

基于引力搜索算法的异构无线网络路由分簇算法

毕晓君, 刁鹏飞[†]

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对异构无线网络簇头节点能耗大、网络寿命较低等问题, 提出一种路由分簇算法. 以均衡簇头节点的能耗为目标, 采用引力搜索算法对网络簇头的通信链路进行规划, 从而降低簇头节点间通信的负载能耗. 为同时兼顾普通节点和簇头节点的工作时间, 根据普通节点与高能节点携带能量的差异和簇头节点的负载情况进行分簇. 实验结果表明, 所提出的路由分簇算法相对于目前优化性能较好的粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)和最小距离聚类法(LDC), 在不同检测环境、不同的节点布撒比例下, 能够更好地均衡节点能耗, 从而获得更长的网络寿命.

关键词: 异构无线网络; 路由; 分簇; 引力搜索算法

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Routing and clustering algorithm heterogeneous wireless sensor networks based on gravitational search algorithm

BI Xiao-jun, DIAO Peng-fei[†]

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: A routing and clustering algorithm is proposed for the problem of large energy consumption and low network lifetime of heterogeneous wireless sensor networks. Firstly, in order to balance the energy consumption of cluster head nodes, the gravitational search algorithm is used to optimize the communication link planning so as to reduce the energy consumption of the load of the cluster head nodes. Then the ordinary nodes are divided into clusters according to the energy difference between ordinary nodes and high energy nodes and the load of cluster head nodes. The experiment results show that the proposed routing and clustering algorithm outperform the existing algorithms in terms of various performance metrics including energy consumption and first gateway die.

Keywords: heterogeneous wireless sensor networks; routing; clustering; gravitational search algorithm

0 引言

无线网络(WSNs)是指对目标区域大量布撒传感节点, 从而完成对待监测区域的信息采集. WSNs目前已被广泛应用于环境监测、灾害预警、健康医疗、防御侦查和监视系统等领域^[1-3]. 然而, 由于传感节点的能量有限且无法更换, 整个网络的工作时长受限于节点携带的能量, 只有制定合理的分簇方式才能降低通信过程中节点的能量损耗^[4-5].

针对上述问题, 文献[6]提出了低功耗自适应集簇分层型协议(LEACH)算法, 即根据节点在网络所处的位置及自身剩余能量, 定期选择负责接收转发节点信息的簇头; 文献[7]提出了基于多目标和声搜索的分簇路由算法, 即以节点到基站的距离、簇距离和

网络能耗为优化目标, 采用优化算法对网络进行簇头选举、链路规划及分簇. 然而, 随着节点数目的不断增加, 网络结构趋于复杂化, 这将导致簇头节点的负载能耗逐渐增大, 簇头节点的剩余能量急速下降, 且频繁更换簇头会给网络带来较大的通信开销. 对此, 学者们将研究重心转移到异构无线网络^[8], 即向网络中布撒一定数量的高能节点充当簇头^[9-12], 这种异构网络比同构网络的工作时间更长, 如文献[13]基于簇头节点最短生命周期和节点与簇头的平均距离提出了基于遗传算法的分簇策略, 又以最大簇间通信距离和最大簇间通信次数为目标提出了基于遗传算法的路由通信策略; 文献[14]提出了基于簇头间通信跳数和通信距离的路由算法, 又根据网络剩余能量

收稿日期: 2016-01-25; 修回日期: 2016-05-05.

基金项目: 高等学校博士学科点专项基金项目(20112304110009); 国际科技合作专项(KY10800150002).

作者简介: 毕晓君(1964—), 女, 教授, 博士生导师, 从事信息智能处理技术、智能优化算法、数字图像处理等研究; 刁鹏飞(1987—), 男, 博士生, 从事智能优化算法、无线传感器网络的建模与优化的研究.

[†]通讯作者. E-mail: 398317196@qq.com

和普通节点的传输距离提出了基于粒子群的分簇算法. 以上算法虽然在一定程度上优化了网络的拓扑结构, 延长了网络整体的工作时间, 但随着网络中节点数目的增多, 受优化算法寻优性能、目标函数是否符合延长网络周期的目标等因素的影响, 异构无线传感器网络的寿命仍有待进一步提高.

基于以上分析, 为了降低节点在通信中的能耗, 延长网络生存周期, 本文结合引力搜索算法^[15](GSA)提出了基于GSA的路由分簇算法. 首先, 以簇头节点间的能耗偏差为目标, 采用GSA对其进行优化, 从而均衡簇头节点间的能耗差异; 然后, 根据簇头节点与普通节点的能量差异以及簇头节点的负载情况对普通节点进行分簇. 实验结果表明, 与LDC^[9]、PSO^[14]和GA^[13]协议对比, 本文算法能够有效均衡网络能耗、延长网络的寿命.

