

无线传感器网络中继节点布局算法的研究*

王翥^{1)†} 王祁²⁾ 魏德宝²⁾ 王玲¹⁾

1) (哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院, 威海 264209)

2) (哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

(2011年7月28日收到; 2011年11月3日收到修改稿)

节点的合理布局是无线传感器网络正常运行的前提. 在很多应用场合, 网关节点及传感器节点的位置是相对固定的, 为了保证网络的连通性与可靠性, 就必须要在网关节点与传感器节点之间合理地设置中继节点. 本文表述的是在该应用背景下引入多约束条件, 并采用枚举法与贪婪寻优算法相结合的方法, 解决了在可以作为中继节点设置位置的预设中继节点位置集合内, 合理选择中继节点设置位置以及既存网络因添加新传感器节点所引起的中继节点追加的问题. 仿真实验表明, 本文提出的中继节点布局与追加优化算法能够保证多约束条件下网络的容错性. 同时提出的基于最小网络距离因子评价标准, 有效提高了中继节点布局算法的能效性.

关键词: 无线传感器网络, 中继节点布局与追加, 贪婪寻优算法, 通信容量

PACS: 05.60.-k

1 引言

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 是由监测区域内大量的具有数据采集、数据处理和信息无线传输功能的传感器节点 (sensor node, SN)、具有数据转发功能的中继节点 (relay node, RN) 以及具有数据汇聚作用的网关节点 (gateway node, GN) 共同组成. SN 感知、采集和处理网络覆盖区域内的信息, 通过 RN 组成多跳的网络形式最终将数据传送给 GN^[1]. 该技术是信息科学领域中新兴学科与传统学科交叉综合的结果, 在环境监测、医疗卫生、智能家居等方面有着广泛的应用前景^[2]. 近年来, 关于 WSN 的研究包含诸多方面. 例如在网络层的优化技术, 包括多跳能效性路由的建立^[3]、数据聚合^[4]和分级的网络拓扑控制^[5]; 在数据链路层的研究主要包括碰撞的避免、输出功率控制^[6]、空闲侦听的最小化等^[7]; 在应用层的研究则有自适应性激活节点和负载均衡等^[8].

众所周知, 一个实用型 WSN 投入应用面临的首要问题就是网络中各类节点的布局问题, 我们以用于地铁隧道监测的 WSN 为例. 用于监测裂痕等信息的 SN 安装在地铁隧道内壁, 其布局位置由实际需求决定, 这些 SN 利用无线通信的方式把收集到的数据经由隧道内壁上的 RN 汇总至 GN, 然后 GN 把数据集中传送到服务器等装置. 我们可以看出, SN 与 GN 位置是相对固定的, 为了保证 SN 于 GN 之间数据传输的可靠性, 同时解决 SN 与 GN 之间距离过长而导致的能耗过高的问题^[9,10], 就需要在其之间合理地设置 RN, 这就是本课题研究的中继节点的布局问题^[11,12].

目前国内外关于 RN 布局问题的研究主要是以路由结构为需求和以网络覆盖连通性为需求两大类.

1) 以路由结构为需求的研究: 可以分为单层网络结构 (single-tiered) 和双层网络结构 (two-tiered) 两类. 在单层网络结构中, SN 除采集数据外还具有转发其他 SN 数据的功能; 双层网络结构中, SN 仅能将自身所采集的数据传送给 RN 或者直接传

* 国家自然科学基金 (批准号: 60973162), 山东省自然科学基金 (批准号: ZR2009GM037), 山东省科技攻关项目 (批准号: 2010GGX10132), 山东省威海市科技发展计划 (批准号: 2008011) 和山东省威海市高新技术开发区科技发展计划 (批准号: 201025) 资助的课题.

† E-mail: wangzhu@hit.edu.cn

向 GN, 不能转送来自其他 SN 的数据.

2) 以网络覆盖连通性为需求的研究: 可以分为满足网络连通性和网络容错性两类. 以网络连通性为目标的 RN 布局模型中, 仅需保证每个 SN 和 GN 之间的连通性即可; 以网络容错性为布局目标的模型中, 要保证 SN 和 GN 之间至少存在两条不相交的通信路径 [13-16].

鉴于双层网络结构更加接近于目前实用型的 WSN, 又考虑到恶劣应用环境下 WSN 的容错性 [17,18], 本文仅研究双层网络结构下的、满足网络容错性需求的 RN 布局算法.

2 模型描述及相关研究

我们针对双层 WSN 模型作如下不失一般性的简化描述:

1) 用 x 和 y 表示欧几里得平面内的两点, 用 $d(x, y)$ 表示两点之间的距离;

2) 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 SN, 其通信半径记为 $r > 0$, 并且已知其具体坐标;

3) 用 $RN = \{RN_1, RN_2, \dots, RN_m\}$ 表示候选 RN, 其通信半径记为 $R \geq r$;

4) 用 $GN = (x_g, y_g)$ 表示 GN 的坐标信息.

那么双层 WSN 的网络通信特点描述如下:

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.

