

多约束容错性 WSN 中继节点布局算法的研究

王 翥¹, 王 祁²

(1. 哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院, 山东威海 264209;

2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 针对目前中继节点布局算法所忽视的中继节点通信容量以及网络整体能耗等问题, 本文将通信路径不可逆以及中继节点通信容量等约束条件引入现有中继节点布局模型, 并提出了基于最小通信网络距离因子的布局算法评价新标准. 解决方法上, 采用了基于枚举法与贪婪寻优算法的中继节点布局算法, 实现了 WSN 中继节点的多约束容错性布局. 仿真实验表明, 本文提出的多约束容错性中继节点布局算法可以方便地对中继节点通信能力做出限制, 与常规中继节点布局算法相比, 在改善通信网络能耗方面具有明显的优势.

关键词: 无线传感器网络; 多约束容错性中继节点布局; 最小通信网络距离因子; 通信容量; 贪婪寻优算法
中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 3A-115-06

Research on Multi-Restricted Fault-Tolerant Relay Node Placement Algorithm in Wireless Sensor Networks

WANG Zhu¹, WANG Qi²

(1. School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Aiming at the problems of relay node's communication capacity and the energy consumption of the whole networks which are always ignored by the existing algorithms, many constraint conditions are introduced into the existing model of fault-tolerant relay node placement in this paper, such as the irreversible factor in the forwarding paths and relay node's communication capacity. And a new evaluation standard is presented, and it is based on the minimum distance factor of communicating network. A hybrid relay node placement algorithm based on enumeration and greedy optimization algorithm is implemented in solutions. The simulation result demonstrates the algorithm can limit the communication capacity conveniently of the relay node. Compared with other placement algorithms, improvement of energy-efficiencies in this algorithm is obvious.

Key words: wireless sensor networks; multi-restricted fault-tolerant relay node placement; the minimum distance factor of communicating network; communication capacity; greedy optimization algorithm

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是一种由具有无线通信和计算能力的传感器节点(Sensor Node, SN)通过自组织方式构成的能根据环境自主完成指定任务的分布式智能化系统,并以协作的方式实时感知、采集和处理网络覆盖区域内的信息,通过多跳的网络形式将数据传送给网关节点(Gateway Node, GN),并最终把信息经由其他通信渠道远传给监控中心. 该技术在医疗卫生、环境监测、军事领域等方面有着广泛的应用前景^[1,2].

通常, WSN 中传感器节点由电池供电,且经常布局在户外较恶劣环境中,故其能耗控制及系统容错性^[3]显

得尤为重要,近年来国内外在能量路由协议、高效拓扑控制等方面做了大量研究^[4-6]. 由于无线传输的能量损耗是传输距离的非线性函数,导致 WSN 中长距离的信息传送耗能非常高,基于延长网络生存期考虑,有必要在 WSN 中添加一定数量的、携带更多能量、通信距离更远的中继节点(Relay Node, RN)来实现与传感器节点及网关节点的之间多跳的短距离通信. 这就引出了中继节点布局的问题.

一个好的中继节点布局方案不仅可以有效地延长整个 WSN 的生存时间,同时还可以为网络路由、数据融合、时间同步和节点定位等 WSN 关键技术的研究奠定坚实的基础. 因此,中继节点布局算法的研究具有重要的意义.

2 问题描述

在特定的 WSN 应用环境下,传感器节点负责监测环境信息,其布局位置由实际需监测区域所限制.网关节点主要起到汇聚监测数据、负责数据远传的功能,由其功能特性决定了网关节点一般需要设置在可以方便连接外部线缆的确定位置处.因此,在 WSN 构建初期,需要首先确定传感器节点和网关节点的位置,然后再决定中继节点的位置,对这种实用型网络模型作如下定义.

