

面向数量最少化的双层 WSN 中继节点部署算法

苗春雨^{1,2}, 陈丽娜¹, 戴国勇², 杨帆², 陈庆章²

(1. 浙江师范大学数理与信息工程学院, 浙江 金华 321004;

2. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 提出 2 种算法, 目标是在监测区域部署中继节点, 以便所有的传感节点都能和至少一个中继节点进行通信, 同时保证中继节点数目最小化。整数线性规划最优解算法是对已选择出的 CRegions 通过数学上的整数线性规划的方法找到部署中继节点的最佳区域; 传感网络规模较大时, 提出启发式算法, 将每一次排序后含传感节点个数最多的集合作为部署区域, 经过多次循环排序后近似的找到部署中继节点的最佳位置。最后通过与 2 个同类算法在相同参数环境下进行仿真实验, 比较仿真结果证明整数线性规划最优解算法及启发式算法在覆盖所有传感节点的前提下, 部署中继节点最小化的性能较好, 并且其部署时间也在可以接受的范围之内。

关键词: 中继节点; 部署算法; 整数线性规划; 启发式算法; 节点覆盖

中图分类号: TP393.17

文献标识码: A

Minimum number oriented relay node deployment algorithm in two-tiered WSN

MIAO Chun-yu^{1,2}, CHEN Li-na¹, DAI Guo-yong², YANG Fan², CHEN Qing-zhang²

(1. College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. College of Computer, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at minimizing the number of relay nodes distributed in the sensing area while keeping the feasible communication with at least one relay node for every sensor node, two algorithms (i.e. the integral linear programming optimal algorithm and the heuristic algorithm) were proposed. First, the integral linear programming optimal algorithm was designed to find the best region of deploying relay nodes within candidate regions through integer linear programming. In the large-scale wireless sensor network, the heuristic algorithm was proposed that found the best deployment region through iteratively updating the deployment area including the most relay nodes. Finally, simulation results show that the two proposed algorithms can minimize the number of relay nodes needed with the guarantee of serving all sensor nodes.

Key words: relay nodes, deployment algorithm, integer linear programming, heuristic algorithm, node coverage

1 引言

随着计算机技术的成熟和无线通信技术的蓬勃发展, 无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network) 越来越受到关注。无线传感节点有着低成

本、耗电量低、体积小等特点, 这些特点使将传感节点部署在不同环境中去监测信息变得简便易行^[1]。与此同时, 由于传感节点通过电池供电, 并且一般情况下都部署在较为恶劣的环境下, 因此在无线传感器网络中, 尽可能地降低能量消耗一直是最关键的

收稿日期: 2015-05-29; 修回日期: 2015-09-17

通信作者: 陈庆章, qzchen@zjut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61379023, No.61502431); 浙江省计算机科学与技术重中之重学科 (浙江师范大学) 基金资助项目 (No.ZC323014074); 浙江省科技厅公益性技术应用研究计划基金资助项目 (No.2015C33060)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61379023, No.61502431), Opening Fund of Zhejiang Provincial Top Key Discipline of Computer Science and Technology at Zhejiang Normal University (No.ZC323014074), Zhejiang Province Science Technology Department Public Welfare Technology Application Research Project (No.2015C33060)

问题^[2]。对于无线传感器网络,各个节点之间可以通过多跳方式进行数据传输,但是当节点之前的距离较远时,一方面传输的能耗会大大提高,另一方面可能会由于距离过远而无法传输数据,因此,为了解决上述问题,众多研究都提出在无线传感器网络中部署具有更多能量的中继节点,一方面可以降低节点间的传输距离,降低普通传感器能耗,另一方面可以减轻一些特殊位置节点的传输压力,延长网络生存期^[3]。在这种双层网络(TT-WSN, two-tiered WSN)中传感节点只能和中继节点或基站进行通信而不能把感知到的信息传给其他的传感节点。需要解决的问题是如何放置中继节点,使所有传感节点的感知信息都可以传输到基站的同时,又要降低中断节点部署开销。

本文提出了采用线性规划的中继节点的整数线性规划最优部署算法。同时,为解决大规模 WSN 中整数线性规划算法的运算时间开销过大的问题,采用启发式算法求近似最优解。本文的贡献可以总结为:1) 提出适用于 TT-WSN 的基于重叠区域划分的候选部署区域选择方法;2) 针对不同规模的 TT-WSN 网络,分别提出了能够满足应用需求的高效解决方案。

2 相关工作

在双层网络中,中继节点可以在传输半径范围内与基站与其他中继节点相互传送信息,而普通节点则只能与中继节点通信。中继节点拥有更强大的电池续航能力或直接供电,因此成本较高^[4]。双层网络的中继节点最优部署问题是 NP 难问题^[5],设计合理的近似算法或启发式算法成为解决部署问题的主要思路,如 Hao 等^[6]在中继节点的通信半径大于等于 2 倍传感节点的通行半径的前提下,提出了性能比为 $O(D \log n)$ 的中继节点部署算法, n 是传感节点的数目, D 为目标区域的直径。文献^[7]第一次提出了选择部署中继节点候选区域的方法,并且对将要部署的中继节点有一定的条件限定。也有其他相关工作是在受限的情况下完成中继节点的部署^[8, 9]。文献^[10]提出了 CRegions 的概念,并在单层网络中运用线性规划解决了降低通信开销和通信时延前提下的网关节点部署问题,取得了较好的效果,但是选择 CRegions 的过程较复杂,需要进一步的改进和优化。上述研究主要集中于单层 WSN 的中继节点部署问题,并不能直接应用于需要节点

