

# 能耗均衡的无线传感器网络多 Sink 节点部署优化方法

邵开丽, 付 辉

(黄河科技学院, 河南郑州 450063)

**摘要:**针对传感器网络中单 Sink 节点存在近距离传感器节点过早死亡、传输路径单一、传输延迟及节点失效等问题, 提出了一种综合考虑网络布局和网络能耗的多 Sink 节点部署优化新方法。首先, 为缩短 Sink 节点到传感器节点的传输距离, 建立了加权距离最小化模型; 同时, 为均衡网络能耗, 建立了无线传感器网络能耗最小化模型。然后, 根据所建立多 Sink 节点部署优化模型的特点, 使用加权系数将多目标模型单目标化, 并设计了上升启发式算法进行求解。实验结果表明, 提出的多 Sink 节点部署优化方法既能保证网络布局最优, 又进一步均衡了网络能量消耗, 有助于延长无线传感器网络的生命周期。

**关键词:**无线传感器网络; 多 Sink 节点; 布局优化; 多目标模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1002-1841(2015)09-0106-05

## Novel Optimal Deployment Method of Multiple Sink Nodes in WSNs for Balanced Energy Consumption

SHAO Kai-li, FU Hui

(College of HUANGHE Science & Technology, Zhengzhou 450063, China)

**Abstract:** Wireless sensor network (WSNs) with a single sink node has some disadvantages of the quickness of consuming energy on the critical path, the singleness of routing algorithm, and the invalidation of the sink node. To solve these problems, a novel multi-objective programming approach for multiple sink nodes in WSNs was developed in this paper. In our approach, multiple sink nodes were not only deployed, but energy consumption was also considered as the uncertain parameters. Our multi-objective model attempted to minimize the weighted distance from sensor nodes to sink nodes, at the same time to balance WSNs energy consumption through minimizing the objective of consuming energy. Considering the global evaluation of two objectives, a compromise programming model was formulated and solved to obtain a non-dominating compromise solution with ascent algorithm. Experiment results show that the proposed approach can keep both optimal deployment of multi-sink nodes and balance of energy consumption in WSNs, which can prolong the lifetime of the network.

**Key words:** WSNs; multiple sink nodes; optimal deployment; multi-objective model

### 0 引言

随着微电子机械系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 的发展, 低成本、低能耗、多功能的无线传感器及其网络得到广泛应用<sup>[1]</sup>, 涉及军事传感、交通监控、视频监控、工业和制造业自动化等领域<sup>[2-3]</sup>。无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSNs) 由大量体积微小的节点设备组成, 该节点设备集成一个或多个传感器、数据处理单元、短距离无线通信模块和供电电源, 可实现信息采集、存储、计算、通信等功能<sup>[4]</sup>。然而, WSNs 节点受固定电源的限制, 其能量和计算资源严重受限。因此, 如何高效利用网络电源, 最大限度延长网络生命周期, 成为 WSNs 研究的关键及热点。近年来, 很多专家和学者致力于网络中的节点设备、网络协议、节点布局、数据处理、电池等进行深入研究, 在方法和技术上取得了一定成果。本文拟以 WSNs 中多 Sink 节点的布局为研究对象, 旨在通过优化节点布局有效提高网络生命周期。

Sink 节点也称汇聚节点或网关节点, 连接 WSNs 与外网并实现通信。目前, 国内外学者针对多 Sink 节点的布局问题, 研究其对网络寿命的影响已有部分成果。文献[5-6]运用线性规划模型研究多 Sink 节点部署的最佳位置, 并确定了 WSNs 中的最优路由信息流量路径, 能有效提高网络的寿命和保证能量的均衡性。文献[7]提出一种基于基因表达式编程 (Gene Expression Programming, GEP) 的多 sink 节点部署策略和一种 GEP-MSN 算法, 达到了延长网络生存周期和降低响应时间的目的。文献[8]采用最短路径和矩阵位置方法部署最佳多 Sink 节点, 实验结果显示这种基于约束的部署算法与 KSP 和 KDP 算法相比, 更能充分发挥 WSNs 的潜能。文献[9]提出一种基于能量水平的多 Sink 节点传感器网络路由算法, 与最小能量消耗路由算法相比, 更能有效延长 WSNs 的寿命。

