

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2017.11.013

ILP 模型结合连通性约束的 WSN 传感器部署方案^①

郑黎¹, 刘莹¹, 黎远松²

1. 四川工程职业技术学院, 四川 德阳 618000; 2. 四川理工学院 计算机学院, 四川 自贡 643000

摘要: 针对无线传感器网络(WSN)区域覆盖中传感器部署的覆盖性和连通性问题, 提出一种基于整数线性规划(ILP)模型和连通性约束的 WSN 传感器部署方案. 在传统基于 ILP 的覆盖模型中融入连通性约束, 并设置了直接和间接连接的决策变量, 使其在不同的覆盖范围 R_{cov} 和通信范围 R_{com} 下, 都能够利用最小数量的传感器实现区域 k -覆盖并保持连通性. 实验结果表明, 与现有的常规部署模式相比, 该方案能够获得最小的传感器数量, 有效降低了部署成本.

关键词: 无线传感网络; 整数线性规划; k -覆盖; 连通性约束; 最小化传感器数量

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)11-0077-07

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由多个静态传感器组成, 通过无线介质连接, 执行物理世界的分布式感知、数据处理和决策, 通常应用于国家安全、交通监控、地震监测、环境监测等领域^[1]. 一个 WSN 由多种低功率、低成本的传感器节点组成, 并具备感应、处理数据以及与其他节点通信的功能. 在 WSN 中最具有挑战性的问题是传感器在监控区域的覆盖问题^[2].

在大多数 WSN 中, 传感器的部署可分为预先部署和随机部署. 随机部署需要大量的传感器节点, 这种方法通常用于不可预先访问的监控区域(如水下传感领域). 在预先部署情况下, 使用最小数量的传感器实现完全覆盖, 能够使成本最小化^[3]. 预先部署也分为两种目标: 区域覆盖和目标点覆盖^[4]. 在区域覆盖中, 部署传感器来监测一个给定的区域; 而在目标覆盖中, 只监测一组特定目标点. 传感器的覆盖问题可以进一步分为覆盖问题或 k -覆盖问题^[5]. 在覆盖问题中, 每一个目标必须被至少一个有源传感器覆盖. 然而, 在 k -覆盖问题中, 每一个目标需要至少被 k 个不同的传感器覆盖. 本文研究了预先覆盖中的区域 k -覆盖问题, 且本文不考虑能量约束, 假设每个传感器可由一个能量源提供能量, 例如, 部署在一个大型建筑物中的检测传感器.

目前, 针对区域覆盖问题, 学者提出了多种覆盖方案^[6-9]. 本文提出一种基于连通性约束的改进型整数线性规划(Improved Integer Linear Programming, IILP)模型的传感器 k -覆盖部署方案, 在任何 R_{com}/R_{cov} 下, 都能够以最小数量的传感器实现区域全覆盖和连通性. 与现有经典几何部署模式相比, 本文方案使用的传感器数量最小, 有效降低了部署成本.

1 问题描述

本文研究的目的是使用最小数量的传感器实现一个二维传感区域的完全覆盖, 同时传感器之间需要建立有效的连接, 以使每个传感器可以通过中继路由到达基站. 假设传感区域为 $M \times N$ 的网格模型, 相邻两点之间的距离为 1 个测量单元. 位于 (i, j) 的传感器的传感范围为 R_{cov} , 通信范围为 R_{com} , 其中 $R_{com} \geq R_{cov}$.

① 收稿日期: 2015-12-19

基金项目: 四川省高校重点实验室项目(2014WZY05).

作者简介: 郑黎(1981-), 男, 四川自贡人, 讲师, 硕士, 主要从事计算机网络、智能算法研究.