全覆盖的二层 WSN 中。

针对 TT-WSN 的中继节点部署优化问题, Yang 等^[11]提出解决中继节点位置受限情况下的高效部署问题。Zhang 等^[12]提出了 2-连通情况下的中继节点部署近似算法。文献^[13]以最小化通信开销为主要目标,设计了螺旋顺序的双层网络中继节点部署算法。上述工作的目标并不在于最小化中继节点数量。在解决部署最少数量中继节点以覆盖所有传感器节点的问题上, Chen 等^[14]提出了适用于多基站异构网络的 1-连通及 2-连通网络中继节点部署算法。Fan 等^[15]则解决了以最少的代价部署 TT-WSN 的问题,该方法综合考虑传感器节点、中继节点及传感器节点的初始能量。文献^[16]提出多项式时间的近似算法解决双层网络的最少中继节点部署问题。Yang 等^[17]在假设中继节点具有 2 倍于传感器节点通信半径的前提下,提出了中继节点位置受限情况下双层网络中继节点最小化部署算法。文献^[18]提出 IRNP 算法,主要思想是以 sink 节点—传感器节点的连线与圆形的 sink 节点通信范围的交点作为备选位置,如图 1 所示。圆上的灰色圆圈代表可以放置中继节点的位置,具体在那些灰色圆圈上放置中继节点是以覆盖最多的未连通的传感节点作为判断依据的,找到部署中继节点的位置后在按照相同的方式进行下一个部署位置的选择。该算法本质上属于贪婪算法,网络规模较小时,应该采用最优化算法直接求得最优解。在关于部署最少数目中继节点以覆盖所有传感节点的研究中,还有一种将监测区域划分为特定的网格,并在一个或多个网格中进行部署中继节点的方法^[19, 20],但是这样的部署方式可能会忽略不同网格中传感节点的通信重叠区域。比如文献^[19]提出的 THS 算法,是一种在中继节点通信半径是传感节点通信半径 4 倍的前提下的 4.5-常数近似算法,文献^[20]则对其进行了改进以减少重复覆盖区域并满足大规模 WSN 应用(改进的 THS 算法)。但基于网格划分的算法在传感器节点间存在较大的覆盖重叠区时,算法性能将有一定程度的下降。通过以上分析,在网络规模较小时,完全可以用最优算法完成中继节点部署的位置计算,但针对大规模 WSN,最优化算法的时间开销限制了它的应用。

为了实现在 TT-WSN 中部署最少的中继节点以覆盖所有传感器节点,关键的问题是减少中继节点的重复覆盖区域。因此,本文的主要思想是

先找到重叠区域，再通过提出的 2 种算法对候选区域进行选择，以达到在监测区域部署中继节点以覆盖所有的传感节点，同时保证中继节点数目最小化的目标。

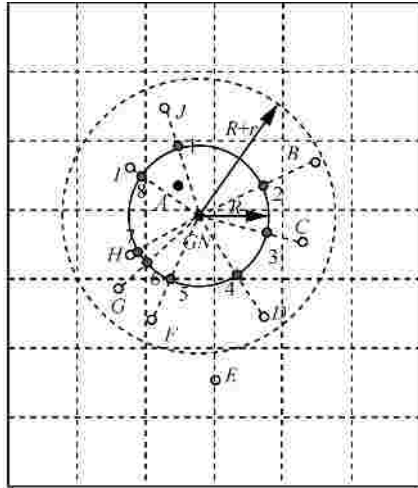


图 1 IRNP 算法部署方式

3 算法设计概要

3.1 问题描述与解决思路

采用双层网络结构作为算法设计的路由基础，理由在于本文核心目标是要实现用最小数目的中继节点覆盖到所有的传感节点，保证每一个传感节点都需要至少可以和一个中继节点进行通信，而双层网络结构中所提出的路由思想就是传感功能节点间不进行通信，传感节点只和中继节点或是基站进行通信，所以选择双层网络结构更能体现出优化中继节点部署问题的意义。

首先，对所有的传感节点间的距离进行计算，对通信范围有重叠的集合做交集，并对得到的集合做进一步的筛选，得到最终的 CRegions (candidate regions)，也就是部署中继节点的候选区域。由于不一定要在每个 CRegions 上都放置中继节点，所以选择出 CRegions 后，再使用具体算法来选择到底要在那些 CRegions 上放置中继节点。在得到 CRegions 之后，进一步对无线传感器网络的规模不同而采用不同的方式对其进行选择，将传感节点数小于 500 个定为可计算的较小规模，可使用整数线性规划最优解算法对其进行计算，得到的结果就是部署中继节点的最佳区域，算法具体实现在 4.1 节中阐述；传感节点数大于 500 个时认为传感网络规模较大，整数线性

规划函数的计算耗时将会非常巨大，于是本文采用启发式算法得到近似的最优解，启发式算法的具体流程在 4.2 节中进行讨论，2 种算法的设计目标都是找到部署中继节点的最佳区域。

3.2 CRegions 集合的选择

CRegions 是一个传感节点集合通信范围的重叠区域，下面通过一个具体例子来介绍如何找到正确的 CRegions。如图 2 所示，先以自身的传感节点为集合元素建立 10 个集合 S_1 到 S_{10} ，再从传感节点 N_1 开始计算，利用距离公式

$$Distance(N_1, N_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

可以算出 N_1 和 N_2, N_3 的距离小于 $2R$ ，表示 N_1 和 N_2, N_3 的传感区域有重叠，于是将 N_2, N_3 加入到集合 S_1 ，得到 $S_1 = \{N_1, N_2, N_3\}$ ，代表在 N_1 的通信区域内可能与 N_2, N_3 的通信区域重叠，所有传感节点完成上述计算过后可以得到如下的集合。