国内外针对上述双层网络结构的 RN 布局算法做过大量的研究. Hao 等 [17] 对给出了 $R > 2r$ 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 SN 的数目). Tang 等 [19] 给出了 $R \geq 4r$ 且 SN 均匀分布情况下的 4.5 常数近似算法. 文献 [20] 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目的 RN, 设计出了性能比为 $o(n^5 k^2)$ 的布局算法, 使得所有 SN、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. 文献 [21] 给出了一个 $o(1)$ 近似算法, 在该算法中作者无论对于 SN,

RN 还是 GN 均采取了 2 连接的网络构建模式. 文献 [22] 提出了关于 RN 候选设置位置集合的概念, 研究了含有约束条件的 RN 的布局问题. 类似地, 文献 [23] 也指出了防止节点间的相互干扰问题, 以及可能存在的 RN 布局禁区的问题.

综上所述, 目前大多数 RN 布局算法的研究思路均是将 RN 布局模型转化为 k 连通 ($k \geq 2$) 的双覆盖问题, 旨在通过布局最少数量的 RN 来完成网络的连通性, 并通过布局使 SN 和 GN 之间具有 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 RN 布局算法有以下两种评价标准:

- 1) 需要布局的 RN 数最少;
- 2) 布局完成后网络的通信路径最短.

然而, 上述评价标准忽略了实际可能存在的 RN 通信容量超限的问题, 同时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 RN 布局模型, 从能效性角度对其进行了优化, 提出了基于枚举法与贪婪寻优法结合的 RN 布局算法, 解决了目前算法存在的不足.

3 实用型 RN 布局模型的优化

3.1 通信路径约束条件的改善

目前 WSN 的 RN 布局过程中, 对通信路径考虑的约束条件是节点的通信半径. 本小节重点研究网络构建初期, 在 SN 与 GN 位置已经确定的前提下, 我们在保证网络的连通性、可靠性的基础上, 从减少网络整体能耗以及降低构建成本角度出发, 为 RN 布局模型引入一个新的约束条件: 在预设 RN 集合中选择合适的 RN 布局位置, 保证构建完成的网络从任意一个 SN 经一个或多个 RN 最终达到 GN 之间的数据通信路径传播方向上不存在逆向传播. 为此我们对通信路径不可逆判断因子定义如下:

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

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

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

上式中, $\langle SN_i, GN \rangle$ 表示稚 SN_i 至 GN 的坐标向量, 将其作为判断通信路径不可逆性的基准向量, $\langle SN_i, RN_j \rangle$ 表示稚 SN_i 至与其相邻的 RN_j 的坐标

向量, $\langle RN_i, RN_j \rangle$ 表示数据通信路径上任意两个相邻的 RN_i 和 RN_j 之间的坐标向量, $\langle RN_i, GN \rangle$ 表示通信路径上最末一个 RN_i 与 GN 之间的坐标向量.

所谓通信路径“不可逆”,是指从 SN 到 GN 只能沿着一个方向构成通信路径,即(1)—(3)式中 $Re_dir_1, Re_dir_2, Re_dir_3$ 均为非负值. 通信路径不可逆判断因子不仅保证了 RN 布局时所需要的 RN 个数尽量少,系统构建成本尽量低,同时保证了 RN 布局完成后 SN 与 GN 之间通信路径的尽量短. 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. 然而对于路径2而言,由 RN_5 至 GN 逆方向判断因子 $Re_dir_3 = \frac{V_{2d} \cdot V_{ref}}{|V_{2d}| \cdot |V_{ref}|} < 0$, 所以由 SN 至 GN 之间的路径2不满足该路径约束条件.

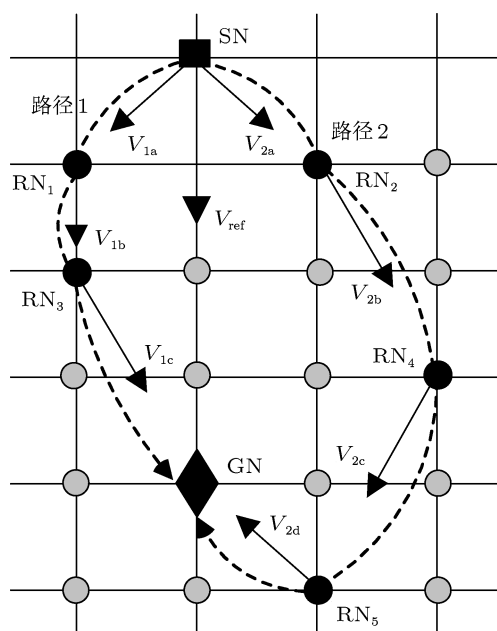


图1 通信路径“不可逆”说明示例

3.2 评价约束性网络的新标准

在3.1小节介绍了在每个 SN 至 GN 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 SN 找到符合约束条件的通信路径. 从提高网络容错性角度出发,在构建网络时要保证一个 SN 有经过两个不存在 RN 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网络的连通性,借以实现数据的可

靠传输.

在 WSN 的实际运行过程中, RN 的本身运行状况会影响整个网络通信的可靠程度,为此提出了如下新的评价条件:各 RN 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). 我们针对 RN 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 SN_j 的数据发信率.