1 系统模型

1.1 网络模型

设 N 个普通传感器节点、 M 个高能节点随机分布在一个二维正方形区域内, 各个节点将监测信息发送到基站的过程称为一轮通信. 该传感器网络具有以下性质: 1) 普通传感器的节点集合定义为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$; 2) 作为簇头的高能节点的集合定义为 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_M\}$; 3) d_{\max} 表示节点间通信的最大距离; 4) $\text{dis}(s_i, s_j)$ 表示节点 s_i 与节点 s_j 之间的距离; 5) $\text{link}(g_i)$ 表示簇头节点 g_i 与其他簇头节点或基站的通信集合; 6) $\text{link}(s_i)$ 表示节点 s_i 在其通信范围内与可通信簇头的通信集合; 7) 当簇头与基站的距离小于其通信距离时, 与基站进行单跳通信; 8) 第一个簇头节点死亡时的寿命即网络的工作寿命.

1.2 能耗模型

本文采用简单能量消耗模型^[16], 节点在传输 l bit 信息经过距离 d 的过程中, 发送端能量消耗为

$$E_T(l, d) = \begin{cases} lE_{\text{elec}} + l\varepsilon_{fs}d^2, & d < d_0; \\ lE_{\text{elec}} + l\varepsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0. \end{cases} \quad (1)$$

其中: d_0 为判决阈值, $\varepsilon_{fs}d^2$ 和 $\varepsilon_{mp}d^4$ 为发送每比特数据放大器的能量消耗, E_{elec} 为每比特数据在发送电路和接收电路消耗的能量. 节点接收 l bit 数据时的能量消耗表示为

$$E_R(l) = lE_{\text{elec}}. \quad (2)$$

2 基于GSA的路由分簇算法

在异构无线传感器网络中, 选用高能节点作为网络的簇头节点可延长网络整体的生命周期, 但随着网络中节点数的增多、监测区域的增大, 靠近基站的簇头将接收转发更多的数据包, 这将为其带来较大的能

耗, 即更容易耗尽其自身携带的能量. 因此, 只有设计合理的拓扑结构减小簇头节点的复杂压力才能延长网络的工作时间. GSA是2009年提出的一种新型的启发式群智能优化算法, 具有全局搜索能力强、收敛速度快等优点, 因此本文将引入GSA作为对目标函数的优化算法.

2.1 引力搜索算法

在GSA中, 种群粒子相当于空间中运动的个体, 这些个体在万有引力的作用下彼此吸引、运动, 个体的质量是评价粒子好坏的标准, 质量越大的个体吸引其他粒子的能力越强, 即表示其对应的解更好, 整个种群凭借粒子相互间力的作用相互运动实现信息的共享, 并朝着最优区域展开搜索.

设空间中有 N 个粒子, 第 i 个粒子表示如下:

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^k, \dots, x_i^n), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

其中: n 为搜索空间的维数, x_i^k 为第 i 个粒子在第 k 维上的位置信息. t 时刻两个粒子间的作用力表示为

$$F_{ij}^k(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^k(t) - x_i^k(t)). \quad (4)$$

其中: $M_{aj}(t)$ 和 $M_{pi}(t)$ 分别为粒子 j 和粒子 i 的质量; ε 为一个极小的常量; $R_{ij}(t)$ 为粒子 i 与粒子 j 之间的欧氏距离; $G(t)$ 为 t 时刻的万有引力常数, 其具体定义如下:

$$G(t) = G_0 \times e^{-at/T}. \quad (5)$$

其中: T 为进化参数, G_0 为初始时刻的引力常数. 在 t 时刻, 粒子 i 在 k 维上受到的其他粒子的合力 $F_i^k(t)$ 为

$$F_i^k(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \text{rank}_j F_{ij}^k(t). \quad (6)$$

其中: rank_j 为变化区间在 $[0, 1]$ 之间的随机数, $F_{ij}^k(t)$ 为粒子 j 对粒子 i 在第 k 维上的作用力. 依据牛顿第二定律, 定义 t 时刻粒子 i 在 k 维上的加速度公式为

$$a_i^k(t) = \frac{F_i^k(t)}{M_{ii}(t)}. \quad (7)$$

在进化过程中, 粒子的速度和位置的更新方式为

$$\begin{cases} v_i^k(t+1) = \text{rank}_i \times v_i^k(t) + a_i^k(t), \\ x_i^k(t+1) = x_i^k(t) + v_i^k(t+1). \end{cases} \quad (8)$$