用集合 $SN = \{SN_1, SN_2, \dots, SN_n\}$ 表示给定的分布于二维平面内的 n 个同构传感器节点,其通信半径记为 $r > 0$;用 $RN = \{RN_1, RN_2, \dots, RN_m\}$ 表示充分考虑中继节点布局禁区之后的候选中继节点,其通信半径记为 $R \geq r > 0$.用 $GN = (x_g, y_g)$ 表示网关节点的坐标信息.用 $d(x, y)$ 表示位于欧几里得平面内的点 x 与点 y 的距离,作如下限制条件:

- (1) 对于任意 $SN_i \in SN, N_j \in RN \cup GN$, 如果存在 $d(SN_i, N_j) \leq r$, 则 SN_i 能与 N_j 相互通信;
- (2) 对于任意 $RN_i \in RN, N_j \in RN \cup GN$, 如果存在 $d(RN_i, N_j) \leq R$, 则 RN_i 能与 N_j 相互通信;
- (3) 对于任意 $SN_i \in SN, SN_j \in SN$, 即使存在 $d(SN_i, SN_j) \leq r$, SN_i 与 SN_j 也不能相互通信.

国内外针对上述类型的网络做过大量的研究.文献[7]对该类型网络的容错性首先进行了研究,给出了 $R > 2r$ 的情形下性能比为 $o(D \log n)$ 的贪婪寻优算法(其中, D 为 WSN 监测区域的直径, n 为传感器节点的数目).文献[8]针对受限于矩形区域内且满足 $R \geq 4r$ 条件的传感器节点给出了常数性能比算法.文献[9]给出的算法无论对于传感器节点、中继节点还是网关节点均采取了 2-连接的网络构建模式.文献[10]则讨论了含有基站的 WSN 容错性放置问题,并将此问题转化为最小 k -连通的支撑子图,借助 Harary 图的 k -连通性要求添加最少数量的中继节点,设计出了性能比为 $o(n^5 k^2)$ 的布局算法,使得所有传感器节点、基站之间均存在 $k(k \geq 2)$ 条互不交叉的通路,从一定程度上增强了 WSN 系统的容错性.目前,为数不多的文献着手具有严格约束条件的中继节点布局算法.文献[11]首次提出了关于中继节点候选设置位置集合的概念,在构造该候选设置位置时有效的避开了布设禁区以及节点间因防止通信干扰而设定的距离下限等问题.

总之,目前大多数中继节点布局算法的研究思路均是如何通过布局最少数量的中继节点来完成网络的连通性,并通过布局使网络具有 k -连通性来保证网络具有一定的容错性.因此通常情况下的中继节点布局算法有以下两种评价标准:使用的中继节点数最少或

者布局完成后通信路径最短则算法最优.

从上文所述我们可以看出目前中继节点布局算法存在以下主要问题:首先,在追求用最少数量的中继节点完成网络连通性的同时忽略了实际可能存在的中继节点通信容量超限的问题;其次,目前的布局算法以网络构建成本或者最短通信路径作为布局算法的评价标准,并没有将网络后续运行过程中的实际功耗情况考虑在内.为此,本文将多约束条件引入现有中继节点布局模型,对其进行了优化,提出了基于枚举法与贪婪寻优法结合的中继节点布局算法,在一定程度上解决了目前算法存在的不足.

3 中继节点布局模型的优化

3.1 通信路径约束条件的改善

目前中继节点布局模型中关于通信路径的约束条件一般仅是通信半径的限制,少数文献还引入了中继节点布局禁区,为此,我们在此基础上引入一个新的约束条件:由传感器节点经中继节点至网关节点间的通信路径不允许存在逆方向.

定义 1 通信路径不可逆判断因子 $Re_dir_1, Re_dir_2, Re_dir_3$ 定义如下:

$$Re_dir_1 = \frac{\langle SN_i, RN_j \rangle \cdot \langle SN_i, GN \rangle}{|\langle SN_i, RN_j \rangle| \cdot |\langle SN_i, GN \rangle|} \quad (1)$$

$$Re_dir_2 = \frac{\langle RN_i, RN_j \rangle \cdot \langle SN_i, GN \rangle}{|\langle RN_i, RN_j \rangle| \cdot |\langle SN_i, GN \rangle|} \quad (2)$$

$$Re_dir_3 = \frac{\langle RN_i, GN \rangle \cdot \langle SN_i, GN \rangle}{|\langle RN_i, GN \rangle| \cdot |\langle SN_i, GN \rangle|} \quad (3)$$

式中, $\langle SN_i, GN \rangle$ 、 $\langle SN_i, RN_j \rangle$ 分别表示由传感器节点 SN_i 至网关节点及 SN_i 至与它邻近的中继节点 RN_j 的坐标向量, $\langle RN_i, RN_j \rangle$ 表示通信路径上相邻两个中继节点之间的坐标向量, $\langle RN_i, GN \rangle$ 表示通信路径上由中继节点 RN_i 至网关节点的坐标向量.