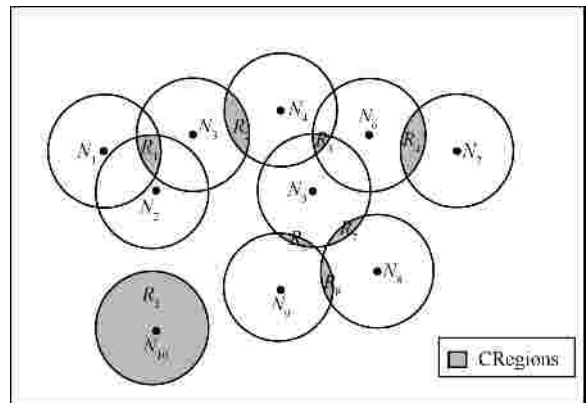


图 2 随机分布的传感节点

- $S_1 = \{N_1, N_2, N_3\}$
- $S_2 = \{N_1, N_2, N_3\}$
- $S_3 = \{N_1, N_2, N_3, N_4\}$
- $S_4 = \{N_3, N_4, N_5, N_6\}$
- $S_5 = \{N_4, N_5, N_6, N_8, N_9\}$
- $S_6 = \{N_4, N_5, N_6, N_7\}$
- $S_7 = \{N_6, N_7\}$
- $S_8 = \{N_5, N_8, N_9\}$
- $S_9 = \{N_5, N_8, N_9\}$
- $S_{10} = \{N_{10}\}$

接下来，再将每个传感节点的集合依次做交集，得到

$$\begin{aligned}
R_1 &= \{N_1, N_2, N_3\} \\
R_2 &= \{N_3, N_4\} \\
R_3 &= \{N_4, N_5, N_6\} \\
R_4 &= \{N_6, N_7\} \\
R_5 &= \{N_{10}\} \\
R_6 &= \{N_5, N_8, N_9\}
\end{aligned}$$

通过上述方法得到的 CRegions 并不一定是完全正确的，本文对得出的 CRegions 进行进一步验证，验证方法如下。

如果该 CRegions 是存在的，那一定可以在这些交点中至少找到一个交点和该 CRegions 内的所有传感节点的距离是小于或等于 R ，若无法在这些交点中找到能同时连通到 CRegions 内的所有传感节点的交点，则代表此 CRegions 是错误的，应该删除此 CRegions。

按照上述的判断方法，可以发现 $R_6 = \{N_5, N_8, N_9\}$ 是“错误”的 CRegions，因为集合 R_6 不满足上述验证条件。同时取错误区域中的节点两两成组，生成新的区域替代错误 CRegions，即 $R_6 = \{N_5, N_9\}$ ， $R_7 = \{N_5, N_8\}$ ， $R_8 = \{N_8, N_9\}$ ，得到要部署中继节点的候选区域 Cregions。

$$\begin{aligned}
R_1 &= \{N_1, N_2, N_3\} \\
R_2 &= \{N_3, N_4\} \\
R_3 &= \{N_4, N_5, N_6\} \\
R_4 &= \{N_6, N_7\} \\
R_5 &= \{N_{10}\} \\
R_6 &= \{N_5, N_9\} \\
R_7 &= \{N_5, N_8\} \\
R_8 &= \{N_8, N_9\}
\end{aligned}$$

综上所述，生成 CRegions 的步骤如下。

- step1 为每个节点创建只包含自身的集合 S_i 。
- step2 按照距离调整规则更新节点集合。
- step3 通过交集操作得到候选区域 R_i 。
- step4 识别错误的候选区域。
- step5 消除错误的候选区域并将相应的节点重新分配至新的候选区域。
- step6 处理孤立节点。

4 中继节点部署算法

4.1 整数线性规划最优解算法

整数线性规划最优解算法根据数学上 0-1 整数线性规划计算部署区域，将具体的目标函数定义为

$$\text{Min} Y = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n \quad (2)$$

约束条件为

$$Ax \leq I \quad (3)$$

也可展开为

$$\begin{cases}
a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n & \leq 1 \\
a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n & \leq 1 \\
\vdots & \\
a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n & \leq 1 \\
x_1, x_2, \dots, x_n = 0 \text{ 或 } 1 \\
a_{ij} = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n
\end{cases} \quad (4)$$

其中， A 为一个多维 ($m \times n$) 矩阵， A 中的元素表示传感节点 N_j 是否在其通信范围内可以和 CRegions i 进行通信，若可以，则 a_{ij} 的值为 1，否则为 0；对于任意的 x_i ，表示 CRegions i 是否部署中继节点，若是值为 1，否则为 0。

利用整数线性规划最优解算法对 3.2 节得到的候选区域求其最佳解，其中目标函数为

$$Y = \text{Min}(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9 + R_{10}) \quad (5)$$

$$\text{将 } A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, R = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ R_7 \\ R_8 \end{pmatrix}, I = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

代入式 (3) 中可得

$$\begin{cases}
R_1 & \leq 1 \\
R_1 & \leq 1 \\
R_1 + R_2 & \leq 1 \\
R_2 + R_3 & \leq 1 \\
R_3 + R_6 + R_7 & \leq 1 \\
R_3 + R_4 & \leq 1 \\
R_4 & \leq 1 \\
R_7 + R_8 & \leq 1 \\
R_6 + R_8 & \leq 1 \\
R_5 & \leq 1 \\
R_i = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, 8
\end{cases}$$