针对 WSNs 中单 Sink 节点存在近距离传感器节点过早死亡、传输路径单一、传输延迟及节点失效等问题, 本文主要研究多 Sink 的部署策略, 提出一种综合考虑网络布局和网络能耗的多 Sink 节点部署优化新方法。该方法通过建立多 Sink 节点布局优化多目标模型, 同时实现两个优化目标: 一是实现各传感

器节点到 Sink 节点的总加权距离最小化,二是实现 WSNs 网络能耗最小化。根据所建立模型的特点,本文首先使用加权系数将多目标模型单目标化,并结合设计的上升启发式算法进行求解,得到多 Sink 节点最优仿真部署方案,最后在仿真实验中分析和验证了多 Sink 节点布局优化模型和上升启发式算法的有效性。实验结果表明,与传统只考虑距离的节点部署策略相比,本文提出的多 Sink 节点部署优化方法综合考虑了距离和网络能耗两个目标,既能保证网络布局最优,又进一步均衡了网络能量消耗,有助于延长 WSNs 生命周期。

1 多 Sink 节点布局模型

1.1 问题描述

无线传感器网络中,能耗、时延和可靠性是度量 QOS 的重要指标。基此,研究多 Sink 节点的布局及优化问题,有利于减少传感器节点到 Sink 节点的距离,即有效缩短了信息传输时延;而且,多 Sink 节点传感器网络拓展了传感器节点到 Sink 节点的信息通信路径,有利于均衡网络能耗和保证信息可靠性。因此,本文在对多 Sink 节点布局时,采用经典选址模型 P-中位问题(p-median problems)对多 Sink 节点布局进行优化,使传感器节点到所有 Sink 节点的加权距离最小;同时,为了使整个网络能量消耗最少,建立了网络能量最小化模型,以最大化延长网络生命周期。

1.2 网络结构模型

无线传感器网络结构模型采用如图 1 所示的网络结构。其中,传感器节点随机分布在监测区域,将采集的监测信息无线传输到布局最优的 Sink 节点,对信息进行处理后通过 Internet/GPRS/3G 等网络上传至监控中心。与传感器节点相比, Sink 节点连接外网的前置机或数据服务器,具有持续电源和更强的数据处理能力。

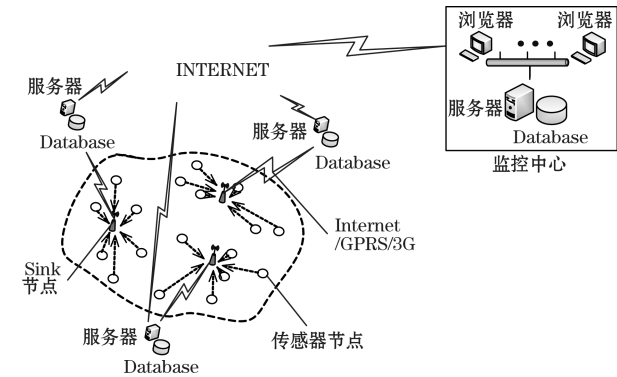


图 1 无线传感器网络多 Sink 节点网络结构

1.3 布局优化模型

文献[10]中采用 PMP 模型对 WSNs 中的多 Sink 节点进行部署,仿真结果表明,该方法与随机布局方案相比进一步降低了网络能量消耗,有效延长了网络寿命。然而,WSNs 更关注能量优先,不能仅考虑传统选址中注重的路径最优。因此,研究多 Sink 节点布局优化时,应该把节点能量消耗及网络能量均衡使用放在第一位。本文研究 WSNs 多 Sink 节点的部署时,同时兼顾了路径最优和网络能量消耗最少两项指标,并基于此建立

了相应的最小化目标函数,提出一种有效的多 Sink 节点布局优化模型及方法。

1.3.1 多 Sink 节点布局目标

假设可以用  $S = \{se_1, se_2, L, se_N\} (|S| = N)$  和  $R = \{si_1, si_2, L, si_P\} (|R| = P)$  表示网络中的传感器节点集合和 Sink 节点集合,  $V = S \cup R$ , 用  $E$  表示网络中两个节点之间的通信边,则监测区域布设的 WSNs 可以用有向图  $G(V, E)$  来表示。若网络中 Sink 节点候选位置集合为  $Q = \{L_1, L_2, L, L_M\} (|Q| = M)$ , 为了使 Sink 节点到各传感器节点的总加权距离最小,将 WSNs 多 Sink 节点布局目标  $Obj_1$  表示为目标函数式(1)。目标函数中的参数定义详见表 1。