我们给出一个具体实例对(4)式展开说明. 如图2所示,由路径1—路径4组成容错性网络,其中经由 RN_4 转送数据的 SN 仅有 SN_1 ,若 SN_1 的数据发信率为 α_1 ,那么按照 RN 数据转送率的定义可知 RN_1 的数据转送率为 $\beta_1 = \alpha_1$. 同理,由(4)式可知 RN_2 的数据转送率为 $\beta_2 = \alpha_1 + \alpha_2$; 依此类推, RN_3, RN_4, RN_5 也分别这样计算得到 $\beta_3—\beta_5$. 如果所有 RN 的数据转送率 $\beta_1—\beta_5$ 均不大于规定的最大数据转送率 $\gamma_1—\gamma_5$,则可断定该网络满足 RN 通信容量的这一约束条件.

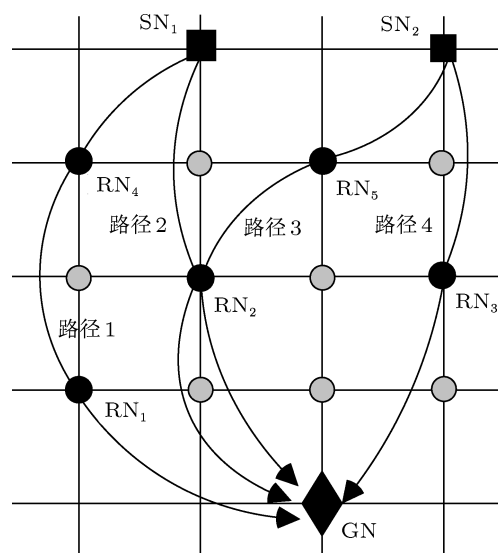


图2 通信容量说明示例

3.3 评价 RN 布局算法的新标准

本文第2节中指出,目前大多数 RN 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,认定在满足网络容错性前提下采用的 RN 数最少则算法最优. 显然,这种评价标准没有对 RN 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,并且引入约束性 RN 布局算法新的评价标准.

无线发送和接收节点之间功率关系的如下式所示:

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

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 (6) 式可知, 发送功率与距离的平方成正比关系. 但目前研究的 RN 布局算法除以最少 RN 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 RN 布局算法新的评价标准: 在满足上述网络评价条件的基础上, 使网络距离因子最小则算法最优. 我们对网络距离因子 dis_fac 定义如下.

定义 3.3 网络距离因子 dis_fac :

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

式中, $d_{(i,\text{path1})}^2 + d_{(i,\text{path2})}^2$ 表示 SN_i 所选的通信路径组两条路径距离的平方和; $d^2(\text{SN}_i, \text{GN})$ 表示 SN_i 与 GN 之间距离的平方.

由于 (7) 式中将 SN 与 GN 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 SN 距离 GN 间距差异过大造成 RN 布局的不合理, 使整个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 RN 数为评价标准的机理相结合. 在实施过程中, 可以通过事先设定 RN 数量上限, 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布设效果.

4 RN 布局优化算法的设计实现

Lin 等^[24]证明了 RN 布局问题是一个 NP-hard 问题, 该类问题是典型的指数算法问题, 其计算量为 $T(L) = o(2^{kL})$ (k 为一个正常数), 显然会随着问题规模的增大, 其计算量呈指数增长. 本文中我们

在此基础上对 RN 布局模型又引入了通信路径不可逆、数据中转次数上限、RN 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, 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. 本文将针对 WSN 构建初期, 基于 SN 与 GN 位置已经确定的前提下如何布设 RN 的问题以及既存网络中 RN 的追加与调整机理两方面说明相应算法实现.

4.1 网络构建初期 RN 布局算法的实现

4.1.1 算法总流程设计

针对 RN 布局算法存在的计算复杂性问题, 本文采取以下求解策略: 在计算门限时间内利用枚举法求解 RN 布局的精确解; 在计算门限时间之外利用启发式算法求解 RN 布局的次优解. 网络构建初期 RN 布局算法的求解总流程分为以下六步:

步骤 1 输入 SN 及 GN 的相关数据;

步骤 2 输入 RN 可选布局区域范围, 对候选布局区域网格化处理得到候选 RN 坐标信息;

步骤 3 设定计算门限时间, 进行枚举法求解精确解的计算;

步骤 4 若计算门限时间未到, 针对整个网络根据前文网络评价标准进行选择, 得出 RN 的最优位置, 若计算门限时间到达, 则转至步骤 5;

步骤 5 结束精确解的求解进程, 开始启发式布局算法的进程, 从计算得到的次优解决定 RN 的布局位置;

步骤 6 算法结束.

关于步骤 2 中布局区域网格化处理作如下作说明: 将 RN 候选布局区域进行网格状划分, 将 RN 布置在各个网格的交叉点上, 一般网格划分按照 SN 通信距离的 1/2—1/3 等间距划分, 并且可以通过细化网格来提高 RN 的布局精度.