最后得到结果为 $R_1=1, R_2=0, R_3=1, R_4=1,$

$R_5=1, R_6=0, R_7=0, R_8=1。$

4.2 启发式算法

随着传感节点数目的增多，整数线性规划算法求最优解的时间开销太大，并且可能得不到满意的结果，于是本文继而提出采用启发式算法，得到近似最优解。启发式算法是一种基于直观或经验构造的算法，在可接受的花费（指计算时间和空间）下给出待解决组合优化问题每一个实例的一个可行解，但该可行解与最优解的偏离程度一般不能被预计。文献[21]利用启发式算法解决了扩展中继节点过程中的选址问题，得到了较好的结果。对本文的目标问题而言，启发式算法的核心思想是对于某个 CRegions 来说，其覆盖的传感节点数目越多就意味着在这个区域部署中继节点得到的部署效益越高。而根据实验结果，采用启发式算法解决大规模网络中断节点部署问题是可行的。

启发式算法的一般步骤如下。

假设中继节点与传感器节点的通信半径均为 R ， N_i 表示传感节点。

step1 首先按照 3.2 节的计算 CRegions 的步骤找到所有正确的部署中继节点的候选区域。

step2 若某个传感节点 N_i 只被一个 CRegions R_j 集合包含，则此 CRegions R_j 集合一定作为部署中继节点的区域，此时将此 R_j 和剩余的 CRegions 作差集，得到新的 CRegions 集合。

step3 对 step2 得到的 CRegions 按照集合的大小进行排序，包含元素最少的集合在最上边，包含最多元素的集合在最下边。

step4 一般情况时，每一次排序都选择最下面的集合作为部署中继节点的区域，因为这样的集合覆盖最多的传感节点，即部署中继节点达到的效益最高。

step5 在选择最下面的 CRegions 来放置中继节点后，表示该 CRegions 里面所有的传感节点都已经被中继节点覆盖，因此可以删除其他的 CRegions 中包含的这些已被覆盖的节点，即最大的集合和剩余集合求差集。

step6 此时，CRegions 已经不是按大小排序，所以需要对其重新排序。即重复 step3~step6，直到最后所有的节点都已被选取。

上述步骤中，没有指出一种特殊的情况，就是在 3.2 节中曾讨论过的关于用一些集合去替代这些错误“CRegions”的情况，如图 3 中的 3 种情况，

假设替代错误 CRegions 的 3 个集合为 $R_1、R_2$ 和 R_3 ，并且认为下面给出的 3 个图分别是整个传感网络中的一部分，并不存在边缘节点的优先处理的情况，从上到下依次讨论。

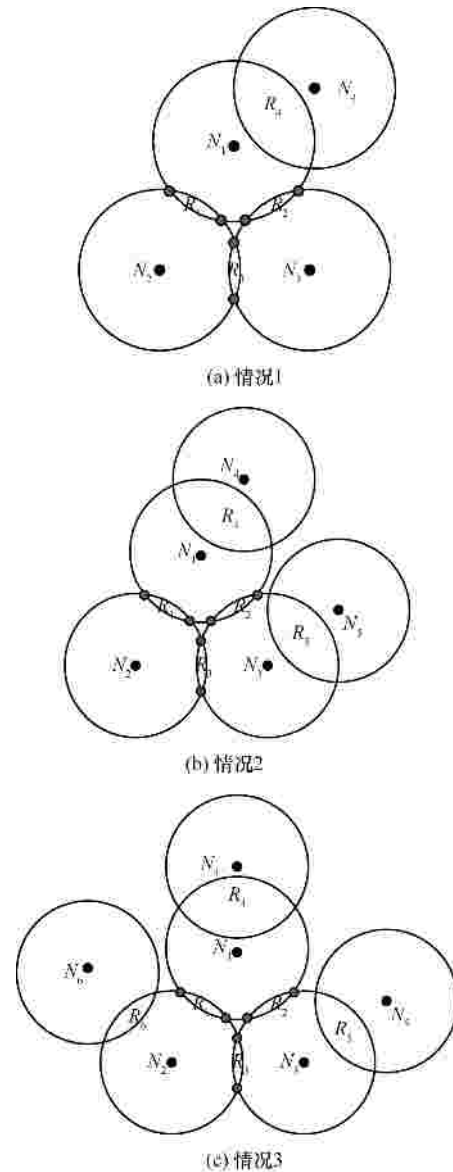


图 3 存在“错误 CRegions”特殊情况

1) $R_1、R_2、R_3$ 集合包含的 3 个传感节点中，只有一个节点同时也被其他集合大小相同的 CRegions 覆盖， N_1 不仅被 3 个替代集合 $R_1、R_2、R_3$ 覆盖，同时也被另一个 CRegions 集合 R_4 覆盖，此时由于 4 个集合的元素数目一样，所以选择的先后顺序是关键，若先选 R_4 则接下来再选择 R_3 便可将 4 个传感节点完全覆盖；若先选择 R_3 ，也只要再选择 R_4 就可以完全覆盖；但是如果首先选择的是 R_1 （或 R_2 ）则除了要选择 R_4 之外，还要在 R_3 处放

置一个中继节点才能完全覆盖。

2) R_1 、 R_2 、 R_3 集合包含的 3 个传感节点中, 有 2 个节点同时也被其他集合大小相同的 CRegions 覆盖 若选择替代集合 $R_1 R_2 R_3$ 之外的 2 个集合 R_4 (或 R_5) 作为优先部署区域, 则最终的部署区域为 $R_1 R_4 R_5$ 或 $R_3 R_4 R_5$; 同样的, 如果选择 R_1 (或 R_3)作为优先部署区域, 则可以得到数目相同的部署区域; 但是, 若首先将 R_2 作为部署区域, 则最终部署结果除了 R_4 、 R_5 以外, 还要有一个 CRegions 部署中继节点才能将所有传感节点完全覆盖。