所谓通信路径“不可逆”,是指从传感器节点 S 到网关节点 G 只能沿着一个方向构成通信路径,即式(1)~(3)中 $Re_dir_1, Re_dir_2, Re_dir_3$ 均为正值.通信路径不可逆判断因子保证了中继节点布局时通信路径的尽量短.如图 1 所示,路径 1 所涉及的所有通信路径逆方向判断因子均为正值,故满足“不可逆”这一通信路径约束条件.对于路径 2 而言,由 $R5$ 至 G 逆方向判断因子 $Re_dir_3 < 0$, 所以路径 2 不满足该路径约束条件.

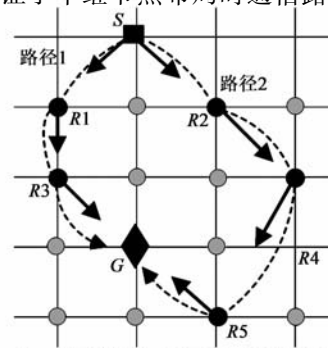


图1 通信路径“不可逆”说明示例

3.2 评价容错性通信网络的新条件

在 3.1 小节介绍了在每个传感器节点至网关节点通信路径选择时引入了通信路径不可逆的约束条件,在此基础上为每个传感器节点找到符合约束条件的通信路径.从提高通信网络容错性角度出发,在计算通信网络时要保证一个传感器节点经过两个不存在中继节点交集的通信路径组,以保证在一条通信路径出现故障时,另外一条通信路径仍可以保证通信网络的连通性,完成数据的可靠传输.

但是在 WSN 实际的运行过程中,中继节点的本身运行状况会对整个网络通信的可靠程度造成严重影响,为此提出了如下通信网络评价新条件:各中继节点的数据转送率不能超过该节点所限定的最大数据转送率(通信容量).

定义 2 中继节点 RN_i 的数据转送率 β_i 定义如下:

$$\beta_i = \sum_{j=1}^n \alpha_j \quad (4)$$

式中 α_j 为经由 RN_i 的起始传感器节点 SN_j 的数据发信率.

如图 2 所示,由路径 1~4 组成容错性通信网络,其中经由中继节点 R_4 转送数据的传感器节点仅有 S_1 ,若 S_1 的数据发信率为 α_1 ,故中继节点 R_1 的数据转送率为 $\beta_1 = \alpha_1$.同理,由式(4)可知中继节点 R_2 的数据转送率为 $\beta_2 = \alpha_1 + \alpha_2$;依此类推,其他中继节点 R_3 、 R_4 、 R_5 也分别这样

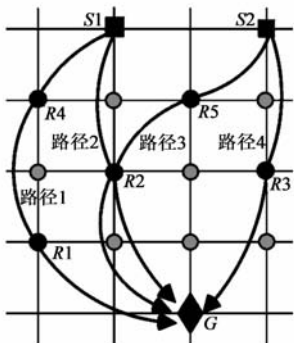


图2 中继节点通信容量说明示例

计算得到 $\beta_3 \sim \beta_5$.如果所有中继节点的数据转送率 $\beta_1 \sim \beta_5$ 均不大于规定的最大数据转送率 $\gamma_1 \sim \gamma_5$,则可断定该网络满足中继节点通信容量的这一评价前提.

3.3 评价中继节点布局算法的新标准

在本文第 2 节问题描述部分指出,目前大多数中继节点布局算法的评价标准基本上是从 WSN 构建初期的投入成本出发,认定在满足通信网络容错性前提下采用的中继节点数最少则算法最优.显然,这种评价标准没有对中继节点布局完成之后整个网络的功耗情况加以分析,本文接下来针对这一因素进行分析,并且引入容错性中继节点布局算法新的评价标准.

Friis^[12]自由空间方程给出了无线收发节点之间功率关系的表达式为:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (5)$$

式中, P_T 、 P_R 为发送和接收功率; G_T 、 G_R 是收发天线的增益; d 为收发节点间距; L 为与传播无关的系统损耗

因子($L \geq 1$); λ 为波长.