粒子的质量与适应度值有关, 质量越大的粒子越接近最优, 并且它对其他粒子的作用力相应地会更大, 但移动速度较慢. 粒子质量的计算方式为

$$m_i(t) = \frac{f_i(t) - w(t)}{b(t) - w(t)},$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)}. \quad (9)$$

其中: $f_i(t)$ 为粒子 i 的适应度值, $w(t)$ 为质量最小粒子的适应度值, $b(t)$ 为质量最大粒子的适应度值.

2.2 基于GSA的路由算法

网络中簇头采用多跳的方式与基站通信, 由式(1)可知, 簇头 i 与其下一跳节点 j 的通信距离越小, 传输能耗越低, 但簇头 j 将承担来自簇头 i 所在链路的信息传输, 这将增加簇头 j 的能耗. 因此, 这是NP问题, 目前解决NP问题最好的办法是采用优化算法, 如文献[6]提出的基于PSO的路由算法. 然而, 一方面受限于PSO算法自身的寻优能力, 另一方面将簇头节点最大能耗与簇间最大距离联合作为目前函数, 又存在系数较难确定的问题. 基于以上分析, 本文提出基于GSA的路由算法, 具体过程描述如下.

2.2.1 基于GSA路由算法的寻优过程

在 $[0, 1]$ 区间内随机产生 N 个粒子, 设WSNs中有8个簇头节点, 节点集合为 $\{g_1, g_2, \dots, g_8\}$, 粒子维数与簇头节点的个数相同, 每个粒子代表一种路由连接策略, $X_{i,d}$ 表示第 i 个粒子第 d 个簇头在选择下一跳簇头时的概率值.

表2 簇头选择下一跳

| 簇头 | $X_{i,d}$ | $ PNextHops(g_d) $ | $Ceiling(X_{i,d} \times PNextHops(g_d))$ | $NextHops(g_d)$ |
|-------|-----------|--------------------|--|-----------------|
| g_1 | 0.26 | 2 | 2 | g_2 |
| g_2 | 0.86 | 1 | 1 | BS |
| g_3 | 0.91 | 2 | 2 | g_6 |
| g_4 | 0.18 | 2 | 1 | g_3 |
| g_5 | 0.77 | 1 | 1 | g_2 |
| g_6 | 0.12 | 1 | 1 | BS |
| g_7 | 0.47 | 3 | 2 | g_3 |
| g_8 | 0.62 | 2 | 2 | g_3 |

2.2.2 适应度函数

在WSNs中, 网络的寿命取决于簇头节点的寿命, 而网络中簇头节点的总能量是固定的, 因此只有均衡网络能耗差异, 才能保证在网络寿命最大化的前提下, 最小化网络的总能耗. 本文将网络簇头节点的能耗标准差作为算法的目标函数, 具体表示为

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \{\mu_Q - Q(j)\}^2}. \quad (12)$$

其中: σ_Q 为簇头节点在每轮通信中能耗的标准差, m 为簇头节点的个数, $\mu_Q = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Q(j)$ 为簇头节点的能耗均值, $Q(j)$ 为第 j 个簇头节点在每轮通信中的能耗. 簇头节点间通信的能耗有接收其他簇头节点的能耗、发送其他路由簇头节点数据包的能耗和发送本簇内数据包的能耗. $Q(j)$ 的具体表示为

$$Q(j) = E_R N_{IN}(g_i) + (N_{IN}(g_i) + 1) E_T(g_i, NextHop(g_i)). \quad (13)$$

对于每个簇头, 计算与其距离在通信范围内且距离基站更近的簇头点构成的通信列表, 具体表示为

$$g_k = Index(PNextHops(g_d), n). \quad (10)$$

其中: $Index(PNextHops(g_d), n)$ 表示第 g_k 个簇头从其通信链路表 $PNextHops(g_d)$ 中选择第 n 个簇头作为它的下一跳, n 的取值为

$$n = Ceiling(X_{i,d} \times |PNextHops(g_d)|), \quad (11)$$

则簇头节点的通信列表假设如表1所示.