假设本文研究工作中的通信范围 R_{com} 大于等于覆盖范围 R_{cov} . 当满足 $(i-k)^2 + (j-t)^2 \leq R_{\text{cov}}^2$ 时, 则位于 (i, j) 的传感器能够覆盖 (k, t) 网格. 当满足 $(i-p)^2 + (j-q)^2 \leq R_{\text{com}}^2$ 时, 则该传感器能与位于 (p, q) 的传感器进行通信, 将所收集的信息中继到位于 (l, ω) 的基站. 图 1 描述了一个 10×10 的网格网络, 其中 $R_{\text{cov}} = 2, R_{\text{com}} = 3$.

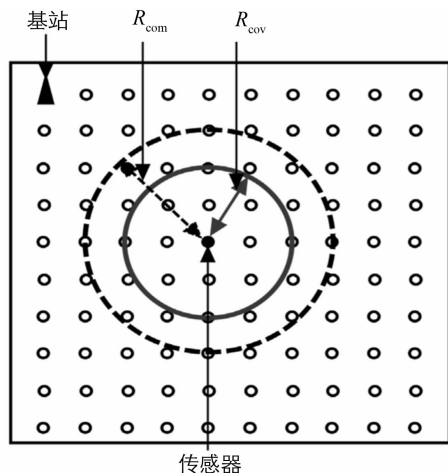


图 1 网格状 WSN 网络模型

2 提出的改进 ILP 模型

在本节中, 首先给出了一些定义并构建了整数线性规划(Integer Linear Programming, ILP)^[11] 模型. 然后对提出的 ILP 模型进行改进, 添加了决策变量.

2.1 网络定义

定义 1 设定 (l, ω) 为网格中固定的基站坐标.

定义 2 设定 $F_{k,t} = \left\{ (i, j) \mid \frac{(i, j)}{(i-k)^2 + (j-t)^2} \leq R_{\text{cov}}^2; i \neq l, j \neq \omega; i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N \right\}$ 为能够覆盖位置 (k, t) 的一组传感器的位置.

定义 3 设定 $C_{p,q} = \left\{ (i, j) \mid \frac{(i, j)}{(i-p)^2 + (j-q)^2} \leq R_{\text{com}}^2; i \neq l, j \neq \omega; i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N \right\}$ 为可以和位于 (p, q) 传感器进行通信的一组传感器的位置.

2.2 ILP 公式

传统基于 ILP 模型的覆盖方案中, 会从网格中选择出所需的 p 个 $(p = 0 \dots \lceil \frac{M \cdot N}{R} \rceil)$ 传感器, 使传感器能够连接到基站^[12]. 设置一个决策变量 z_{ij}^p , 当位置 (i, j) 传感器通过 p 个传感器到达基站时, $z_{ij}^p = 1$, 其他情况下, $z_{ij}^p = 0$.

ILP 模型可表示如下:

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{p=0}^{\lceil \frac{M \cdot N}{R} \rceil} z_{ij}^p$$

受限于

$$\sum_{(i, j) \in F_{k,t}} \sum_{p=0}^{\lceil \frac{M \cdot N}{R} \rceil} z_{ij}^p \geq 1, \forall k = 1, \dots, M, \forall t = 1, \dots, N \quad (1)$$

$$z_{ij}^p \leq \sum_{(s, d) \in C_{ij}} z_{st}^{p-1}, \forall p = 1 \dots \lceil \frac{M \cdot N}{R} \rceil, \forall i = 1, \dots, M, \forall j = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$z_{ij}^p \in \{0, 1\} \quad (3)$$

该 ILP 模型的目标函数为最小化部署传感器的总数量. 第一个约束保证了网格中的每个位置至少由一个传感器覆盖. 第二个约束保证了网格中每个传感器之间以及与基站的连通性. 事实上, 当最优解中包含能够连接到基站的传感器数量 $p \geq 1$ 时, 根据第二个约束, 被选取的位置 z_{ij}^p 需要选择下一个位置 z_{st}^{p-1} . 重复该选择过程, 直到能够直接连接基站的位置 z_{st}^0 . 当在最优解中仅包含有直接连接到基站的传感器的情况下, 第二个约束仍然有效, 因为所有的 $z_{ij}^p (\forall p = 1 \dots \lceil \frac{M \cdot N}{R} \rceil)$ 决策变量均等于 0, 只有 z_{st}^0 决策变量为 1^[13]. 第三个约束对决策变量进行了限制. 该 ILP 模型中决策变量的数目为 $M \cdot N \cdot \lceil \frac{M \cdot N}{R} \rceil$.

