我们讨论 AASTRL 算法中蚂蚁产生率与算法收敛性的关系,蚂蚁产生率分别为间隔时间 Δt 内各节点产生 1,2,5 和 10 只蚂蚁.实验中每个环中选择各传输距离中最大的概率值作为该环的最大概率值,记录所有环的最大概率值中的最小值作为整个构建图中的最小概率值.我们对 10 个环的网络中在不同蚂蚁产生率下构建图的最小概率值随着优化时间的变化进行了实验,结果如图 15 所示.可以看出,蚂蚁产生率为 1 时的收敛效果最好,最小概率值在最短的时间内能够收敛到接近于

1,同时我们发现蚂蚁产生率越高,同时间内蚂蚁反馈信息的数量也随之增加,相互影响使得算法的收敛速度减慢.

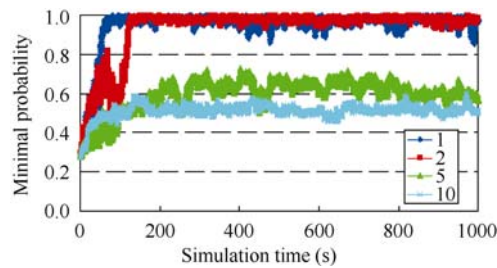


Fig.15 Changes of minimal probability with different ants generating rates

图 15 不同蚂蚁产生率下最小概率的变化

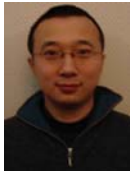
5 结束语

“能量洞”现象的本质在于环之间接力转发数据的关系,使得接近 sink 的节点网络流量较大,从而会较早地消耗完能量.通过分析发现,不同区域采用的不同传输距离是影响网络寿命的本质因素,所以本文从传输距离序列入手,提出了基于蚁群优化的分布式算法,通过搜索各环适合的传输距离来延长网络的生存时间.实验表明,该算法能够有效延长网络寿命,并接近于理想的最优网络寿命,而且在非均匀节点分布情况下的性能同样优秀.

References:

- [1] Olariu S, Stojmenovic I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting. In: Domingo-Pascual J, ed. Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Communications Society, 2006. 1–12.
- [2] Lian J, Naik K, Agnew G. Data capacity improvement of wireless sensor networks using non-uniform sensor distribution. Int'l Journal of Distributed Sensor Networks, 2006,2(2):121–145.
- [3] Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002,1(4):660–670.
- [4] Ingelrest F, Simplot-Ryl D, Stojmenovic I. Target transmission radius over LMST for energy-efficient broadcast protocol in ad hoc networks. In: Viginier P, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2004). New York: IEEE Communications Society, 2004. 4044–4049.
- [5] Mhatre V, Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: Communication, clustering and aggregation. Ad Hoc Networks, 2004,2(1):45–63.
- [6] Wadaa A, Olariu S, Wilson L, Eltoweissy M, Jones K. Training a wireless sensor network. Mobile Networks and Applications, 2005,10:151–168. <http://www.springerlink.com/content/ad502be039ef65dd/>
- [7] Li J, Mohapatra P. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problems in sensor networks. Pervasive and Mobile Computing, 2007,3(3):233–254.
- [8] Wu XB, Chen GH, Das SK. Avoiding energy holes in wireless sensor networks with nonuniform node distribution. IEEE Trans. on Parallel and Distributed System, 2007,19(5):710–720.
- [9] Shiue HY, Yu GJ, Sheu JP. Energy hole healing protocol for surveillance sensor networks. In: Proc. of the Workshop on Wireless, Ad Hoc, and Sensor Networks (WASN). 2005. <http://wireless.mcs.au.edu.tw/~yugj/publication/publication-Yu.htm>
- [10] Olariu S, Wadaa A, Wilson L, Eltoweissy M. Wireless sensor networks: Leveraging the virtual infrastructure. IEEE Network, 2004,18(4):51–56.
- [11] Jarry A, Leone P, Powell O, Rolim J. An optimal data propagation algorithm for maximizing the lifespan of sensor networks. In: Gibbons P, ed. Proc. of the Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 405–421.

- [12] Bettstetter C. On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network. In: Hubaux JP, ed. Proc. of the ACM MobiHoc. New York: ACM Press, 2002. 80–91.
- [13] Karp B, Kung HT. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: Pickholtz R, ed. Proc. of the ACM MOBICOM. New York: ACM Press, 2000. 243–254.
- [14] Mouzon G, Yildirim MB. Genetic algorithm to solve a multi-objective scheduling problem. In: Eichhorn DM, ed. Proc. of the 3rd Annual GRASP Symp. Wichita: Wichita State University, 2007. 45–46.
- [15] Coello Coello CA. Evolutionary multi-objective optimization and its use in finance. In: Handbook of Research on Nature Inspired Computing for Economy and Management. Hershey: Idea Group Publishing, 2006. <http://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/2006.html>
- [16] Caro GD, Dorigo M. AntNet: Distributed stigmergetic control for communications networks. Journal of Artificial Intelligence Research, 1998,9:317–365. <http://public.jair.fetch.com/papers/paper530.html>
- [17] GhasemAghaei R, Rahman MA, Gueaieb W, Saddik AE. Ant colony-based reinforcement learning algorithm for routing in wireless sensor networks. In: Proc. of the Instrumentation and Measurement Technology Conf. 2007. 1–6. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4258155
- [18] Okdem S, Karaboga D. Routing in wireless sensor networks using ant colony optimization. In: Stoica A, ed. Proc. of the 1st NASA/ESA Conf. on Adaptive Hardware and Systems. Washington: IEEE Computer Society, 2006. 401–404.
- [19] Gambardella LM, Taillard É, Agazzi G. MACS-VRPTW: A multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows. In: Corne D, Dorigo M, Glover F, eds. New Ideas in Optimization. London: McGraw Hill, 1999. 73–76.



宋超(1981—),男,四川成都人,博士生,主要研究领域为无线传感器网络.



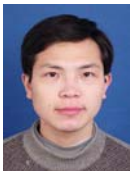
陈贵海(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为分布式与并行计算.



刘明(1973—),男,博士,副教授,主要研究领域为移动计算,传感器网络技术.



王晓敏(1978—),女,博士生,讲师,主要研究领域为计算机网络,移动计算.



龚海刚(1975—),男,博士,副教授,主要研究领域为分布式计算,并行处理.