表1 簇头节点通信

| 簇头 | 下一跳 |
|-------|---------------|
| g_1 | $g_3 g_2$ |
| g_2 | BS |
| g_3 | $g_2 g_6$ |
| g_4 | $g_3 g_6$ |
| g_5 | g_2 |
| g_6 | BS |
| g_7 | $g_1 g_3 g_8$ |
| g_8 | $g_1 g_3$ |

如果此时粒子 $X_{i,d}$ 初始化得到的数值为 $[0.26, 0.86, 0.91, 0.18, 0.77, 0.12, 0.47, 0.62]$, 则通信链路表如表2所示.

其中: $N_{IN}(g_i)$ 为簇头 g_i 接收到的来自其他簇头的数据包数目, $(g_i, NextHop(g_i))$ 为簇头 g_i 与它下一跳簇头的距离.

2.3 基于能量的分簇算法

在完成对簇头节点的通信路径规划后, 再对普通节点进行分簇. 由式(1)可知, 普通节点与簇头节点的距离不同, 则每轮通信中的能耗不同, 其工作寿命也会存在差异, 此外接收和融合普通节点发来的信息, 又会为簇头节点带来一定的能耗, 因此分簇的原则是在保证网络寿命最大化的前提下, 最大化每个节点的生命时间. 网络中高能节点和普通节点的不同比例布撒、每个簇头节点所在链路的负载情况以及两种节点所处的位置的不同, 都会影响网络的生存周期, 对此, 本文提出一种基于节点间能耗关系的分簇算法, 具体描述如下.

由式(1)可得 s_i 的理想最大及最小工作时长为

$$\max(lifetime_{s_i}) = ES / (lE_{elec}), \quad (14)$$

$$\min(\text{lifetime}_{s_i}) = \text{ES} / (lE_{\text{elec}} + \varepsilon_{mp} l d_{\text{max}}^4), \quad (15)$$

其中ES为节点 s_i 的初始能量.在不考虑本簇内节点的前提下,簇头节点 g_i 的理想最短及最长工作时长表示为

$$\max(\text{lifetime}_{g_i}) = \text{EG} / ((2n + 1)L), \quad (16)$$

$$\min(\text{lifetime}_{g_i}) = \text{EG} / ((2n + 1)lE_{\text{elec}} + 2nL\varepsilon_{mp}D_{\text{max}}^4). \quad (17)$$

其中:EG为簇头节点 g_i 的初始能量, n 为簇头 i 接收转发其他簇头数据包的个数, L 为数据包的大小.

根据普通节点与簇头节点的理论寿命,本文将节点的分簇方式分为以下几种情况:

1) 若节点 s_i 与其通信列表中的簇头满足

$$\max(\text{lifetime}_{s_i}) < \min(\text{lifetime}_{g_i}),$$

此时节点寿命低于簇头寿命,说明节点将先于其簇头死亡,则将节点连接到与其通信距离较近的簇头上;

2) 若节点 s_i 与其通信列表中的簇头满足

$$\min(\text{lifetime}_{s_i}) > \max(\text{lifetime}_{g_i}),$$

此时簇头的寿命低于节点寿命,说明节点的理论工作时间将高于其簇头,则将节点归类到接收转发数据包较少的簇头上;

3) 若节点 s_i 与其通信列表中的簇头满足

$$\begin{cases} \min(\text{lifetime}_{s_i}) < \max(\text{lifetime}_{g_i}), \\ \max(\text{lifetime}_{s_i}) > \min(\text{lifetime}_{g_i}), \end{cases}$$

此时簇头节点与普通节点寿命相当,应优先考虑簇头节点的寿命,则将节点连接到接收转发数据包较少的簇头上;

4) 若列表中在上述3种情况中的两种或3种,则应在不影响簇头寿命的前提下进行分簇,因此若列表中不存在第1)种情况所述簇头,则按1)进行分簇,否则按2)进行分簇.

2.4 基于GSA的路由分簇算法步骤

设网络中高能节点的个数为 D ,种群规模为 N ,则基于GSA的路由分簇算法的具体操作步骤如下:

Step 1: 根据通信距离得到每个簇头的通信列表.

Step 2: 在 $[0, 1]$ 区间内随机生成算法的初始种群,种群粒子个数为 N ,粒子维数为 D ,初始化GSA算法中的相关参数,最大迭代次数为 T .

Step 3: 通过式(12)计算每个粒子的适应度值,并求出其相应的惯性质量.

Step 4: 由惯性质量求得每个粒子所受合力,进而求得粒子加速度.

Step 5: 更新粒子的速度及位置,并与更新前粒子

的适应度值进行比较并保留最优.

Step 6: 若不满足终止条件则转到Step 2; 否则输出当前最优解,即得到簇头节点的通信路径.