4.1.2 精确解计算流程设计

针对较小规模的 WSN, 可能在有限的计算时间内完成 RN 的布局的最优解计算, 因此针对此规模下的 RN 布局采取枚举法进行求解, 具体流程拟采用以下四步:

步骤 1 计算出每个 SN 的所有候选通信路径, 并计算出所有可能通信路径组;

步骤 2 为每个 SN 选择一个通信路径组, 构成所有满足网络评价新条件的网络;

步骤 3 从上述提取的网络中选出评价最优的网络, 作为最优解;

步骤 4 算法结束.

4.1.3 次优解计算流程设计

贪婪寻优算法是本文多约束容错性 RN 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, 但缺少全局寻优机理, 为此我们为贪婪算法引入全局择优机理, 为了能够在合理的计算时间内得到令人满意的 RN 布局效果, 设计流程如下:

步骤 1 为每个 SN 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;

步骤 2 每一个 SN 依次从步骤 1 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网络评价新条件并且评价最优的网络, 并把该网络作为次优解网络;

步骤 3 设定最大迭代次数, 并开始第一次循环;

步骤 4 随机选择一个 SN, 计算出该 SN 一组新的符合路径约束条件的路径组;

步骤 5 针对次优解网络, 计算出置换该 SN 为新路径组的网络, 并作为暂定解;

步骤 6 判断该暂定解是否满足网络评价新条件, 满足则跳转步骤 7, 否则转至步骤 8;

步骤 7 按照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, 否则转至步骤 8;

步骤 8 到达最大迭代次数转至步骤 9, 否则转至步骤 4;

步骤 9 输出循环结束后的次优解, 作为最终的 RN 布局方案.

4.2 既存网络 RN 追加算法的实现

由于监测区域的变化或调整会不可避免发生不断添加新的 SN 进入网络的情况, 这时就需要在尽量不变更当前网络 (既存网络) 各个传感器的通信路径的前提下, 去实现网络中 RN 的调整与追加. 为此, 本文设计了如下具体的计算步骤:

步骤 1 输入既存网络以及新追加 SN 的坐标数据;

步骤 2 针对新追加的 SN, 基于既存网络中现有的 RN 计算可能的通信路径, 并据此求出所有的候选通信路径组;

步骤 3 将步骤 2 中计算出的候选通信路径组连同既存网络的通信路径组构成新的网络, 并对该新网络进行 RN 通信容量约束条件的判断, 若满足该条件进入步骤 4, 否则进入步骤 5;

步骤 4 无需启动 RN 的追加与调整机理, 网络仍能完成可靠通信直接进入步骤 6;

步骤 5 启动 RN 的追加与调整机制, 采用与构建初期 RN 的布局类似的枚举与贪婪寻优算法相结合的混合策略, 本着追加设置的 RN 数量最小的原则去完成后续 RN 的追加工作;

步骤 6 算法结束, 输出最终的 RN 追加与调整方案.

5 仿真实验与分析

仿真环境设置如下: $300\text{ m} \times 250\text{ m}$ 的 WSN 监测区域内有 1 个 GN (假定其通信半径为 $R = 100\text{ m}$)、10 个 SN (假定其通信半径为 $r = 100\text{ m}$). 在充分考虑 RN 布局禁区后, 假设 RN 可以布局在图 3 所示的矩形阴影区域内的相应格状交叉点上, 该候选布局区域经网格化处理得到的候选 RN 坐标及已知的 SN, GN 坐标如表 1 及表 2 所示. 接下来, 本文将针对提出的算法性能进行相关验证与对比性实验. 在 MATLAB R2008b 仿真环境下, 进行下述仿真对比实验 (相关图例说明如下: \blacklozenge 表示 GN, \bullet 表示 SN, \square 表示候选 RN, \blacksquare 表示布局方案确定的 RN).

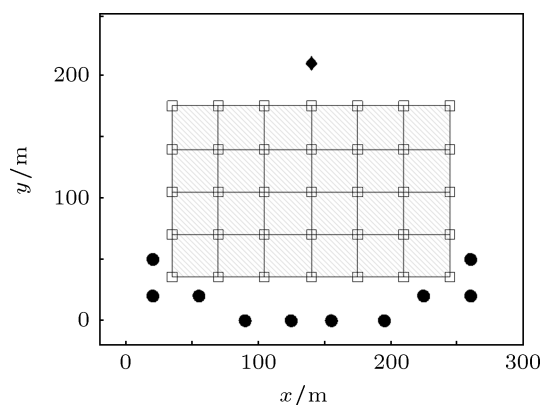


图 3 WSN 监测区域内各节点分布图

表1 SN 坐标

节点序号	SN ₁	SN ₂	SN ₃	SN ₄	SN ₅	SN ₆	SN ₇	SN ₈	SN ₉	SN ₁₀
(x_i, y_i)	(55,20)	(90,0)	(125,0)	(155,0)	(195,0)	(225,20)	(20,50)	(20,20)	(260,20)	(260,50)