表 1 WSNs 多 Sink 节点布局目标参数

参数	定义
$h_i$	固定时间内传感器节点 $i$ 发送请求数
$d_{ij}$	传感器节点 $i$ 和 Sink 节点 $j$ 之间的欧式距离
$N$	传感器节点的数量
$S$	传感器节点集合
$P$	预置的 Sink 节点数量
$R$	预置的 Sink 节点集合
$M$	候选的 Sink 节点数量
$Q$	Sink 节点候选位置集合

定义的决策变量  $X_j$  和  $Y_{ij}$  描述如下:

$$X_j = \begin{cases} 1, & \text{如果 } j \text{ 被选为 Sink 节点} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$
$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果传感器节点 } i \text{ 被 Sink 节点 } j \text{ 服务} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

可以建立的多 Sink 节点布局目标函数  $Obj_1$  的数学模型表示为:

$$\text{Min } Obj_1 = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N h_i d_{ij} X_j Y_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Subject to: } \sum_{j \in Q} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in S \quad (2)$$

$$\sum_{j \in Q} X_j = P \quad (3)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i \in S, j \in Q \quad (4)$$

$$Y_{ij} = 0, 1 \quad \forall i \in S, j \in Q \quad (5)$$

$$X_j = 0, 1 \quad \forall j \in Q \quad (6)$$

目标函数式(1)是多 Sink 节点布局目标函数  $Obj_1$  的数学模型,使各传感器节点到 Sink 节点的总加权距离最小化;约束式(2)是保证每个传感器节点只能将发送的请求数上传到最近的一个 Sink 节点;约束式(3)是保证网络中的 Sink 节点数量为预置的个;约束式(4)是保证传感器节点只能被建立的 Sink 节点服务;约束式(5)和(6)是目标函数中所有决策变量的 0-1 约束。

1.3.2 网络能耗目标

在 WSNs 中,传感器节点负责把采集的数据经过一跳或多跳上传到 Sink 节点,并通过外网(Internet/GPRS/3G 等)上传至监控中心。由于多 Sink 节点适用于大规模、高可靠性的网络,网络传感器节点密度及距离都较大,因此采用分层的多跳分簇

路由协议,簇头兼具中继和数据融合的作用,Sink 节点融合转发簇头或最近传感器节点数据至上层网络。假设每个传感器节点在固定的时间内发送  $l_i (i=1,2,L,N)$  位数据,则每轮传感器节点传输数据消耗的能量为:

$$E_{s_i} = \begin{cases} l_i E_{elec} + l_i e_{ft} d^2, & d < d_0 \\ l_i E_{elec} + l_i e_{mp} d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (7)$$

每轮传感器节点接收  $l_i$  位数据消耗的能量为:

$$E_{r_i} = l_i E_{elec} \quad (8)$$

式中:  $N$  为网络中的传感器节点数量;  $E_{elec}$  为接收或发送单位数据的无线电路损耗能量;  $d_0$  和  $d$  分别为距离门限和各传感器到簇头或 Sink 节点间距离;  $e_{ft}$  与  $e_{mp}$  为自由空间功率放大系数和多径衰落功率放大系数<sup>[11]</sup>。

假设网络中簇头节点个数为  $K$ ,  $m$  为簇内传感器节点数目,则每轮簇头消耗的能量包括接收簇内节点数据时消耗能量,数据融合时消耗能量,以及发送融合后数据所消耗能量的总和,即:

$$\begin{aligned} E_{ch_j} &= \sum_{i=1}^m l_i E_{elec} + \left( \sum_{i=1}^m l_i + l_j \right) E_{da} + l_j + \left( \sum_{i=1}^m l_i + l_j \right) E_{elec} + \varepsilon \\ &= \left( \sum_{i=1}^m E_{s_i} + E_{s_j} \right) + \sum_{i=1}^m E_{r_i} + (m+1) E_{da} \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $E_{da}$  为簇头融合单位数据时消耗能量;  $\varepsilon$  为簇头融合后的总数据量传输到 Sink 节点所消耗的  $e_{ft} d^2$  或  $e_{mp} d^4$  能量。