假设满足接收节点能够正确监测并能顺利解码信号的最小功率为 P_0 , 即有 $P_R = P_0$, 则发送节点的最小发送功率为:

$$P_{Tm} = \frac{P_0 (4\pi)^2 d^2 L}{G_T G_R \lambda^2} \quad (6)$$

由式(6)可知,发送功率与距离的平方成正比关系.但目前研究的中继节点布局算法除以最少中继节点数为评价标准外,有时还以通信路径距离最短为布局目标,显然,该评价标准并不能保证整个网络的能耗最小.为此,本文提出了中继节点布局算法新的评价标准:在保证通信网络评价前提下使通信网络距离因子最小则算法最优.

定义 3 通信网络距离因子 dis_fac 定义如下:

$$dis_fac = \sum_{i=1}^n \frac{d_{(i,path1)}^2 + d_{(i,path2)}^2}{2 \cdot d^2(SN_i, GN)} \quad (7)$$

式中: $d_{(i,path1)}^2 + d_{(i,path2)}^2$ 表示传感器节点 SN_i 所选的通信路径组两条路径距离的平方和; $d^2(SN_i, GN)$ 表示 SN_i 与网关节点之间距离的平方.

由式(7)可以看出,由于将传感器节点与网关节点布局前的初始距离考虑在内,所以最小 dis_fac 评价标准的提出可以有效防止因各传感器节点距离网关节点间距差异过大造成中继节点的不合理布局,使整个通信网络的能耗相对均衡.同时,该评价标准完全可以与目前以最少中继节点数为评价标准的机制相结合,在实施过程中,可以通过事先设定中继节点数上限,求取该限制条件下满足最小 dis_fac 的布局网络,来实现减小系统构建成本和保证网络实际运行阶段系统功耗较低的双重效果.

4 中继节点布局优化算法的实现

4.1 算法复杂度分析

文献[13]证明了 $R = r$ 情况下中继节点布局问题是一个 NP-hard 问题,是一类典型的指数算法问题,其计算量为 $T(L) = o(2^{kL})$ (k 为正常数),显然计算量会随着问题规模的增大呈指数增长.本文在此基础上对容错性中继节点布局模型又引入了通信路径不可逆、中继节点通信容量等约束条件,故其计算复杂度也会随着网络规模的增大而呈指数增长,必将导致常规的整数规划方法计算时间过长,使得该布局算法难以在有限的时间、空间内对布局问题求出最优解.为此,本文采取以下策略:在计算门限时间内利用枚举法求解精确解;否则利用贪婪寻优算法求解中继节点布局的次优解.

4.2 算法总流程描述

Step 1 输入传感器节点及网关节点相应数据;

Step 2 输入中继节点可选布局区域范围,有效避开布局禁区,对候选布局区域网格化处理得到候选中继节点坐标信息;

Step 3 设定计算门限时间,进行枚举法求解精确解的计算;

Step 4 若计算门限时间未到,针对所有的通信网络根据网络评价标准进行选择,得出中继节点的最优位置;若计算门限时间到达,则转至 Step5;

Step 5 结束精确解的求解进程,开始启发式布局算法的进程,从次优解的通信网络中各个中继节点的候选位置中,决定中继节点的布局位置;

Step 6 算法结束.

关于 Step2 中布局区域网格化处理如下作说明:将中继节点候选布局区域进行网格状划分,将中继节点布置在各个网格的交叉点上,一般网格划分按照传感器节点通信距离的 $1/3 \sim 1/4$ 等间距划分,并且可以通过细化网格来提高中继节点布局精度.

4.3 枚举法计算精确解流程描述

针对较小规模的 WSN,可能在有限的时间内完成中继节点的最优布局算法,具体流程如下所示:

Step 1 计算出每个传感器节点的所有候选通信路径,并计算出所有可能的通信路径组;

Step 2 为每个传感器节点选择一个通信路径组,构成所有满足网络评价新条件的通信网络;

Step 3 从上述提取的通信网络中选出评价最优的通信网络,作为最优解;

Step 4 算法结束.