表2 GN 及候选 RN 坐标

节点序号	(x_i, y_i)	节点序号	(x_i, y_i)	节点序号	(x_i, y_i)	节点序号	(x_i, y_i)
GN	(140,210)	RN ₉	(70,70)	RN ₁₈	(140,105)	RN ₂₇	(210,140)
RN ₁	(35,35)	RN ₁₀	(105,70)	RN ₁₉	(175,105)	RN ₂₈	(245,140)
RN ₂	(70,35)	RN ₁₁	(140,70)	RN ₂₀	(210,105)	RN ₂₉	(35,175)
RN ₃	(105,35)	RN ₁₂	(175,70)	RN ₂₁	(245,105)	RN ₃₀	(70,175)
RN ₄	(140,35)	RN ₁₃	(210,70)	RN ₂₂	(35,140)	RN ₃₁	(105,175)
RN ₅	(175,35)	RN ₁₄	(245,70)	RN ₂₃	(70,140)	RN ₃₂	(140,175)
RN ₆	(210,35)	RN ₁₅	(35,105)	RN ₂₄	(105,140)	RN ₃₃	(175,175)
RN ₇	(245,35)	RN ₁₆	(70,105)	RN ₂₅	(140,140)	RN ₃₄	(210,175)
RN ₈	(35,70)	RN ₁₇	(105,105)	RN ₂₆	(175,140)	RN ₃₅	(245,175)

5.1 布局算法贪婪性验证

本文 4.1.3 小节所述的贪婪寻优算法流程中的步骤 1 这样描述: 为每个 SN 计算规定数量的通信路径组, 并且在步骤 3 中设置相应的最大迭代次数 (记为 Max-times) 来实现 RN 布局算法的不断寻优. 我们假设为每个 SN 计算 3 个可选通信路径组, 保证每个通信路径组中均有两个从 SN 至 GN 不交叉的冗余通信路径. 在 RN 布局算法的评价标准方面以目前大多数布局算法所采用的网络布局所需要的最少 RN 数 (下文记为 Min-RNs) 作为布局算法的评价标准, 并且令每个 RN 最多可以转送来自四个 SN 的监测数据, 在 Max-times = 100 和 Max-times = 10000 情况下分别进行仿真.

如图 4 所示为迭代 100 次的仿真结果, 共需布局 16 个 RN, 图 5 则是迭代 10000 次的仿真结果, 其仅需 13 个 RN 即可完成 RN 布局. 因此我们可以看出, 在一定时间限度内, 当以布局所需要的 RN 个数为算法评价目标时, 随着布局算法运行迭代次数的增加, 由布局算法的贪婪性可知算法最终给出的布局方案需要的 RN 数的变化趋势是将会逐渐减小.

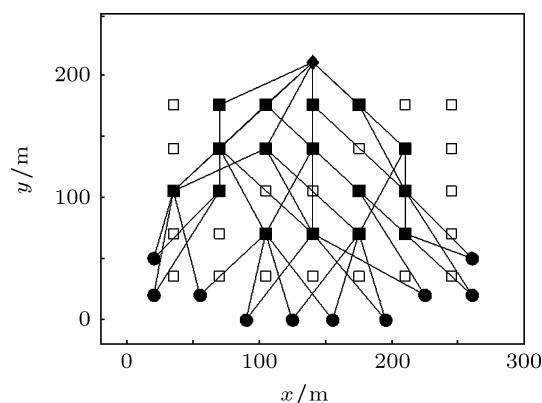


图4 100次迭代后的仿真结果

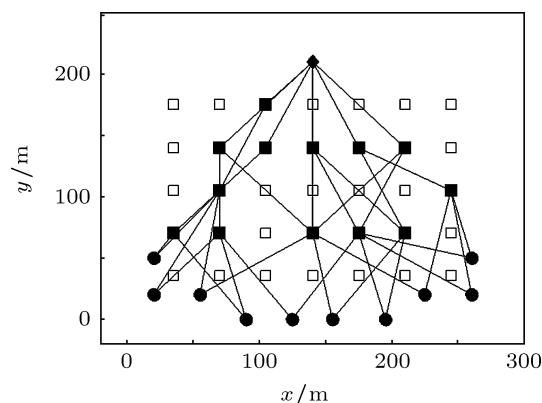


图5 10000次迭代后的仿真结果

5.2 通信容量设置对布局结果影响的验证

本文 3.2 小节从增强网络中 RN 本身工作可靠性的角度出发引入了 RN 通信容量的网络评价前提, 即网络每个 RN 的数据转送率均不能超过该 RN 所限定的通信容量. 为便于仿真分析, 这里作如下不失一般性的简化处理, 假设网络中每个 SN 的数据发送周期相同, 且每个 SN 的数据采集量相同, 那么某 RN 的通信容量 (下文记为 Max-com-cap) 就可以用经由该 RN 转发数据的允许的 SN 的最大个数所代替. 接下来, 我们仍以 Min-RNs 作为 RN 布局算法评价标准, 令 Max-times = 1000, 在 Max-com-cap = 4 和 Max-com-cap = 5 条件下分别进行仿真.

如图 6 和 7 所示为不同 RN 通讯容量对应 RN 布局不同影响的对比仿真结果, 其中图 6 的布局方案需要 14 个 RN, 而图 7 所示的布局结果仅需要 13 个 RN 即可完成布局. 分析如下: 由于 RN 通信容量的增大意味着单一 RN 可以传送更多 SN 的数据, 故图 8 所示的 RN 布局方案与图 7 相比, 需要少布局 3 个 RN 即可完成网络布设, 实现网络中节点的容错性连通. 这说明本文提出的 RN 布局改进算法可以轻松地设置网络中各个 RN 的通信容量, 并且布局算法会更根据设置的 RN 通信容量的不同提供相应配套的布局方案.