故为使多 Sink 节点传感网能耗最小化,建立的多 Sink 节点网络能耗目标  $Obj_2$  的数学模型为:

$$\text{Minimize } Obj_2 = \sum_{j=1}^K E_{ch_j} + \sum_{i=1}^{N-K} E_{s_i} \quad (10)$$

## 2 多 Sink 节点部署优化方法实现

### 2.1 化为单目标

本文采用折中规划 (Compromise Programming, CP) 方法将多目标函数化为单目标。假设  $Obj_1^*$  为布局优化的最优目标,  $Obj_2^*$  为网络能耗最优目标,  $w (0 \leq w \leq 1)$  为两个目标函数的相对权重,将上述多目标函数转化为单目标,则 WSNs 的多 Sink 节点布局优化目标函数的总数学模型为:

$$MnObj_3 = \left[ w \times \frac{Obj_1 - Obj_1^*}{Obj_1^*} + (1-w) \times \frac{Obj_2 - Obj_2^*}{Obj_2^*} \right] \quad (11)$$

### 2.2 部署优化方法的实现

在对 WSNs 的多 Sink 节点布局优化模型实现过程中,采用上升启发式算法<sup>[12]</sup>对式(1)、式(9)和式(10)的最优目标值进行求解,求解过程描述如下。

输入:初始化所有参数。

(1) 设置 Sink 节点数量  $P$  值,目标权重系数  $w$  值;

(2) 求解  $P$  个 Sink 节点的初始目标值,并将  $P$  个节点位置设置为初始最优方案。即从候选  $M$  个 Sink 节点位置中随机选取  $P$  个节点位置,计算集合  $P$  的目标值  $Obj_3$ ,初始最优方案设置为  $OL_{1 \times P} = \{L_1, L_2, L, L_t\}$ ,  $t \in P$ ,并设置迭代次数最大值  $g_{max}$  值;

(3) for  $g = 1 : 1 : g_{max}$

(4) 从候选个 Sink 节点位置中随机选取节点位置  $i$  和  $j (i \in P, j \notin P)$ ,将  $i$  和  $j$  交换,组成新的集合  $P'$ ;

(5) 求解  $P$  个 Sink 节点的布局目标函数最优值  $Obj_1^*$ ,求解过程同样运用该上升启发式算法进行求解;

(6) 求解  $P$  个 Sink 节点的网络能耗目标函数最优值  $Obj_2^*$ ,网络路由协议采用 Leach 协议,求解过程同样运用该上升启发式算法进行求解;

(7) 计算集合  $P'$  的目标函数值  $Obj'_3$ ;

(8) if  $Obj'_3 < Obj_3$

(9) 则  $Obj_3 = Obj'_3$ ,  $P = P'$ ; 否则,保持目标值  $Obj_3$  和集合  $P$  不变;

(10) end if

(11) end for

输出:最优目标  $Obj_3$  和集合  $P$  对应的最优 Sink 节点位置。

## 3 仿真实验与分析

### 3.1 实验参数设置

本文采用 MATLAB7.1 平台进行仿真实验,在目标区域为  $[0,20] \times [0,20]$  的坐标平面中随机布置 50 个传感器节点,随机布置的传感器节点场景如图 2 中黑色 "+" 符号所示。为更精确地确定 Sink 节点的布局,本文采用与栅格结构 (grid) 不同的布置方式,随机设定候选 Sink 节点位置数量  $M$  值为  $41 \times 41 = 1681$  (区域内平均每 0.5 单位 1 个候选位置),从中选出  $P$  个预置的 Sink 节点以满足多目标函数的目标要求。其中,布局优化模型中的需求量  $h_i$  为  $[10, 100]$  的随机数,  $d_{ij}$  为节点之间的欧式距离;网络能耗模型各传感器节点发送的数据包  $l_i$  值与  $h_i$  相同,  $E_{elec} = 5 \times 10^{-8}$ ,  $e_{ft} = 10 \times 10^{-12}$ ,  $e_{mp} = 1.3 \times 10^{-15}$ ,  $d_0$  根据公式  $d_0 = \sqrt{E_{fs}/E_{mp}}$  计算得出,网络路由协议采用 Leach 协议。为了减少能耗的随机性,网络能耗计算采用前 5 轮网络能量消耗值。