4.4 贪婪寻优算法计算次优解流程描述

贪婪寻优算法是本文多约束容错性中继节点布局算法的核心.贪婪算法一般是从一个初始状态出发,根据当前局部最优策略,在满足约束条件情况下,得到一个能够最快地达到要求的可行解.显然该算法可以满足一定应用环境下的快速性,但缺少全局寻优机制,为此我们为贪婪算法引入全局择优机制,为了能够在合理的计算时间内得到令人满意的中继节点布局效果,设计流程如下:

Step 1 为每个传感器节点计算规定数量的候选通信路径,并计算规定数量的候选通信路径组;

Step 2 每一个传感器节点一次从 Step1 得到的规定数量的候选通信路径组选择一个路径组构成一个满足通信网络评价新条件并且评价最优的通信网络,并把该通信网络作为次优解通信网络;

Step 3 设定最大迭代次数;

Step 4 随机选择一个传感器节点,计算出该传感器节点一组新的符合路径约束条件的路径组;

Step 5 针对次优解通信网络,计算出置换该传感器节点为新路径组的通信网络,并作为暂定解;

Step 6 判断该暂定解是否满足通信网络评价新条件,满足则跳转 Step7,否则转至 Step4;

Step 7 按照通信网络评价标准确定暂定解是否优于次优解,若暂定解优于次优解,则将暂定解更新为次优解,否则转至 Step4;

Step 8 到达最大迭代次数转至 Step9,否则转至 Step4;

Step 9 输出循环结束后的次优解,作为最终的中继节点布局方案.

5 仿真分析

现假定 $150\text{m} \times 150\text{m}$ 的 WSN 监测区域内有一个网关节点(假定其通信半径为 $R = 120\text{m}$,坐标为 $(75, 0)$)、四个传感器节点(假定其通信半径为 $r = 90\text{m}$).将中继节点的可选布局区域限定于 $120\text{m} \times 90\text{m}$ 的矩形区域,该候选布局区域经网格化处理得到的候选中继节点坐标及传感器节点坐标如表 1 所示.在 MATLAB R2008b 仿真环境下,进行下述仿真对比实验.其中,仿真图中相关图例说明如下:◆(网关节点),■(传感器节点),○(候选中继节点),●(布局算法所选定中继节点).

表 1 传感器节点及候选中继节点坐标

节点序号	(x_i, y_i)	节点序号	(x_i, y_i)
SN1	(0, 135)	RN9	(90, 60)
SN2	(40, 150)	RN10	(120, 60)
SN3	(100, 150)	RN11	(0, 90)
SN4	(135, 145)	RN12	(30, 90)
RN1	(0, 30)	RN13	(60, 90)
RN2	(30, 30)	RN14	(90, 90)
RN3	(60, 30)	RN15	(120, 90)
RN4	(90, 30)	RN16	(0, 120)
RN5	(120, 30)	RN17	(30, 120)
RN6	(0, 60)	RN18	(60, 120)
RN7	(30, 60)	RN19	(90, 120)
RN8	(60, 60)	RN20	(120, 120)

5.1 布局算法贪婪性验证

本文 4.4 小节所述的贪婪寻优算法流程中, Step1 这样描述:为每个传感器节点计算规定数量的通信路径组,并且在 Step3 中布局相应的最大迭代次数(记为 De-MAX-times)来实现中继节点布局算法的不断寻优.我们假设为每个传感器节点计算 10 个通信路径组,以布局的最少中继节点数(记为 RNC-min)作为布局算法的评价标准,在 De-MAX-times = 100 和 De-MAX-times = 10000 情况下分别进行仿真.图 3 为迭代 100 次的仿真结果,共需布局 9 个中继节点,图 4 所示的迭代 10000 次的仿真结果仅需 7 个中继节点即可完成中继节点布

局.由布局算法的贪婪性可知,只要计算时间足够长,随着迭代次数的增大布局所需的中继节点数将会逐渐减小,算法的整体布局效果逐渐趋于最优.