3) R_1 、 R_2 、 R_3 集合包含的 3 个传感节点同时也被其他集合大小相同的 CRegions 覆盖, 若优先选择 $R_4 R_5 R_6$ 中的任意一个集合, 最终得到的部署区域即为 $R_4 R_5 R_6$, 但是若优先部署的是 3 个替代区域 $R_1 R_2 R_3$ 中的某一个集合时, 最后的部署结果除了 $R_4 R_5 R_6$ 外, 还会有一个替代集合, 即比第一种部署顺序多一个中继节点的区域。

从上述 3 种情况可以得出, 当在选择 CRegions 的过程中如果有一些错误的 CRegions, 需要选择新的 CRegions 作为替代集合, 当用启发式算法求近似解时, 如果遇到替代集合的大小和其他同样包含替代集合中的某个节点的 CRegions 集合 R 的大小相同且它们都为最大集合时, 首先对这样的集合进行部署, 然后再按正常步骤讨论剩余集合, 以保证部署中继节点的区域数目最小。按上述步骤构造的算法计算主要集中在排序环节, 因此时间复杂度为 $O(nlbn)$ 。相较最优解算法在大规模 WSN 中, 计算时间大幅下降。图 4 给出启发式算法的整体流程。

5 仿真实验与分析

5.1 仿真实验设计

仿真实验中, 传感节点的部署方式为随机部署, 首先, 传感节点的部署区域 range 分别设为 $240\text{ m} \times 240\text{ m}$, $480\text{ m} \times 480\text{ m}$, $720\text{ m} \times 720\text{ m}$; 传感节点的通信范围 R 分别设为 24 m 、 30 m 、 40 m ; 传感节点的数目分别取 200 、 400 、 600 、 $1\ 000$ 个, 最后在不同的参数设定下, 比较部署中继节点个数和部署时间 2 个性能。由于算法核心是最小化中继节点的部署个数, 所以将各种算法部署的中继节点数目作为算法性能好坏的最重要的评价指标, 部署时间只要在有限的可以接受的时间内完成即可。

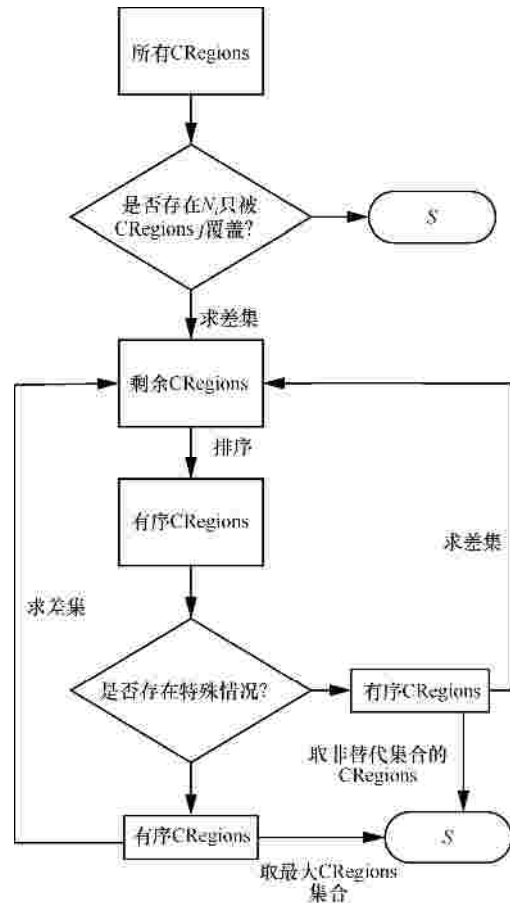


图 4 启发式算法流程

5.2 仿真结果与分析

首先, 在通信半径 $R=24\text{ m}$ 的情况下, 比较不同部署区域大小下 4 种算法 (本文的整数线性规划及启发式算法、THS 及其改良算法^[19, 20], 因 THS 算法适用于小规模 TT-WSN 的中继节点数量最小化部署, 而其改良算法则为大规模 TT-WSN 而设计, 2 种算法与本文工作目标一致) 的部署情况, 因为中继节点的部署目标为使每一个普通节点均至少于一个中继节点直接通信, 而整数线性规划最优算法是典型的 NP 难问题, 理论上最坏情况下时间复杂度为 $O(2^n)$, n 为 CRegions 的数量。因此, 当节点数量增加算法运行时间急剧变大。根据实验数据, 当节点数量在 400 个左右时, 算法运行时间接近 10 h, 因此多于 400 个节点后, 不再运用整数线性规划算法求解。不同的通信半径和节点密度将会产生不同的重复区域, 导致 Cregions 数量的变化; 通信半径与 Cregions 的数量成正比, 而部署区域的大小与 Cregions 的数量成反比, 而 Cregions 的数量变化会影响算法的性能。因此, 在不同的部署区域和通信半径的场景对算法的性能进行比较, 如图 5 所示为部署区域大小为

240 m×240 m, 480 m×480 m 及 720 m×720 m 下, 通信半径为 24 m 时的仿真结果。可以看出, 本文的最优解算法均具有最好的性能, 而当覆盖区域逐渐增大后, 启发式的算法性能得到稳定的提升, 优于其他 2 种算法。