### 3.2 布局计算结果

根据本文设计的上升启发式算法,设定迭代次数为  $g = 2000$  (迭代次数  $> 41 \times 41$ , 确保每个候选 Sink 节点位置至少被选择一次),预置 Sink 节点数量  $P = 2$ ,权重系数  $w = 0.5$ ,计算出基于网络布局和网络能耗的多 Sink 布局最优方案。图 2 描述了多 Sink 节点在不同目标下的最优布局。其中,基于网络布局的多 Sink 节点最优布局位置为 (14.1, 17.1), (9.3, 7.6), 最优目标值  $Obj_1^*$  为 12 920; 基于网络能耗的多 Sink 节点最优布局位置为 (13.9, 6.0), (18.3, 10.7), 最优目标值  $Obj_2^*$  为 0.001 407; 基于能量均衡的多 Sink 节点最优布局位置为 (11.3, 14.1), (5.8, 2.9), 最优目标值  $Obj_3^*$  为 0.049 898。图 3 给出了基于能量均衡的多 Sink 节点布局寻优过程中解的变化。

### 3.3 Sink 节点数量与最优布局的关系

在实际应用场景中, Sink 节点数量可根据网络规模、数据精度及传输时延等要求做出适当调整,因此,本文分析了当 Sink 节点数量  $P$  从 1 到 10 变化时对最优布局的影响,且预置 Sink 节点数量发生变化时,最优布置方案也会发生变化。实验结果表明,当从 1 到 10 增加时,网络最小加权距离逐步减小,如图 4 所示。这种现象与文献[10]中所得到的结果相吻合。在此基础上,本文从 WSNs 网络生命周期考虑,进一步分析了