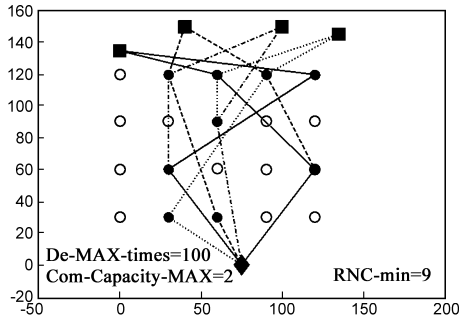


图3 迭代100次后的仿真结果

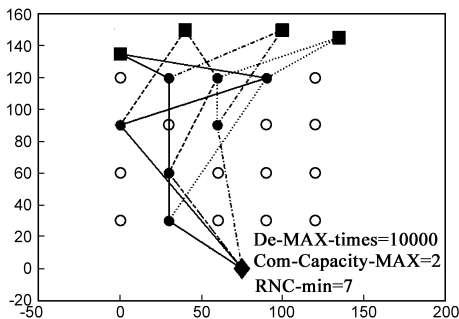


图4 迭代10000次后的仿真结果

5.2 通信容量设置对布局结果影响的验证

本文 3.2 小节提及通信网络评价前提,即各中继节点的数据转送率不能超过该节点所限定的通信容量.这里作下述简化处理,假设每个传感器节点的数据发信率相同,那么就可以用经由某中继节点转发数据的最多传感器节点的个数代表该中继节点的通信容量(记为 Com-Capacity-MAX).以 RNC-min 作为中继节点布局算法评价标准,令 Com-Capacity-MAX = 3, De-MAX-times = 100 进行仿真.

如图 5 所示的仿真结果,整个布局方案共需 7 个中继节点,由于单一中继节点可以传送更多传感器节点的数据,故与图 3 (Com-Capacity-MAX = 2, De-MAX-times = 100) 相比需布局的中继节点总数少 2 个.这说明本文算法可以轻松设置各个中继节点的通信容量,布局算法会更根据中继节点不同的通信容量提供相应的布局方案.

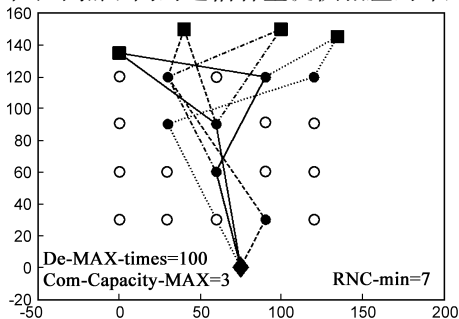


图5 Com-Capacity-MAX=3时的仿真结果

5.3 min-dis_fac 与 min-dis 布局效果对比分析

本文 3.3 小节提及新的通信网络评价标准:通信网络距离因子 (dis_fac) 最小则算法最优.这里分别以最短距离(记为 min-dis)和 min-dis_fac 作为评价标准进行了 De-MAX-times = 1000 和 Com-Capacity-MAX = 2 情况下的对比仿真.

图 6 是以 min-dis 作为评价标准的仿真结果:布局中继节点数(记为 RN-count)为 9,通信网络距离平方和(先求每个传感器节点两条互不交叉的通信路径距离的平方和,然后取其 1/2,将该变量记为 Net-Dis2)为 116336m²,图 7 则以 min-dis_fac 为布局算法评价标准,算法运行结果为:RN-count = 8, Net-Dis2 = 54075m²,通过对比 Net-Dis2,由于 116336/54075 \approx 2.15,结合式(6)可知,以 min-dis_fac 为评级标准的中继节点布局算法与以 dis_fac 为评价标准的算法相比,在减少网络整体耗能方面有着明显的优势.