2.3 改进 ILP 公式

本文对传统 ILP 公式进行改进(IILP), 融入一些连通性约束的决策变量, 减少决策变量的总数目, 提高决策计算时间. 给出以下定义:

定义 4 设定 $S_{n,\omega}^{l,p} = \{(i, j) \mid i = \min(n, l) \dots \max(n, l); j = \min(p, \omega) \dots \max(p, \omega); i \neq n, j \neq \omega\}$

p) 为传感器位置, 网格中的各个部分受到 4 个点 A, B, C 和 D 的限制, 坐标分别为 $A(\min(n, l), \min(p, w))$, $B(\min(n, l), \max(p, w))$, $C(\max(n, l), \max(p, w))$ 和 $D(\max(n, l), \min(p, w))$.

定义 5 在传感器位置 (i, j) 和基站位置 (l, w) 之间 $((i-l)^2 + (j-w)^2 > R_{com}^2)$, 定义一条直接连接路径. 该路径由一组互连的传感器位置组成, 这些传感器都包含在组 $S_{i,j}^{l,w}$ 中.

定义 6 在传感器位置 (i, j) 和基站位置 (l, w) 之间 $((i-l)^2 + (j-w)^2 > R_{com}^2)$, 定义一条间接连接路径. 该路径由一组互连的传感器位置组成, 其中至少有一个传感器不包含在组 $S_{i,j}^{l,w}$ 中.

图 2(a) 给出了在一个 9×9 网格网络中, 位置 $(6, 5)$ 传感器通过位置 $(2, 3)$ 传感器直接连接到基站. 事实上, 图 2(a) 中, $S_{2,3}^{6,5} = \{(2, 3), (2, 4), (2, 5), (3, 3), (3, 4), (3, 5), (4, 3), (4, 4), (4, 5), (5, 3), (5, 4), (5, 5), (6, 3), (6, 4), (6, 5)\}$. 传感器位置 $(6, 5)$ (即点 C) 和基站 (即点 A) 之间的路径包含以下传感器位置: $(6, 5)$, $(5, 4)$ 和 $(3, 4)$. 由于 $(5, 4)$ 和 $(3, 4)$ 在 $S_{2,3}^{6,5}$ 中, 因此位置 $(6, 5)$ 传感器由一个直接路径连接到基站.

图 2(b) 展示了位置 $(6, 1)$ 传感器通过间接路径连接到基站. 其中, $S_{2,3}^{6,1} = \{(2, 1), (2, 2), (2, 3), (3, 1), (3, 2), (3, 3), (4, 1), (4, 2), (4, 3), (5, 1), (5, 2), (5, 3), (6, 1), (6, 2), (6, 3)\}$. 位置 $(6, 1)$ 传感器 (即点 D) 和基站 (即点 B) 之间的路径包含以下传感器位置: $(6, 1)$, $(5, 2)$, $(5, 4)$ 和 $(3, 4)$. 由于 $(5, 4)$ 不包含在 $S_{2,3}^{6,1}$ 中 (或 $(3, 4)$ 不包含在 $S_{2,3}^{6,1}$ 中), 因此位置 $(6, 1)$ 传感器间接连接到基站.