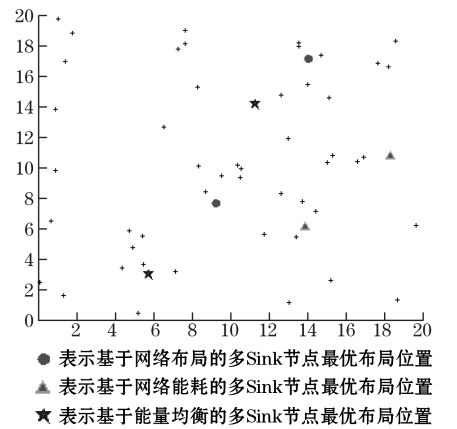


图 2 WSNs 多 Sink 节点最优布局

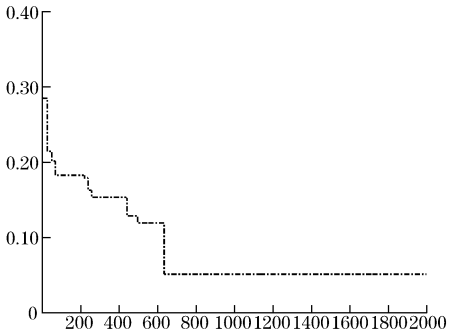


图 3 Sink 节点布局寻优过程中解的变化

多 Sink 节点数量与网络能耗值的关系,如图 5 所示。

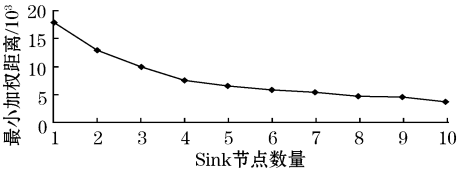


图 4 Sink 节点数量与最小加权距离的关系

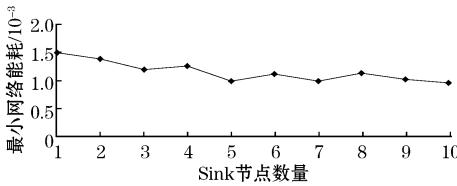


图 5 Sink 节点数量与网络能耗的关系

在图 5 中,随着 Sink 节点数量的增加,网络能耗值整体上呈现出逐步减少的趋势,但个别  $P$  值对应的能耗值有所增加,呈现出与最小加权距离不同步的结果。产生这种现象的原因是:由于本文中 WSNs 的路由协议采用 Leach 协议,该协议是一种带有簇头选举的分层、多跳路由协议,其簇头的选举是变化的,会导致个别  $P$  值对应的多 Sink 节点的网络能耗会出现一定偏差。这种不同步的结果说明,在考虑 WSNs 多 Sink 节点布局优化时,除了要考虑加权距离最小化外,还必须考虑 Sink 节点数量与网络能耗值的关系。

图 6 综合了最小加权距离与网络能耗,描述了  $P$  从 1 到 10 变化时 Sink 节点数量与多目标最优值的关系。表 2 详细列出了多 Sink 节点数量的最优布局方案。从该表中数据可以看出,仅考虑单目标(最小加权距离或最小网络能耗)的多 Sink 节点布局方案,与同时考虑两个目标的优化方案存在一定的差异性。多目标的布局方案兼具了加权距离和网络能量消耗,要优于单目标的布局方案,更适用于 WSNs 实际应用场景。

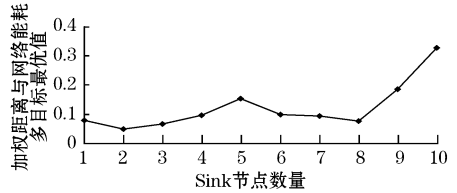


图 6 Sink 节点数量与多目标最优值的关系

表 2 Sink 节点数量的最优部署方案

Sink 节点数量	布局目标		能耗目标 ( $10^{-6}$ )		多目标 ( $10^{-6}$ )	
	Obj <sub>1</sub> <sup>*</sup>	节点位置	Obj <sub>2</sub> <sup>*</sup>	节点位置	Obj <sub>3</sub> <sup>*</sup>	节点位置
1	17821	(10.9, 10.0)	1502	(3.7, 3.4)	78742	(11.5, 8.3)
2	12920	(14.1, 17.1), (9.3, 7.6)	1407	(13.9, 6.0), (18.3, 10.7)	49898	(11.3, 14.1), (5.8, 2.9)
3	9952	(4.1, 4.5), (12.9, 7.8), (14.2, 17.5)	1228	(11.6, 9.8), (0.4, 11.3), (16.8, 16.5)	66667	(2.3, 16.9, 8), (10.9, 9.0), (16.8, 16.5)
4	7572	(15.3, 17.5), (4.7, 3.3), (2.6, 16.6), (13.0, 8.2)	1285	(8.1, 10.3), (7.4, 5.5), (9.0, 4.3), (3.7, 3.4)	96109	(15.8, 11.9), (7.9, 5.9), (2.5, 16.5), (16.7, 16.5)
5	6456	(14.8, 17.4), (2.1, 17.1), (14.2, 7.1), (5.2, 4.0), (9.8, 9.5)	1049	(7.6, 10.2), (17.2, 1.1), (2.7, 18.3), (3.7, 3.4), (16.8, 16.5)	153121	(16.0, 19.7), (0.9, 16.8), (12.0, 8.9), (3.7, 3.4), (16.7, 16.5)
6	5816	(2.1, 17.8), (15.6, 10.5), (4.7, 3.3), (14.2, 6.3), (9.8, 9.5), (15.2, 17.2)	1163	(5.8, 2.9), (17.2, 1.1), (3.1, 7.2), (13.7, 8.1), (3.7, 3.4), (10.3, 4.6)	98364	(2.6, 15.4), (7.8, 1.4), (15.0, 16.1), (13.7, 8.1), (3.7, 3.4), (10.3, 4.6)
7	5327	(15.4, 10.6), (19.1, 18.8), (10.3, 10.8), (14.2, 18.0), (13.6, 6.2), (5.2, 3.5), (2.3, 16.9)	1045	(2.3, 15.0), (6.5, 19.3), (17.0, 2.4), (18.1, 9.8), (13.4, 12.3), (3.7, 3.4), (2.8, 5.0)	94790	(14.0, 9.7), (16.0, 19.7), (17.0, 2.4), (9.8, 9.5), (0.9, 13.5), (3.7, 3.4), (2.9, 16.6)
8	4723	(13.7, 17.4), (5.3, 3.1), (10.9, 9.4), (14.8, 10.4), (1.3, 1.7), (13.5, 5.4), (2.2, 18.0), (19.0, 18.8)	1181	(6.3, 8.1), (5.1, 5.0), (18.4, 0.9), (18.1, 9.7), (0.2, 6.2), (5.5, 0.7), (2.7, 5.0), (7.8, 10.9)	78026	(13.6, 17.9), (5.1, 5.0), (11.5, 13.3), (18.0, 17.6), (16.6, 10.7), (13.0, 4.2), (2.9, 16.6), (7.8, 10.9)
9	4552	(19.3, 19.4), (8.3, 8.9), (7.1, 17.5), (1.0, 1.8), (15.0, 17.0), (13.6, 6.1), (0.9, 17.5), (15.0, 10.0), (4.4, 4.0)	1083	(6.3, 8.1), (5.1, 4.9), (9.9, 4.2), (7.4, 4.6), (17.2, 6.6), (4.6, 17.1), (2.8, 16.5), (15.0, 11.7), (12.0, 3.3)	186616	(14.1, 3.5), (5.2, 5.0), (11.5, 13.3), (18.1, 9.8), (12.8, 16.6), (19.5, 15.3), (2.9, 16.5), (10.5, 7.9), (12.0, 3.4)
10	3750	(1.6, 16.0), (9.7, 9.4), (7.1, 17.5), (14.0, 7.0), (13.2, 0.8), (13.5, 17.9), (18.9, 17.5), (1.3, 1.7), (15.4, 10.8), (4.4, 4.0)	1017	(14.1, 3.5), (8.2, 10.7), (6.5, 19.3), (19.9, 15.4), (19.6, 6.2), (14.0, 7.2), (2.8, 16.5), (10.5, 7.7), (15.0, 11.7), (14.6, 15.1)	327556	(6.3, 8.1), (10.9, 9.0), (6.5, 19.3), (18.4, 19.9), (17.2, 6.6), (5.5, 0.7), (2.9, 16.5), (10.5, 7.8), (15.0, 11.7), (14.6, 15.1)