如下说明: 下文的仿真不论对于最小网络路径长度 (下文记作 min-dis) 还是最小网络距离因子 (下文记作 min-dis-fac) 的相关计算, 均是求取了 SN 两条通信路径相应参数的均值. 由 (6) 式可知, 节点之间通信的能耗与通信距离的平方和是成正比的, 因此具体的仿真对比参数我们选取布局完成后网络的距离平方和 Net-Dis2, 其计算过程如下: 首先针对每个 SN 的两条通信路径分别求取通信路径上各段距离的平方和, 然后两条通信路径对应的平均值. 这里分别以 min-dis 和 min-dis-fac 作为评价标准进行了 Max-times = 1000 和 Max-com-cap = 4 条件下的对比仿真.

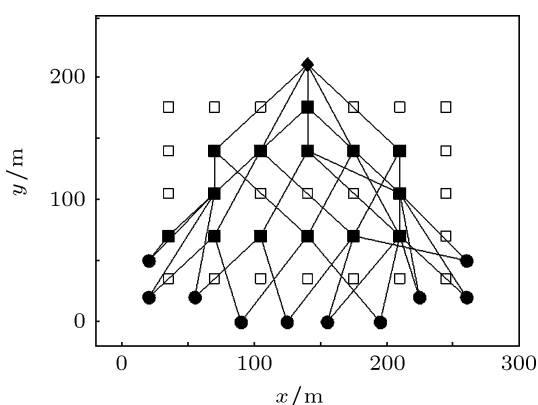


图 6 设置 Max-com-cap = 4 时的仿真结果

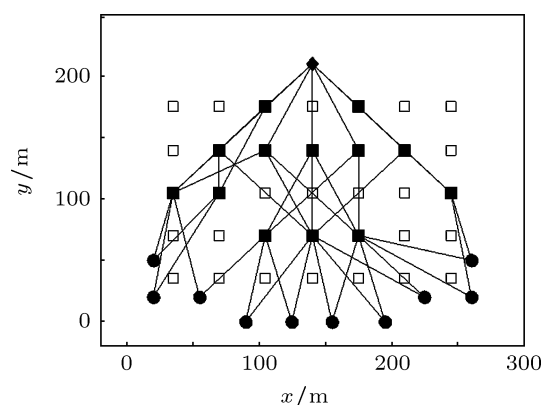


图 7 设置 Max-com-cap = 5 时的仿真结果

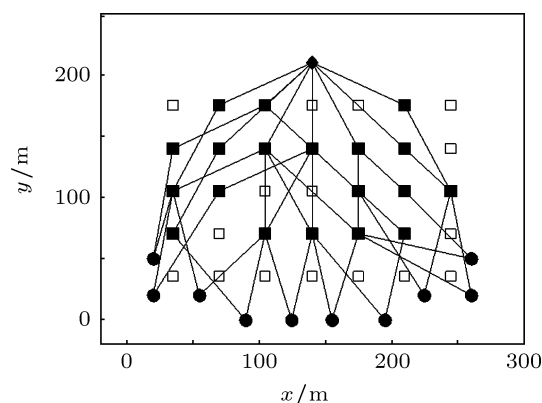


图 8 以 min-dis 为评价标准的仿真结果

5.3 布局算法能效性对比分析

前文 3.3 小节提及新的网络评价标准: 网络距离因子 (dis-fac) 最小则算法最优. 因为本课题从保证网络可靠性的角度出发为每个 SN 计算了由两个互不交叉的通信路径组成的路径组, 因此为了便于比较后续两种评价标准不同的节能效果, 我们作

图 8 是以 min-dis 作为评价标准的仿真结果: 布局 RN 数 (记为 RN-count) 为 19, 网络距离平方和 (求解时需先求每个 SN 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 188050 m², 图 9 则是以 min-dis-fac 为布局算法评价标准, 算法运行结果为 RN-count = 18 和 Net-Dis2 = 178600 m², 通过对比图 8 与图 9, 我

们可以看出以 min-dis-fac 为评价标准的布局算法需要布局更少的 RN 并且有数值更小的 Net-Dis2.

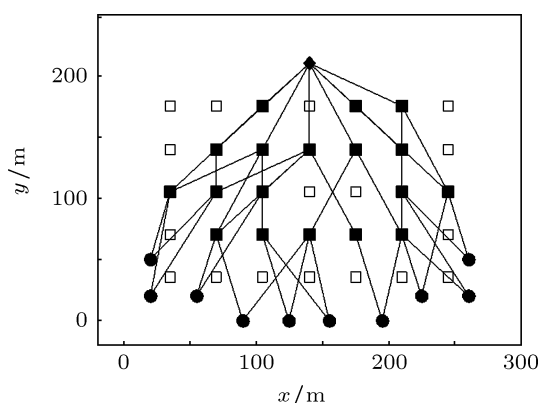


图9 以 min-dis-fac 为评价标准的仿真结果

为进一步说明两种评价标准下 RN 布局算法的能耗对比情况, 我们参照目前研究相对热门的 Zig-Bee 技术进行相关网络的参数设置, 即令 (6) 式中 $P_0 = 3.1623 \times 10^{-13} \text{ W}$, $G_T = G_R = L = 1$, $\lambda = 125 \text{ m}$. 如图 10 所示, 给出了网络中 10 个 SN 对应容错性通信路径的能耗由大到小的柱状分布图, 通过对比可以得出: 以 min-dis-fac 为评价标准的 RN 布局算法与以 min-dis 为评价标准的算法相比, 在减少网络能耗方面有着明显的优势.