Step 7: 根据通信距离得到每个节点的可连接簇头列表,根据普通节点和其列表中簇头节点的理想工作时长,按2.3节所述方式进行分簇.

3 实验结果与分析

本文所有实验在硬件配置为Intel Core 2 Duo CPU P7570 2.26 GHz、2 G内存、2.27 GHz主频的计算机上进行,开发环境为Matlab2010.b. 设基站位置在(250, 250)时为WSN#1,此时基站位于监测区域中心,簇头节点较易连接到基站,靠近基站的簇头在每轮通信中的能耗压力较小,因此网络寿命相对较长; 基站位置在(500, 250)时为WSN#2,此时基站位于监测区域边缘,每条链路上容易承载较多簇头,靠近基站的簇头能耗较大,网络寿命相对较短.

实验中对比算法为LDC^[9]、PSO^[14]和GA^[13],实验参数如表3所示. 3种算法中的参数采用相关文献给出的数值进行设置,每组实验保证初始的节点布撒场景相同.

表3 参数设置

| 参数 | 取值 |
|--|-----------|
| 目标区域面积/ m^2 | 500 × 500 |
| 普通传感节点数目 | 200 ~ 500 |
| 高能节点数目 | 30, 50 |
| 普通节点初始能量/J | 2.0 |
| 节点间通信半径 d_{max} /m | 150 |
| E_{elec} /(J/bit) | 50n |
| ε_{fs} /(J/bit/ m^2) | 10p |
| ε_{mp} /(J/bit/ m^4) | 0.001 3p |
| d_0 /m | 87.0 |
| E_{DA} /(J/bit) | 5n |
| 数据包大小/bits | 500 |
| 数据大小/bits | 100 |
| G_0 | 100 |
| a | 20 |
| 迭代次数 | 250 |
| T | 1 000 |

3.1 路由算法有效性验证

靠近基站的簇头节点将接收和转发更多的数据包给基站,这将为簇头带来较大的能耗,因此减少簇头接收转发数据包的次数是均衡簇头节点间能耗、延长网络生存周期的关键. 因此,在对网络中的簇头进行路径规划时,首要考虑的是网络中各个链路中簇头节点数目的差异度. 图1和图2给出的是在WSN#1和WSN#2下,区域中布撒30个高能节点时4种算法的路由规划结果,其中黑色圆代表基站,黑色乘号代表簇头节点.

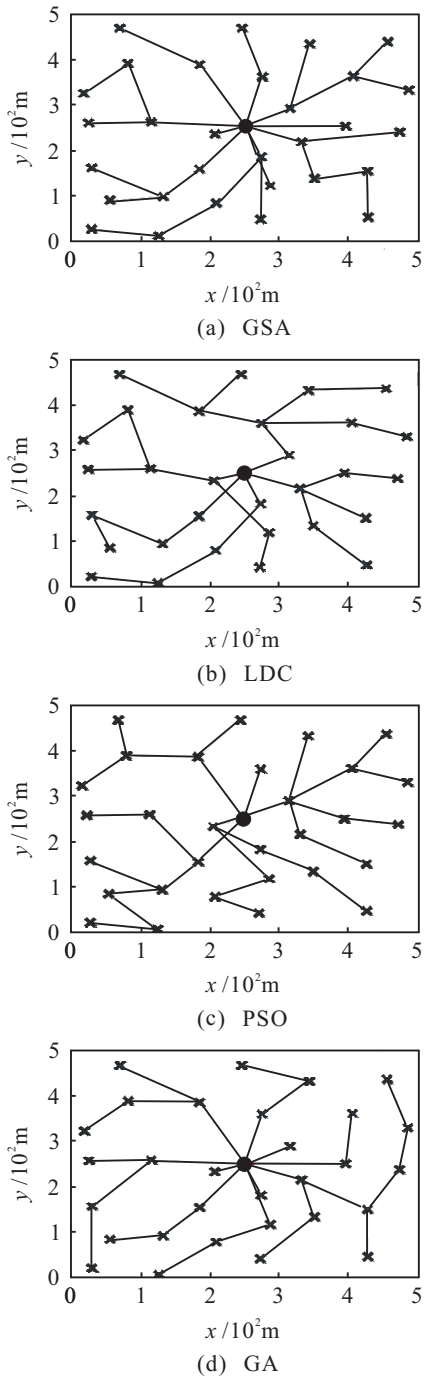


图1 4种算法在WSN#1场景下对簇头通信链路的优化

从图1和图2中可以看出,4种算法均完成了簇头通信的路径规划.在图1中,LDC、PSO和GA算法优化的网络结构中每条链路最多的簇头数分别为9个、9个和8个,而本文算法优化的网络结构中每条链路最多只有5个簇头节点,因此本文算法优化的网络簇头节点的能耗差异最小,即具备更长的网络寿命.在图2中,本文算法优化的网络结构中每条链路最多只有10个簇头节点,LDC、PSO和GA算法优化的路由拓扑结构中每条链路最多的簇头数分别为23个、16个和14个,即本文算法优化的网络结构中簇头节点间的能耗差异最小,网络将具有更长的生存周期.