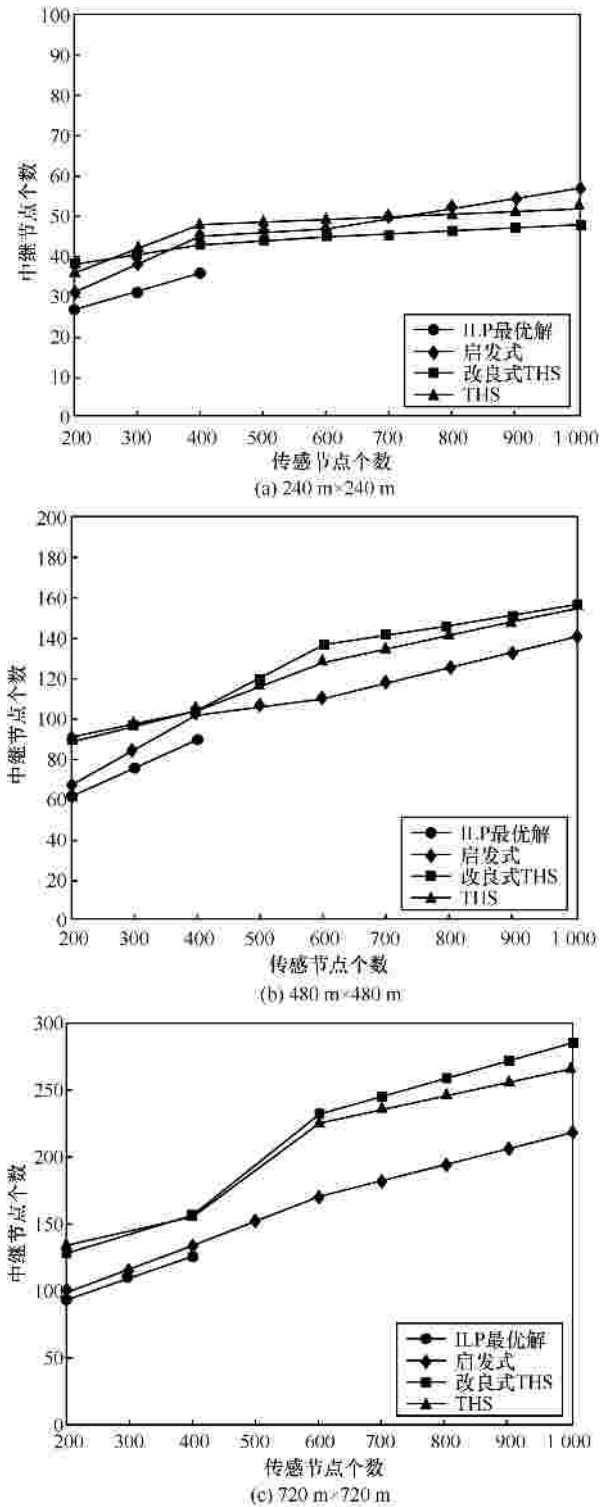


图 5 R=24 m 时 4 种算法的部署情况

图 6 是在通信半径为 $R=30$ m 的情况下, 4 种算法依次在 240 m×240 m, 480 m×480 m 及 720 m×720 m 下的仿真结果。呈现出与通信半径为 24 m 时相同的结果。