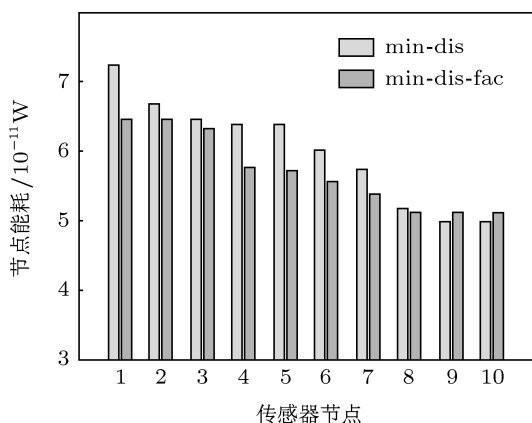


图10 SN 能耗分布对比图

5.4 RN 追加算法仿真

针对 WSN 可能面临添加 SN 的情况, 本文 4.2 小节给出了既存 WSN 实现 RN 追加的具体算法, 这里针对该算法进行如下仿真分析.

假设在一个既存网络中含有 5 个 SN(其坐标对应于表 1 中的 SN₁—SN₅)、一个 GN(其坐标

为 (140,210)). 图 11 是根据 4.1 节提出的 RN 优化布局算法得到的布局方案, 此布局方案共需要 7 个 RN 即可为每个 SN 完成容错性通信路径组的选择, 实现 5 个 SN 至 GN 之间数据网络的构建. 为验证本文提出的既存网络 RN 追加算法的有效性, 我们假设在原来网络 5 个 SN 的基础上新添加 5 个 SN(其坐标对应于表 1 中的 SN₆—SN₁₀), 采用 4.2 小节提出的 RN 追加算法进行仿真, 得到如图 13 所示的 RN 追加与调整方案, 图中 □ 为未添加后续 5 个 SN 时布局所需要的 RN, 而 ■ 表示新添加 5 个 SN 之后需要额外追加的 RN, 并且给出了如图 12 所示的调整后的容错性通信路径网络, 可以看出仅需在既存网络中 7 个 RN 的基础上追加 6 个新的 RN 即可完成监测网络的重构.

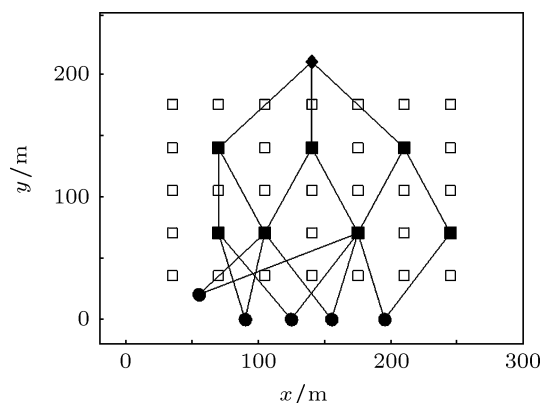


图11 既存网络 RN 布局图

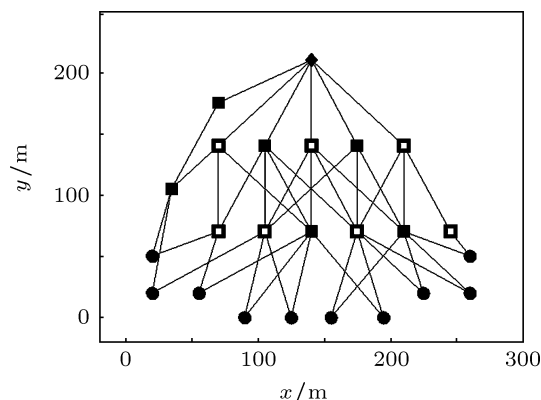


图12 RN 追加与调整仿真图

6 结论

网络节点布局是 WSN 投入运行的前提. 一般而言, GN 及 SN 由其功能特性决定了布局位置的相对固定, 为增强 WSN 整体的连通性与可靠性, 经常

需要将 RN 布置于网络中. 因此可以说 RN 布局策略的优劣决定了无线传感器网络的寿命、通信效率等一系列指标. 本文将通信路径不可逆以及 RN 通信容量等多约束条件引入现有 RN 布局模型. 采用枚举法与贪婪寻优算法相结合的方案完成了网络构建初期 RN 的合理布局以及既存网络添加新的 SN 后所引起的 RN 调整与追加策略. 仿真结果

表明, 本文提出的可操作性的、优化的、通信路径具有一定冗余度的 RN 布局与追加优化算法能够保证多重约束条件下的 RN 布局网络的容错性. 与常规 RN 布局算法相比, 基于最小网络距离因子评价标准的提出能显著减小整个网络的能量损耗, 有效地提高了 RN 布局算法的能效性.