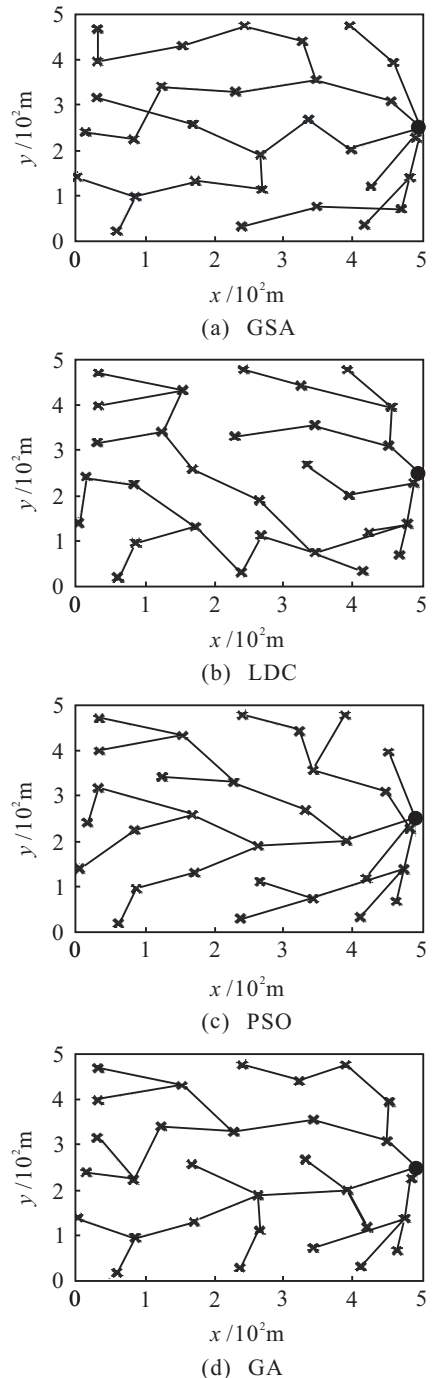


图2 4种算法在WSN#2场景下对簇头通信链路的优化

综上所述,本文提出的路由算法优化的网络相比于对比算法,簇头的负载能耗更低,即具有更长的网络寿命.

3.2 分簇算法有效性验证

为了验证本文所提出的分簇算法的有效性,选择场景WSN#1并随机布撒200~500个普通节点和30个高能节点,通过本文所提出的路由算法实现簇头通信路径规划后,将本文的分簇算法、基于差分算法的分簇算法(DE)、PSO和GA算法分别对网络进行分簇,每组实验运行20次,实验结果如表4所示,其中括号内数值表示20次实验结果的方差.

表4 平均网络生命周期及方差

| 点数 | our | PSO | LDC | GA |
|-----|--------|------------|--------------|-------------|
| 200 | 11 419 | 1 013 (56) | 10 492 (201) | 10 373 (64) |
| 300 | 10 931 | 9 442 (49) | 9 846 (175) | 9 987 (77) |
| 400 | 10 467 | 8 676 (61) | 9 430 (124) | 9 594 (58) |
| 500 | 9 812 | 7 535 (64) | 9 077 (105) | 9 215 (74) |

从表4可以看出,随着节点数目的增多,网络寿命逐渐降低,这是因为网络节点数目的增加给簇头节点带来较大的能量消耗.在不同节点数目下,本文的分簇算法均得到较长的网络生存周期,且因为优化算法的寻优过程具有随机性,故鲁棒性不如本文算法.上述结果验证了本文所提出的分簇算法的有效性.

3.3 路由分簇算法性能对比

3.3.1 网络能耗对比

图3表示在WSN#1场景随机布撒200个普通节点和30个高能节点,4种算法优化的网络随着通信次数的增加,网络总能量的消耗情况.