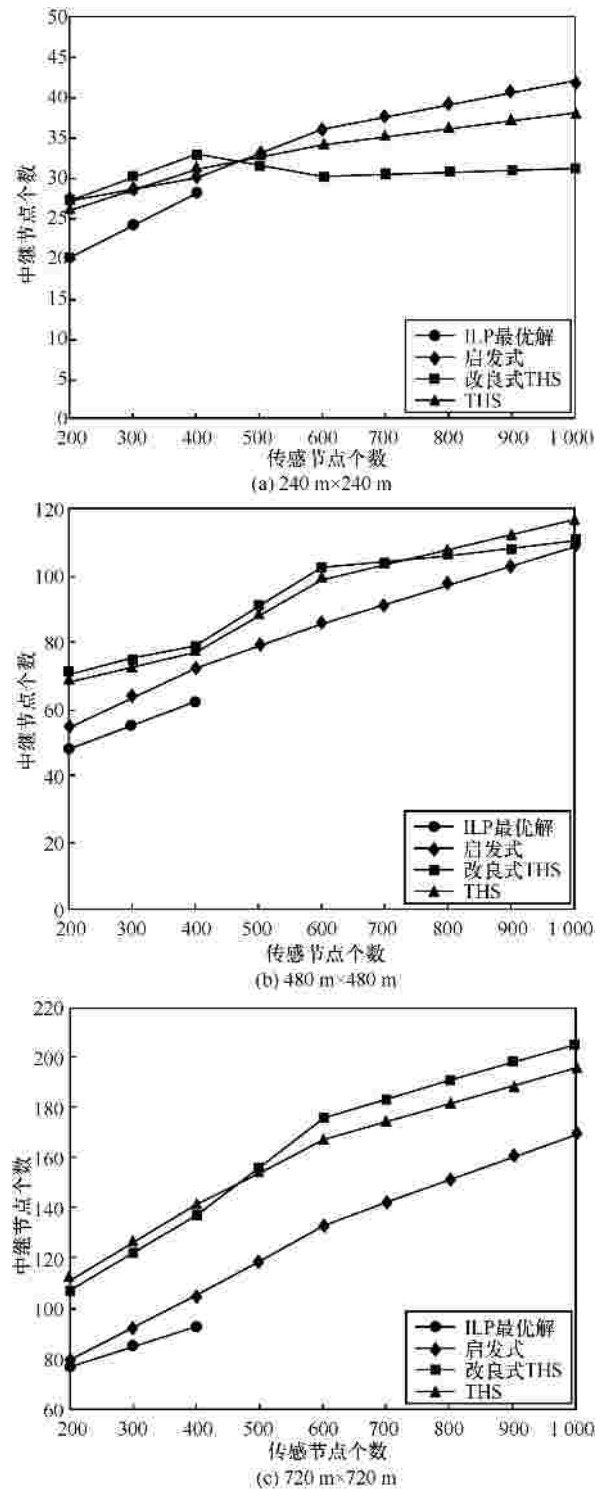


图 6 R=30 m 时 4 种算法的部署情况

最后对通信半径为 $R=40$ m 情况下, 4 种算法

在部署区域为 240 m×240 m, 480 m×480 m 及 720 m×720 m 下的仿真结果, 如图 7 所示。

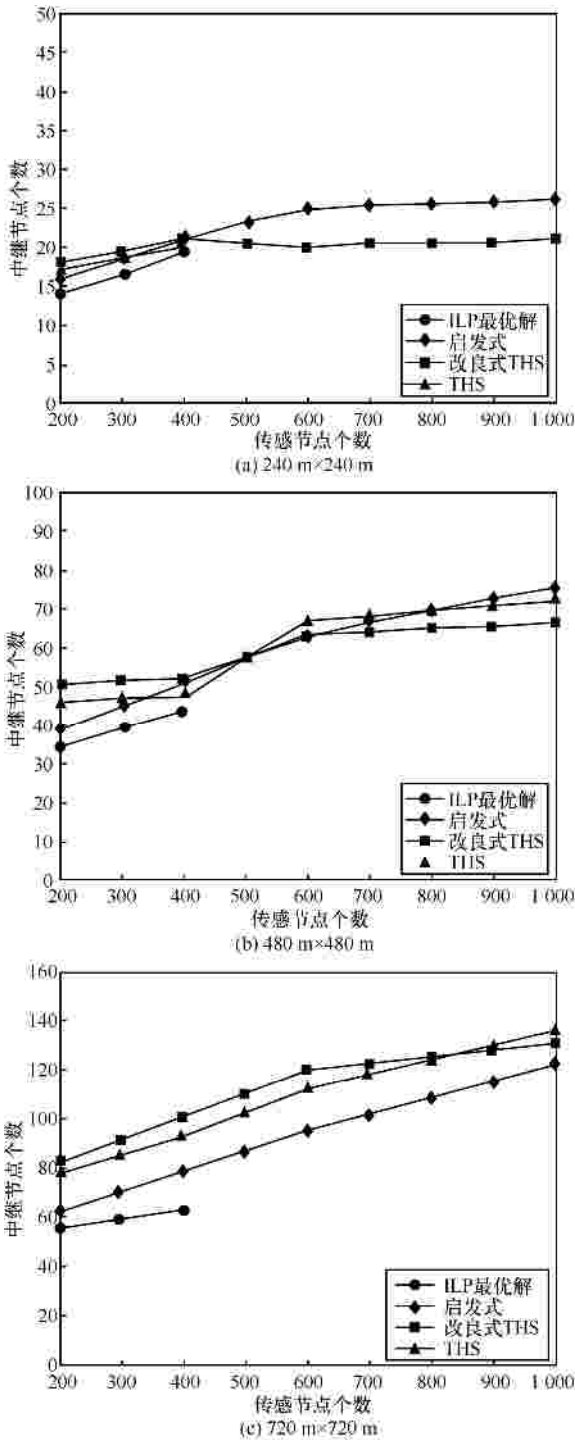


图 7 R=40 m 时 4 种算法的部署情况

由实验结果可以看出, 在传感节点数目较少的情况下, 本文的整数线性规划最优解算法的性能较好, 并且其部署时间也是在可以接受的范围之内; 随着部署区域的增大, 也就是传感节点密度的减

少, 可以发现提出的启发式算法较其他 2 种算法可以部署更少的中继节点。而相比于其他 2 种算法, 本文提出的启发式算法在传感节点密度较小时 (较少的节点数或较大的部署区域), 效果明显好于其他 2 种算法, 这也符合实际应用场景的需求。

最后讨论整数线性规划最优解算法和启发式算法部署时间的问题。

图 8 为整数线性规划最优解算法在不同的通信半径相同的部署区域下的计算耗时, 可以看出随着传感节点数目的增加, 部署耗时也会相应的增大, 当传感节点数目为 400 个时, 计算耗时很大, 这也再次说明整数线性规划最优解算法不能应用在传感网络规模较大的环境中。

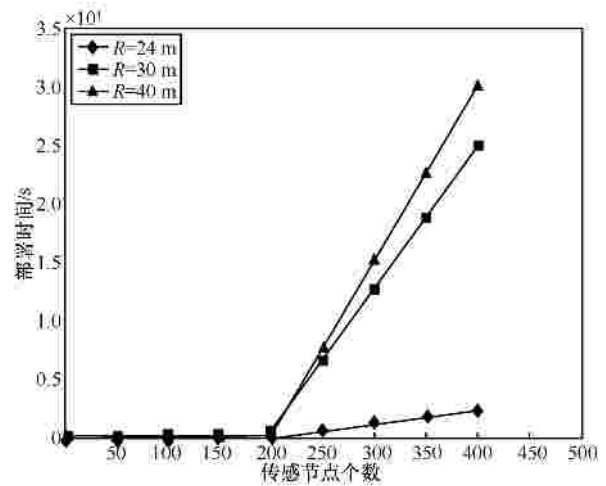


图 8 整数线性规划最优解算法部署时间

图 9 分别为在传感节点通信半径为 R=24 m、R=30 m、R=40 m, 不同部署区域大小, 不同传感节点数目的情况下, 对启发式算法部署时间的实验仿真。

由以上 3 个对启发式算法的仿真图可以看出, 部署时间会随着部署区域的增大而逐渐减少, 考虑原因, 由于当传感节点分布比较密集时, 产生的重叠区域就会相应的增加, 而本文的部署方式正是对这些重叠区域进行分析和处理, 从而选择出部署中继节点的位置, 而重叠区域的增多必然会造成处理这些重叠区域的时间增加, 造成实验结果所示的情况。