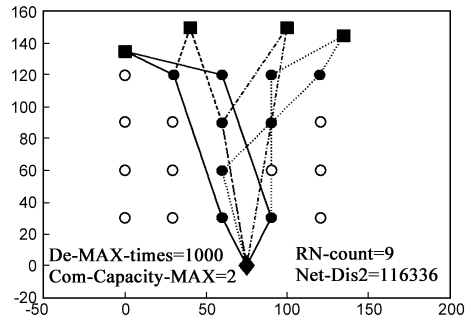


图6 采用min-dis评价标准的仿真结果

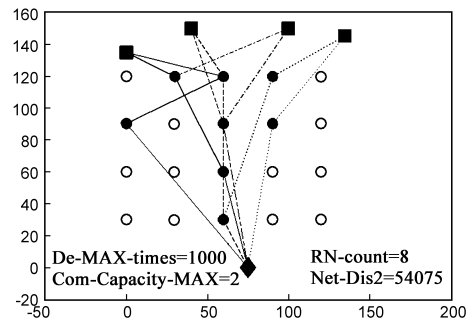


图7 采用min-dis_fac评价标准的仿真结果

6 结论

本文将多约束条件引入现有容错性中继节点布局模型,采用基于枚举法与贪婪寻优算法的混合算法实现了中继节点的布局.仿真结果表明,该算法能够保证多重约束条件下的中继节点布局网络的容错性,并且基于通信网络距离因子最小评价标准的提出能有效减小整个网络的能量损耗,延长了网络的存活寿命.

参考文献

- [1] Wang Z, Wang Q, Hao X Q. The design of the remote water quality monitoring system based on WSN [A]. In Proc

- WICOM'09[C]. Beijing: IEEE Computer Society, 2009. 1-4.
- [2] 王翥,郝晓强,魏德宝. 基于 WSN 和 GPRS 网络的远程水质监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2010, 1(1): 48-52.
Wang Z, Hao X Q, Wei D B. Remote water quality monitoring based on WSN and GPRS[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010, 1(1): 48-52. (in Chinese)
- [3] Han X F, Cao X, Lloyd E L, et al. Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks[J]. IEEE transactions on mobile computing, 2010, 9(5): 643-656.
- [4] 林恺,赵海,尹震宇,等. 一种基于能量预测的无线传感器网络分簇算法[J]. 电子学报, 2008, 36(4): 824-828.
Lin K, Zhao H, Yin ZH Y, et al. A clustering hierarchy arithmetic based on energy prediction for wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 36(4): 824-828. (in Chinese)
- [5] Zhang X, Ding X Y, LU S L, et al. Principles for energy-efficient topology control in WSN[A]. In Proc WICOM'09[C]. Beijing: IEEE Computer Society, 2009. 1-3.
- [6] Attoungble K, Kazunori O, Keiichi K, et al. Greedy routing for maximum lifetime in WSN[A]. In Proc PIMRC'09[C]. Tokyo: IEEE Press, 2009. 1888-1892.
- [7] Hao B, Tang J, Xue G L. Fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks; Formulation and approximation[A]. In Proc HPSR'04[C]. Phoenix, AZ: IEEE Press, 2004. 246-250.
- [8] Tang J, Hao B, Arunabha S. Relay node placement in large scale wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2006, 29(4): 490-501.
- [9] Zhang W Y, Xue G L, Misra S. Fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks: Problems and algorithms [A]. In Proc INFOCOM'07[C]. Anchorage: IEEE Press, 2007. 1649-1657.
- [10] 崔素辉,陈光亭,辛双. 无线传感器网络放置问题容错性算法[J]. 杭州电子科技大学学报, 2009, 29(6): 107-110.
Cui S H, Chen G T, Xin S H. Algorithms for fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2009, 29(6): 107-110. (in Chinese)
- [11] Misra S, Hong S D, Xue G L, et al. Constrained relay node placement in wireless sensor networks; Formulation and approximations [J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2010, 18(2): 434-447.
- [12] Bereketi A, Akan O. Communication coverage in wireless passive sensor networks[J]. IEEE Communication Letters, 2009, 13(2): 133-135.
- [13] Lin G H, Xue G L. Steiner tree problem with minimum number of Steiner points and bounded edge-length[J]. Information Processing Letters, 1999, 69(2): 53-57.

作者简介



王翥男, 1963年6月生于辽宁丹东, 分别于1985年和1987年获得沈阳工业大学工学学士和硕士学位, 现为哈尔滨工业大学(威海)信息学院教授, 硕士生导师. 主要研究领域有无线传感器网络、测试计量技术与仪器、智能测控技术等.

E-mail: wangzhu@hit.edu.cn



王祁男, 1944年5月出生于黑龙江省哈尔滨市, 分别于1967年和1980年获得哈尔滨工业大学工学学士和硕士学位. 现在为哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授, 博士生导师. 主要从事智能测试、测试信息处理和传感器系统等方面的研究工作.

E-mail: wangqi@hit.edu.cn