3.4 Sink 节点数量与目标权重的关系

表 3 描述了目标权重系数变化对多 Sink 节点布局的影响。其中,Sink 节点数量  $P=2$ ,权重系数  $w$  值从 0.1~0.9。从表中可以看出,权重系数  $w$  变化时,Sink 节点多目标最优方案也相应变化。当  $w$  增加时,最小加权距离在总目标中的比重增加;相反,则网络能耗目标的比重增加。实际应用时,可根据 WSNs 的应用场景适当调整目标权重系数,得到更满意的多 Sink 节点部署方案,从而扩大本论文所提出部署方法的适用范围。

表 3 W 值变化对多 Sink 节点布局的影响		
W(权重系数)	Obj3( $10^{-6}$ )	位置坐标
0.1	60503	(10.2,15.3),(5.8,2.9)
0.2	32175	(2.3,16.9),(14.9,8.3)
0.3	38995	(11.3,14.1),(5.8,2.9)
0.4	95763	(2.3,16.9),(14.9,8.3)
0.5	49897	(11.3,14.1),(5.8,2.9)
0.6	78397	(14.1,17.1),(5.8,2.9)
0.7	80700	(13.8,15.4),(9.6,7.5)
0.8	54913	(14.1,17.1),(9.6,7.5)
0.9	28016	(14.1,17.1),(9.6,7.5)

4 结论

本文通过分析 WSNs 的特点及单 Sink 节点传感器网络存在的问题,研究 WSNs 多 Sink 节点最佳部署策略,提出了一种能耗均衡的多 Sink 节点部署优化方法。与传统多 Sink 节点布局不同,本文建立的布局优化模型综合考虑了距离和网络能耗两个指标,并结合上升启发式算法实现了多 sink 节点的仿真布局。实验数据分析和结果表明,本文提出的多 Sink 节点部署模型及其部署优化方法,与只考虑单目标(最小加权距离或最小网络能耗)的多 Sink 节点布局方案相比,部署方案存在一定的差异性,为 WSNs 多 Sink 节点部署策略提供了一种参考方案。

参考文献:

[1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422.