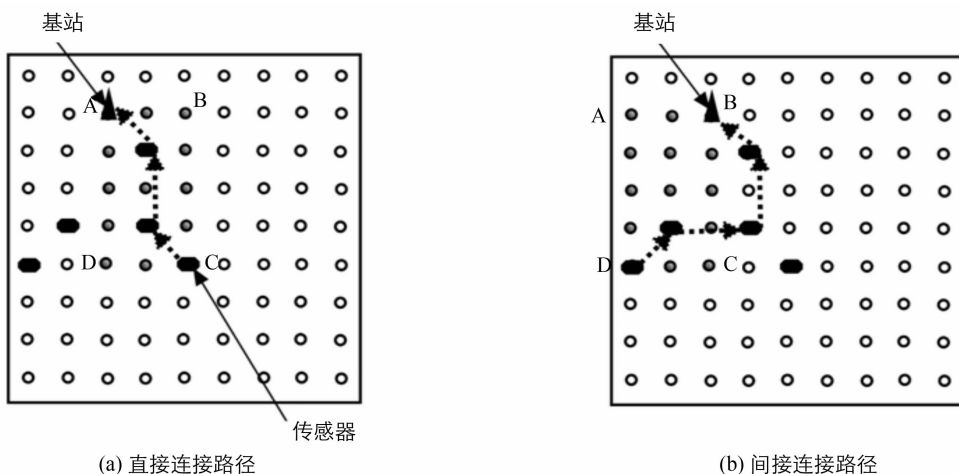


图 2 在 9×9 网格中, $R_{cov} = R_{com} = 2$ 时的直接和间接连接路径

本文 IILP 模型的决策变量包含两种类型: 第一种决策变量为传感器位置是否直接连接到基站 (根据定义 5); 第二种决策变量为传感器位置是否间接连接到基站. 决策变量定义如下: 当位置 (i, j) 的传感器直接连接到基站时, $x_{ij} = 1$, 否则, $x_{ij} = 0$; 当位置 (i, j) 的传感器通过 k 个传感器连接到能够与基站直接连接的位置 (s, t) 传感器时, $z_{ij}^k = 1$, 否则, $z_{ij}^k = 0$.

使用这些决策变量, 则改进后的 ILP 模型表示如下:

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} + \sum_{k=0}^H z_{ij}^k)$$

受限于

$$\sum_{(i,j) \in F_{pt}} (x_{ij} + \sum_{k=0}^H z_{ij}^k) \geq 1, \forall p = 1, \dots, M, \forall t = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$\sum_{(i,j) \in S_{kt}^{np} \cap F_{pt}} x_{ij} \geq x_{np}, \forall n = 1, \dots, M, \forall p = \frac{1, \dots, N}{(l-n)^2 + (w-p)^2 > R_{com}^2} \quad (5)$$

$$z_{ij}^0 \leq \sum_{(k,l) \in F_{ij}} x_{kl}, \forall i = 1, \dots, M, \forall j = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$z_{ij}^k \leq \sum_{(p,l) \in F_{ij}} z_{pt}^{k-1}, \forall k = 1, \dots, H, \forall i = 1 \dots M, \forall j = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$x_{ij} + \sum_{k=0}^H z_{ij}^k \leq 1, \forall i = 1, \dots, M, \forall j = 1, \dots, N \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^H \sum_{(i,j) \in F_{hw}} z_{ij}^k = 0, \forall k = 1, \dots, M, \forall t = 1, \dots, N \quad (9)$$

$$x_{ij}, z_{ij}^k \in \{0, 1\}, H = \left\lceil \frac{M+N}{R} \right\rceil \quad (10)$$

在此 IILP 模型中, 目标函数为最小化部署的传感器总数量. 第一个约束保证网络的每个位置必须至少由一个传感器覆盖. 第二个约束确定直接连接到基站的传感器. 第三个约束保证未直接连接到基站的传感器, 必须连接到直接连接到基站的另一传感器. 第四个约束保证未直接连接到基站的传感器之间的连通性. 第五个约束保证每个网格中的位置上至多存在一个传感器. 第六个约束确保了 z_{ij}^k 变量所定义的位置的传感器, 除了通过 x_{ij} 变量所确定的传感器外, 无法连接到基站, 因为基站的相邻位置传感器自动直接连接到基站. 第七个约束为决策变量限制. 本文 IILP 模型中的决策变量数目为 $M \cdot N \left(1 + \frac{M+N}{\lfloor R_{com} \rfloor}\right)$, 其值小于传统 ILP 的 $M \cdot N \cdot \left\lceil \frac{M \cdot N}{R} \right\rceil$.