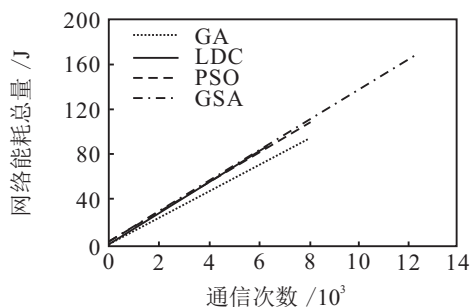


图3 WSN#1下4种算法能耗对比

从图3中可以看出:LDC的网络通信次数为6 546次;PSO在每轮通信中的网络总能耗最大,其网络通信次数为8 515次;GA在每轮通信中的网络总能耗最小,其网络通信次数为8 296次;GSA在每轮通信中的网络总能耗在4种算法中居中,其网络通信次数为12 840次,相比于LDC提高了96%,相比于PSO提高了50%,相比于GA提高了54%.

图4表示在WSN#2场景下,随机布撒500个普通节点和50个高能节点,4种算法优化的网络在第一个簇头节点死亡前随着通信次数的增加,网络总能量的消耗情况.

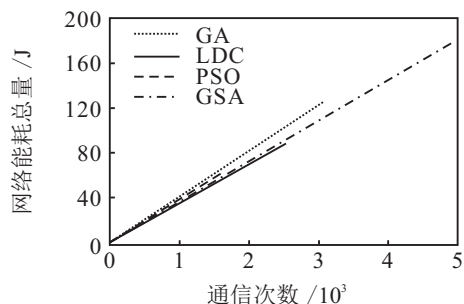


图4 WSN#2下能耗对比

在图4中:GSA算法优化的网络也具有更长的网络寿命,LDC的网络通信次数为1 784次;PSO的网络通信次数为3 114次;GA的网络通信次数为2 701次;GSA的网络通信次数为4 994次,其相比于LDC提高了179%,相比于PSO提高了60%,相比于GA提高了84%.

从图3和图4中还可以看出,当网络中的节点数目较少时,每轮通信中网络能量消耗要多于PSO和GA,但随着网络节点数目的增多,本文算法与GA在每轮通信中的总能耗均较少,且基于GSA的算法得到的网络寿命在4种算法中最长.

3.3.2 不同节点数目下网络工作时间对比

表5是在WSN#1环境下,当高能节点数目为30时,算法在不同节点数目下优化20次得到的网络通信次数的平均值.

表5 在WSN#1下簇头数为30的不同算法性能对比

| 节点数 | GSA | PSO | GA | LDC |
|-----|--------|-------|-------|-------|
| 200 | 13 907 | 6 298 | 7 628 | 5 942 |
| 300 | 12 074 | 5 932 | 6 797 | 5 226 |
| 400 | 11 476 | 5 498 | 6 123 | 4 604 |
| 500 | 10 619 | 5 216 | 5 782 | 4 030 |

表6是在WSN#1环境下,当高能节点数目为50时,不同节点数目下优化20次得到的网络通信次数的平均值.

表6 在WSN#1下簇头数为50的不同算法性能对比

| 节点数 | GSA | PSO | GA | LDC |
|-----|--------|-------|-------|-------|
| 200 | 11 746 | 5 645 | 5 187 | 4 433 |
| 300 | 10 562 | 4 714 | 4 409 | 3 532 |
| 400 | 9 714 | 3 738 | 3 821 | 3 081 |
| 500 | 8 232 | 2 980 | 3 034 | 2 170 |

表7是在WSN#2环境下,当高能节点数目为30时,不同节点数目下优化20次得到的网络通信次数的平均值.

表7 在WSN#2下簇头数为30的不同算法性能对比

| 节点数 | GSA | PSO | GA | LDC |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 200 | 5 133 | 3 671 | 3 527 | 3 989 |
| 300 | 4 684 | 3 127 | 3 024 | 3 354 |
| 400 | 4 177 | 2 758 | 2 678 | 2 827 |
| 500 | 3 644 | 2 463 | 2 142 | 2 386 |

表8是在WSN#2环境下,当高能节点数目为50时,不同节点数目下优化20次得到的网络通信次数的平均值.