-
- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y 2002 *IEEE Communication Magazine* **40** 102
- [2] Wang Z, Wang Q, Hao X Q 2009 *Proc. of WICOM'09*, Beijing, China, 2009 p1
- [3] Yang Y, Blum R S, Sadler B M 2009 *IEEE Transactions on Signal Processing* **57** 2050
- [4] Vaibhav P, Amarjeet K, Narottam C 2010 *Journal of Electronic and Electrical Engineering* **1** 1
- [5] Zhang X, Ding X Y, LU S L 2009 *Proceedings of the 5th WICOM*, Beijing, China, 2009 p1
- [6] Xi Y F, Yeh E M 2008 *IEEE Transactions on Information Theory* **54** 4081
- [7] Chang T Y, Hsu T C, Hong Y W 2010 *IEEE Transactions on Signal Processing* **58** 1369
- [8] Nidito F, Battelli M, Basagni S 2007 *Proceedings of IEEE 66th Vehicular Technology Conference* 2007 p382
- [9] Xu H L, Huang L SH, Wang G 2009 *Proceedings of 2009 Fifth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, Fujian, China, 2009 p180
- [10] Cannons J, Milstein L B, Zeger K 2009 *IEEE Transactions on Wireless Communications* **8** 5564
- [11] Li J S, Kao H C, Ke J D 2009 *The Institution of Engineering and Technology* **3** 530
- [12] Cheng X, Du D, Wang L 2008 *Wireless Networks* **14** 347
- [13] Pan J, Hou Y T, Cai, L, Shi Y 2003 *Proc. of ACM Mobicom'03*, 2003 p 286
- [14] Bredin J L, Demaine E D, Hajiaghayi M T 2010 *IEEE/ACM Transactions on Networking* **18** 216
- [15] He W L, Cao J 2010 *IEEE Transactions on Neural Networks* **21** 571
- [16] Feng J W, Yam P, Austin F, Xu C 2011 *Zeitschrift für Naturforschung A* **66** 6
- [17] Hao B, Tang J, Xue G L 2004 *Proc. of HPSR'04, Phoenix* 2004 p 246
- [18] Zhou J, Liu Y A, Wu F, Zhang H G, Zhu Y X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 090504 (in Chinese) [周杰, 刘元安, 吴帆, 张洪光, 俎云霄 2011 物理学报 **60** 090504]
- [19] Tang J, Hao B, Arunabha S 2006 *Computer Communications* **29** 490
- [20] Cui S H, Chen G T, Qin S 2009 *Journal of Hangzhou Dianzi University* **29** 107 (in Chinese) [崔素辉, 陈光亭, 辛双 2009 杭州电子科技大学学报 **29** 107]
- [21] Zhang W T, Yuan J, Yu Z, Xu Z X, Shan X M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6896 (in Chinese) [张文铸, 袁坚, 俞哲, 徐赞新, 山秀明 2008 物理学报 **57** 6896]
- [22] Zhang W Y, Xue G L, Misra S 2007 *Proc. of INFOCOM'07, Anchorage* 2007 p1649
- [23] Misra S, Hong S D, Xue G L 2010 *IEEE/ACM Transaction on Networking* **18** 434
- [24] Lin G H, Xue G L 1999 *Information Processing Letters* **69** 53

Relay node placement and addition algorithms in wireless sensor networks*

Wang Zhu^{1)†} Wang Qi²⁾ Wei De-Bao²⁾ Wang Ling¹⁾

1) (*School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China*)

2) (*School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

(Received 28 July 2011; revised manuscript received 3 November 2011)

Abstract

The node placement is the foundation of network operation in wireless sensor networks. In many applications, the positions of gateway node and sensor node are relatively fixed. To guarantee network connectivity and reliability, some relay nodes must be reasonably placed between the gateway node and the sensor node. In the context of the above applications, we introduce many constraint conditions into the existing placement model, and adopt a hybrid placement method based on enumeration and greedy optimization algorithms to determine relay node positions from their candidate location sets, and we finally achieve the relay node initial placement and follow-up adjustment strategies, owing to new sensor nodes joining the current network. The simulation results demonstrate that our operable and optimized relay node placement algorithm can ensure multi-restricted fault-tolerant relay node placement, and the presented new evaluation standard based on the minimum distance factor can significantly improve the energy-efficiency of relay node placement algorithm.

Keywords: wireless sensor networks, relay node placement and addition, greedy optimization algorithm, communication capacity

PACS: 05.60.-k

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.60973162), the Natural Science Foundation of Shandong Province of China (Grant No. ZR2009GM037), the Science and technology of Shandong Province of China(Grant No.2010GGX10132), the Technology Research and Development Program of Weihai (Grant No. 2008011), and the Technology Research and Development Program of Weihai High-tech Development Zone in Shandong Province of China (Grant No. 201025)

† E-mail: wangzhu@hit.edu.cn