另外, IILP 模型可以用来确定 k -覆盖和 m -连通的最优解, 其中网格中的每个位置至少由 k 个传感器覆盖, 以及至少有 m 个连接. 这可以通过改变第一个约束, 并增加两个新的约束条件来完成:

$$\sum_{(i,j) \in F_{li}} (x_{ij} + \sum_{p=0}^H z_{ij}^p) \geq k, \forall l = 1, \dots, M, \forall t = 1, \dots, N \quad (11)$$

$$\sum_{k=0}^H \sum_{(h,w) \in F_{(i,j)}} z_{hw}^k + \sum_{(h,w) \in F_{(i,j)}} x_{hw} \geq m \cdot x_{ij}, \forall i = 1, \dots, M, \forall j = 1, \dots, N \quad (12)$$

$$\sum_{\substack{t=0 \\ t \neq p}}^H \sum_{(h,w) \in F_{(i,j)}} z_{hw}^t + \sum_{(h,w) \in F_{(i,j)}} x_{hw} \geq m \cdot z_{ij}, \forall i = 1, \dots, M, \forall j = 1, \dots, N, \forall p = 1, \dots, H \quad (13)$$

其中: k 为覆盖网格中某个位置的最小传感器数目, m 为每个传感器的最小连接数.

3 实验及分析

利用 NS2 仿真器^[14] 构建不同大小的 WSN 环境, 在 intel i 7-3720QM CPU 2.60 GHz 的计算机平台上实现. 设定网格网络的宽度 M 和长度 N 的取值范围分别为 $\{9, 12, 14\}$ 和 $\{9, 12, 14\}$. 覆盖范围 R_{cov} 和通信范围 R_{com} 从集合 $\{2, 3, 4\}$ 中选取. 设定基站位置为 $(1, 1)$.

3.1 性能分析

首先对本文 IILP 模型进行 k -覆盖问题实验, 其中, k 为在传感区域中覆盖一个位置的最小传感器数量, k 取值范围为 $\{1, 2, 3\}$. 实验执行 1 800 s.

表 1 给出了当覆盖参数 $k = 1$ 时, 使用 IILP 模型计算所有实例的平均计算时间.

表 1 1-覆盖问题的平均计算时间

R_{cov}	R_{com}	平均计算时间 /s								
		(9, 9)	(9, 12)	(9, 14)	(12, 9)	(12, 12)	(12, 14)	(14, 9)	(14, 12)	(14, 14)
2	2	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800
	3	271.2	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800
	4	2.6	5.7	9.3	7.2	30.1	555.9	10.6	726.8	106.1
3	3	9.1	840.4	1 573.5	900.8	1 800	1 800	1 570.5	1 800	1 800
	4	1.6	1.5	4.7	1.6	3.7	653	9.4	713.3	1 671.1
4	4	1.4	15.8	6.1	14.3	158.2	1 567.5	10.4	1 433.2	1 800

表 1 中的第一列和第二列分别包含覆盖范围和通信范围的所有组合, 其它列给出了所有实例的平均计算时间. 同时对 $k = 2$ 和 $k = 3$ 进行了相同计算, 根据结果可以得出两个主要结论:

1) 对某些实例的平均计算时间为 1 800 s, 这表明直到程序结束, 也没有获得最优解. 这是因为在所处

的覆盖范围 R_{cov} 和通信范围 R_{com} 条件下, 无法获得最优.

2) 网格的大小会对平均计算时间产生影响. 从表 1 中可以观察到, 一些网格 $M \times N$ 和 $N \times M$ 的平均计算时间不同, 尽管网格中的位置总数相同. 例如, $(12, 14)$ 网格尺寸, 1-覆盖, $R_{cov} = R_{com} = 2$ 的平均计算时间为 (555.9 s) . 网格尺寸 $(14, 12)$, 在 1-覆盖问题, $R_{cov} = R_{com} = 2$ 的平均计算时间为 726.8 s , 两个结果之间的差距很大.