表8 在WSN#2下簇头数为50的不同算法性能对比

| 节点数 | GSA | PSO | GA | LDC |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 200 | 5 116 | 2 950 | 2 746 | 3 721 |
| 300 | 4 768 | 2 684 | 2 356 | 3 014 |
| 400 | 4 456 | 2 377 | 1 987 | 2 387 |
| 500 | 4 013 | 2 096 | 1 475 | 1 683 |

从表5~表8中可以看出:1) 在同一场景、相同簇头节点数目下,随着普通节点数目的增多,网络簇头节点的负载逐渐增大,因此网络的通信次数将逐渐降低,但本文算法优化后的网络均具有更多的网络通信次数,即网络生存周期最大;2) 在同一场景、相同节点数目下,簇头节点数目的增多导致靠近基站的簇头节点的负载增多,因此网络的通信次数有所降低,但本文算法优化后的网络具有更多的节点通信次数;3) 在相同普通节点数目及簇头节点数目下,当基站位于监测区域边缘时,由于网络中的簇头节点较难连接到基站,导致靠近基站的簇头节点需要接收和转发更多的信息而造成网络生存周期低下,本文算法优化后的网络在不同的场景下均具有较多的通信次数。

综上所述,在不同普通节点数目、不同簇头节点数目以及不同的监测环境下,本文算法优化后的网络的生存周期都是最大的。究其原因,一方面本文算法以簇头节点的能耗方差为目标,并采用寻优性能较好的引力搜索算法(MGSA)对其进行优化,因此优化后得到的网络能最大化负载较大的簇头节点的生存周期;另一方面,基于普通节点与簇头节点的能量差异以及簇头节点的负载情况的分簇策略,进一步减小了网络中普通节点与能耗较大的簇头节点在每轮通信中的能耗。

4 结 论

针对异构传感器网络中的能耗不均问题,本文提出一种基于GSA的路由算法和基于生命周期的分簇算法。以网络中簇头节点的能耗差异为目标,采用GSA算法对其进行优化,降低了通信中各个簇头节点的能耗差异,然后根据节点与簇头的距离、网络中簇头节点的负载压力以及两种节点的能量差异对各个节点进行分簇,使簇头和节点的寿命都尽可能达到最大。仿真实验表明,GSA算法在不同节点数目以及不同的环境下,均能使整个网络的生存周期达到最大,验证了本文算法的有效性及其先进性。

参考文献(References)

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [3] 刘坚, 秦大力, 于德介. 基于无线传感器网络的智能状态监测系统研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(10): 2047-2051.
(Liu J, Qin D L, Yu D J. Intelligent condition

monitoring system based on wireless sensor networks[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(10): 2047-2051.)

- [4] Dimokas N, Katsaros D, Manolopoulos Y. Energy-efficient distributed clustering in wireless sensor networks[J]. *J of Parallel and Distributed Computing*, 2010, 70(4): 371-383.
- [5] Amgoth T, Jana P K. BDCP: A backoff-based distributed clustering protocol for wireless sensor networks[C]. 2013 Int Conf on Advances in Computing, Communications and Informatics. Mysore: IEEE, 2013: 1012-1016.
- [6] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]. Proc of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf on System Sciences. Maui: IEEE, 2000: 3005-3014.
- [7] 李明, 曹晓莉, 胡卫军. 基于多目标和声搜索的无线传感器网络分簇路由算法[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(1): 162-168.
(Li M, Cao X L, Hu W J. Optimal multi-objective clustering routing protocol based on harmony search algorithm for wireless sensor networks[J]. *Chinese J of Scientific Instrument*, 2014, 35(1): 162-168.)
- [8] 孙力娟, 魏静, 郭剑, 等. 面向异构无线传感器网络的节点调度算法[J]. *电子学报*, 2014, 42(10): 1907-1912.
(Sun L J, Wei J, Guo J, et al. Node scheduling algorithm for heterogeneous wireless sensor networks[J]. *Chinese J of Electronics*, 2014, 42(10): 1907-1912.)
- [9] Bari A, Wazed S, Jaekel A, et al. A genetic algorithm based approach for energy efficient routing in two-tiered sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(4): 665-676.
- [10] Low C P, Fang C, Ng J M, et al. Efficient load-balanced clustering algorithms for wireless sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2008, 31(4): 750-759.
- [11] Gupta G, Younis M. Load-balanced clustering of wireless sensor networks[C]. IEEE Int Conf on Communications. Alaska: IEEE, 2003: 1848-1852.
- [12] Bari A, Jaekel A, Bandyopadhyay S. Clustering strategies for improving the lifetime of two-tiered sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2008, 31(14): 3451-3459.
- [13] Gupta S K, Jana P K. Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: GA based approach[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 83(3): 2403-2423.
- [14] Kuila P, Jana P K. Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: Particle swarm optimization approach[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2014, 33(5): 127-140.
- [15] Rashedi E, Nezamabadi-Pour H, Saryazdi S. GSA: A gravitational search algorithm [J]. *Information Sciences*, 2009, 179(13): 2232-2248.

(责任编辑: 闫 妍)