[2] CHONG C Y, KUMAR S P. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 2003, 91(8): 1247-

1256.

[3] YOUNIS M, AKKAYA K. Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 2008, 6(4): 621-655.

[4] SLIJEPCEVIC S, POTKONJAK M. Power efficient organization of wireless sensor networks. *Communications*, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on. IEEE, Helsinki, 2001.

[5] KIM H, SEOK Y, CHOI N, et al. Optimal multi-sink positioning and energy-efficient routing in wireless sensor networks. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 264-274.

[6] HAERYONG K, TAEKYOUNG K, PYEONGSOO M. Multiple sink positioning and routing to maximize the lifetime of sensor networks. *IEEE transactions on communications*, 2008, 91(11): 3499-3506.

[7] DAI S, TANG C, QIAO S, et al. Optimal multiple sink nodes deployment in wireless sensor networks based on gene expression programming. 2010 ICCSN' 10 Second International Conference on IEEE, Chengdu, 2010.

[8] FLATHAGEN J, KURE Q, ENGELSTAD P E. Constrained-based multiple sink placement for wireless sensor networks. 2011 IEEE 8th International Conference on IEEE, Valencia, 2011.

[9] 吴中博,樊小泊,陈红. 基于能量水平的多 Sink 节点传感器网络路由算法. *计算机研究与发展*, 2008, 45(1): 41-46.

[10] 罗玓玓,赵海,尹震宇,等. WSNs 中基于 PMP 的多 SINK 节点布局研究与实现. *小型微型计算机系统*, 2007, 28(6): 979-982.

[11] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on. IEEE, Hawaii*, 2000.

[12] TEITZ M B, BART P. Heuristic methods for estimating the generalized vertex median of a weighted graph. *Operations research*, 1968, 16(5): 955-961.

作者简介:邵开丽(1976—),讲师,硕士,研究方向为物联网技术。  
E-mail:sklemail@163.com  
付辉(1982—),讲师,硕士,研究方向为计算机应用。  
E-mail:iefh@163.com

(上接第 94 页)

[2] HIMMELBLAU D M. Accounts of experiences in the application of artificial neural networks in chemical engineering. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(16): 5782-5796.

[3] CHEN K, J J, WANG H, et al. Adaptive local kernel -based learning for soft sensor modeling of nonlinear processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011, 89(10): 2117-2124.

[4] SUYKENS J A K, VAN GESTEL T, DE BRABANTER J, et al. Least Squares Support Vector Machines. Singapore: World Scientific, 2002, 2(11): 285-288.

[5] KADLEC P, GRBIC R, GABRYS B. Review of adaptation mechanisms for data-driven soft sensors. *Computers & chemical Engineering*, 2011, 35(1): 1-24.

[6] LIU Y, WANG H Q, YU J, et al. Selective recursive kernel learning for online identification of nonlinear systems with NARX form. *Journal of Process Control*, 2010, 20(2): 181-194.

[7] FORTUNA L, GRAZIANI S, RIZZO A, et al. Soft sensors for monitoring

and control of industrial processes. Springer, Berlin, 2010.

[8] TAYLOR J, CRISTIANINI N. Kernel methods for pattern analysis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.

[9] SUYKENS, VANDEWALE J. Least squares support vector machine classifiers. *Neural Processing Letters*, 1999, 9(3): 293-300.

[10] 毛国君. 数据挖掘原理与算法. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[11] 黄磊, 张书毕, 王亮亮, 等. 粒子群最小二乘支持向量机在 GPS 高程拟合中的应用. *测绘科学*, 2010, 35(5): 190-192.

[12] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法—人工鱼群算法. [学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2003.

[13] TANG H S, XUE S T, CHEN R. Online weighted LS-SVM for hysteretic structural system identification. *Engineering Structures*, 2006, 28(12): 1728-1735.

作者简介: 李荣雨(1977—), 副教授, 研究方向: 工业系统的监控与先进控制。  
王立明(1989—), 硕士, 研究方向: 复杂过程的先进控制,  
E-mail: wlm890522@163.com