为了评估 IILP 模型对非最优求解问题所获得的次优解的性能, 本文计算了最优 Cplex 解^[15] 与 1 800 s 后获得的最优发现下界之间的平均差距. 图 3 给出了 k -覆盖问题的平均差距、最大发现差距和最小发现差距.

从图 3 可以观察到, 当 $k = 1$ 时, 非最优优化解决方案问题的平均差距的百分比为 24%. 对于 $k = 2$ 和 $k = 3$, 平均百分比分别降低为 8% 和 5%. 因此, 可以得出结论, 随着覆盖网格中传感器的最小数量的增加, 即 k 增加时, 非最优解问题的平均差距百分比降低. 另外, 非最优优化解决方案问题的最大差距百分比在 $k = 1$ 时非常高. 对于 $k = 2$ 和 $k = 3$, 最大差距百分比比较小. 该结果可能是由于随着 k 的增加, 使用的传感器的总数也增加. 因此提高了最优发现下限并降低了差距. 对于每个 k 值, 最小差距的值都很小.

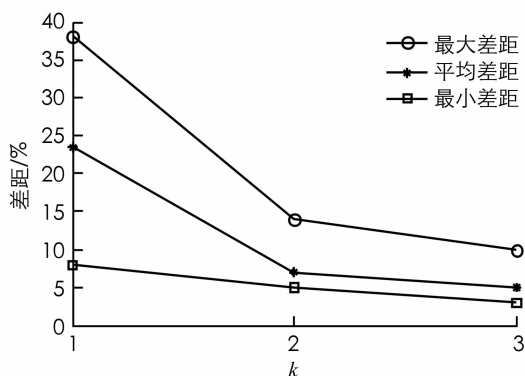


图 3 k -覆盖问题解的差距

当 $k = 1$ 和 $k = 2$ 时, 非最优解决方案占总测试实例的 17.5%. 当 $k = 3$ 时, 增加到 18.7%. 如果不考虑 $R_{cov} = 2$ 的实例, 非最优解决方案占总测试实例的百分比分别为: 7.5% ($k = 1$), 4.8% ($k = 2$) 和 5.1% ($k = 3$).

3.2 性能比较

设置网络网格大小为 14×14 , 进行实验, 将本文 IILP 部署方案与 4 种常规的传感器部署模式: 六边形模式(Hex)、正方形模式(Squ)、三角形模式(Tri)和菱形模式(Rho)进行比较. 在常规部署模式中, 本文使用节点覆盖区域最大化来划分部署区域, 分别获得 4 种模式覆盖区域所需的最小节点数量.

实验中发现, 上述 4 种部署模式会存在未覆盖的角落区域, 为了覆盖部署区域的边界, 在按照覆盖最大化方法获得的最小传感器数量基础上添加 2 个传感器用来覆盖网格的角落. 图 4 描述了 $(R_{cov}, R_{com}) = (2, 2)$ 时, 六边形部署模型覆盖一个 7×7 网格的例子, 以及如何添加 2 个新的传感器到该覆盖解决方案中.

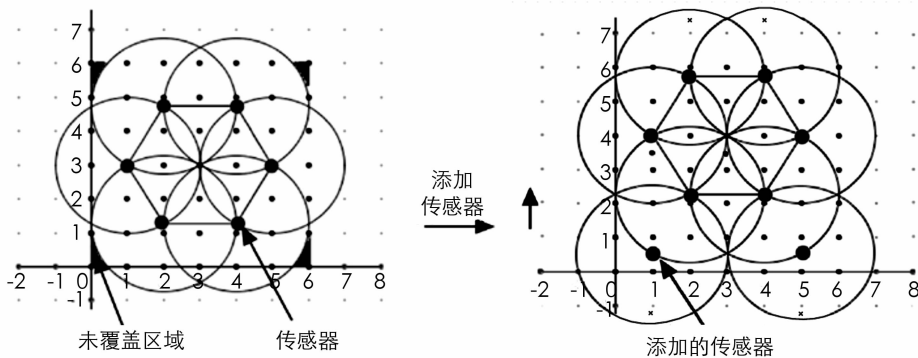


图 4 六边形模型添加节点过程

4 种常规部署模式中每个节点覆盖的最大区域表示如下:

$$\gamma_{max}^{Hex} = \frac{3}{4} \sqrt{3} (\min\{R_{com}, R_{cov}\}) \tag{14}$$

$$\gamma_{max}^{Squ} = 2 \left(\min\left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} R_{com}, R_{cov} \right\} \right) \tag{15}$$

$$\gamma_{\max}^{Tri} = \frac{3}{2} \sqrt{3} \left(\min \left\{ \frac{\sqrt{3}}{3} R_{com}, R_{cov} \right\} \right)^2 \quad (16)$$

$$\gamma_{\max}^{Rho} = \alpha^2 (R_{com}, R_{cov}, \theta) \sin \theta \quad (17)$$

其中: $\alpha = \min \left(R_{com}, 2R_{cov} \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)$, 当 $\frac{R_{com}}{R_{cov}} \leq \sqrt{2}$ 时, $\theta = \frac{\pi}{2}$; 当 $\sqrt{2} \leq \frac{R_{com}}{R_{cov}} \leq \sqrt{3}$ 时, $\theta = \pi - 2\arcsin \left(\frac{R_{com}}{2R_{cov}} \right)$;

当 $\frac{R_{com}}{R_{cov}} > \sqrt{3}$ 时, $\theta = \frac{\pi}{3}$.

图 5 给出了本文 IILP 模型和常规 4 种部署模式, 在不同的传感和通信半径下覆盖 14×14 网格网络所需的最小传感器数量。

从图 5 可以观察到, 本文 IILP 模型获得的解决方案所需的传感器数量总体小于常规部署模式, 其中在 $(R_{com}, R_{cov}) = (2, 4)$ 和 $(R_{com}, R_{cov}) = (2, 5)$ 时, 所需传感器数量与一些模式相同。综上所述, 对于测试的绝大多数 (R_{com}, R_{cov}) , 在实现全覆盖和连通性所需传感器数量方面, 本文提出的 IILP 模型优于一些常规的部署方式。

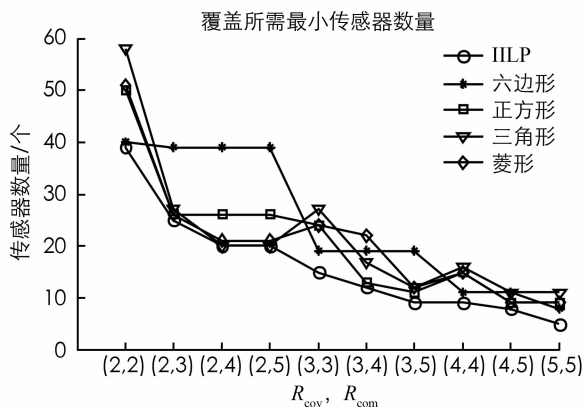


图 5 IILP 模型和常规部署模式所需的最小传感器数量

4 结束语

本文提出一种改进型 ILP 模型, 用于 WSN 中传感器部署的优化。相比于传统基于 ILP 模型的临界网格覆盖问题, 本文添加了传感器之间连通性的约束。仿真结果表明, 本文 IILP 模型在不同的通信和传感半径下, 实现区域全覆盖和连通性所需的最小传感器数量优于一些常规部署模式。

在今后的工作中, 将考虑网络中具有不同通信和覆盖半径的传感器类型, 另外, 考虑在传感区域引入一些影响传感器之间通信的基础设施(如墙体), 进一步提高本文方案在实际应用的可靠性。

参考文献:

- [1] 潘丽姣, 吴红英. 混沌逃逸粒子群优化算法在 WSN 覆盖优化中的应用 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2014, 26(2): 177-181.
- [2] 孙泽宇, 丁国强, 张永胜. 基于能量有效 WSN 优化覆盖算法的研究 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(6): 2261-2264.
- [3] SUN Z Y, DING G Q, ZHANG Y S. Based on Energy Efficiency Optimized WSN Coverage Algorithm [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(6): 2261-2264.
- [4] FENG J. Study on Distributed WSN Coverage Optimization Control Algorithm [J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry, 2012, 34(7): 146-155.
- [5] 陈 白, 王丽丽, 李玉仙, 等. 基于能耗均衡的 WSN 连通覆盖集构建算法 [J]. 计算机工程, 2011, 37(18): 84-86.
- [6] 肖广兵, 孙 宁, 吕立亚, 等. 无线传感网络簇内圆状分割路由算法的研究 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2014, 26(5): 587-592.
- [7] ZHANG L, SHAO Y, ZHU R, et al. Sensor Deployment for Full Detection on Delay Tolerant Event in Hybrid Wireless Sensor Networks [J]. Sensor Letters, 2013, 11(5): 900-909.
- [8] 李国庆, 郑 鑫, 孔祥盛. 一种区间型联系系数的 WSN 路由选择算法 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2014, 26(6): 745-749.
- [9] WOEHRLE M, BROCKHOFF D, HOHM T, et al. Investigating Coverage and Connectivity Trade-offs in Wireless Sensor Networks: The Benefits of MOEAs [J]. Multiple Criteria Decision Making for Sustainable Energy & Transportation Systems, 2010, 63(4): 211-221.
- [10] KHASTEH S H, SHOURAKI S B, HAJIABDORAHIM N, et al. A New Approach for Integrated Coverage and Connectivity in Wireless Sensor Networks [J]. Computer Communications, 2012, 36(1): 113-120.
- [11] 陈 彬, 鲍东晖, 苏恭超, 等. 基于路径的整数线性规划方法在阻塞 IP over WDM 网络中能耗优化的应用 [J]. 电子与

信息学报, 2015, 37(3): 715–720.

- [12] GUANG-ZHOU Y U. Multi-class Target Coverage Algorithm Based on Linear Programming in Wireless Sensor Networks [J]. *Computer Engineering*, 2014, 40(3): 152–157, 162.
- [13] 于广州. WSN 中基于线性规划的多类别目标覆盖算法 [J]. *计算机工程*, 2014(3): 152–157.
- [14] 樊凯, 魏茜, 陈莹, 等. 网络仿真器 NS2 无线模型的网络编码扩展 [J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(9): 1795–1800.
- [15] ALKHDOUR T, SHAKSHUKI E, SELIM S, et al. An Optimal Energy Efficient and Minimum Delay Scheduling for Periodic WSN Applications [J]. *Procedia Computer Science*, 2013, 21(2): 40–49.

On Sensor Deployment Scheme Based on Integer Linear Programming Model and Connectivity Constraint in WSN

ZHENG Li¹, LIU Ying¹, LI Yuan-song²

1. *Sichuan Engineering Technical College, Deyang Sichuan 618000, China;*

2. *School of Computing, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong Sichuan 643000, China*

Abstract: For the issues that the coverage and connectivity problems of sensor deployment in wireless sensor network (WSN) area coverage, a WSN sensor deployment scheme based on integer linear programming (ILP) model and connectivity constraints has been studied in this paper. It integrates the connectivity constraints to the traditional ILP based overlay model, and set up the decision variable of directly and indirectly connected, so that can use the minimum number of sensors to achieve the coverage of the area k -coverage and maintain connectivity. Experimental results show that the proposed scheme can obtain the minimum number of sensors and effectively reduce the deployment cost compared with the existing conventional deployment models.

Key words: wireless sensor networks; integer linear programming; k -coverage; connectivity constraint; minimize the number of sensors

责任编辑 张 杓