6 结束语

本文提出了 2 种关于部署中继节点算法。当传感网络规模较小时, 采用整数线性规划最优解算法, 而当传感网络规模较大时, 进一步提出了启发

式算法。这 2 种算法的研究目标都是实现部署中继节点以覆盖所有传感节点，并且使部署中继节点个数最小化。最后通过仿真实验对比其他同类算法，也可以证明本文提出的算法在部署中继节点个数上有一定的优势。

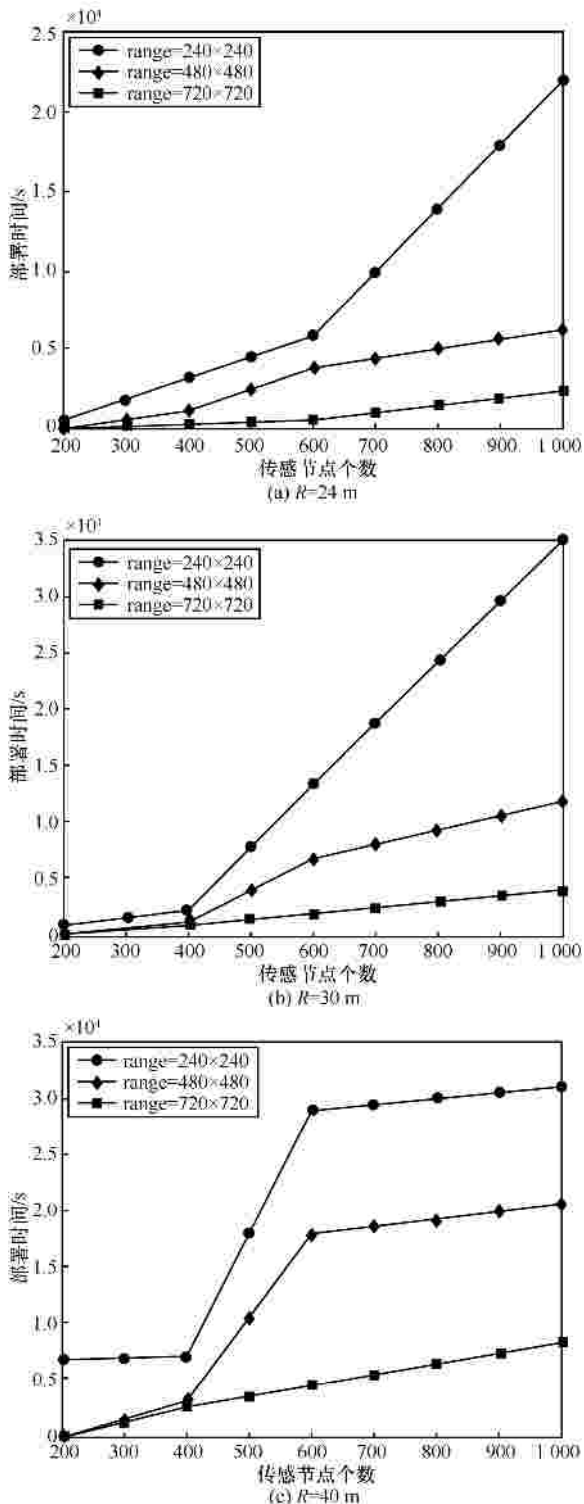


图 9 启发式算法的部署时间

参考文献：

- [1] ILIEV N, PAPROTYN I. Review and comparison of spatial localization methods for low power wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(10): 5971-5987.
- [2] KAZMI A H, O'GRADY M J, DELANEY D T, et al. A review of wireless-sensor-network-enabled building energy management systems[J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2014, 10(4): 66.
- [3] BHATTACHARYA A, KUMAR A. A shortest path tree based algorithm for relay placement in a wireless sensor network and its performance analysis[J]. Computer Networks, 2014, 71: 48-62.
- [4] FATHI M, MAIHAMI V. Operational state scheduling of relay nodes in two-tiered wireless sensor networks[J]. Systems Journal, IEEE, 2015, 9(3): 686-693.
- [5] ZHANG W, XUE G, MISRA S. Fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks: problems and algorithm[C]//Infocom-2007. c2007: 1649-1657.
- [6] HAO B, TANG J, XUE G L. Fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks: formulation and approximation[C]// HPSR'04. c2004: 246-250.
- [7] 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.
- [8] CHANG H Y, HUANG Y H, LIN T L. A novel relay placement algorithm based on puzzle games for indoor wireless sensor networks[C]//Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP), 2014 Tenth International Conference on. IEEE, c2014: 682-685.
- [9] NIGAM A, AGARWAL Y K. Optimal relay node placement in relay constrained wireless sensor network design[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 233(1): 220-233.
- [10] JENNIFER W, ROOZBEH L J, MIODRAG P. Gateway placement for latency and energy efficient data aggregation[C]//29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'04). c2004: 490-497.
- [11] YANG D J, MISRA S, FANG X. Two-tiered constrained relay node placement in WSNs: efficient approximations[C]// SECON'10. Boston, United States, c2010: 1-9.
- [12] ZHANG W, XUE G, MISRA S. Fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks: problems and algorithms[C]//Proc IEEE INFOCOM. c2007:1649-1657.
- [13] NITESH K, JANA P K. Relay node placement algorithm in wireless sensor network[C]//Advance Computing Conference (IACC), 2014 IEEE International. c2014: 220-225.
- [14] CHEN G, CUI S. Relay node placement in two-tiered wireless sensor networks with base stations[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2013, 26(3): 499-508.
- [15] FAN T, TENG G, HUO L. A pre-determined nodes deployment strategy of two-tiered wireless sensor networks based on minimizing cost[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2014, 21(2):

114-124.

[16] LLOYD E L, XUE G. Relay node placement in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2007, 56(1): 134-138.

[17] YANG D, MISRA S, FANG X, et al. Two-tiered constrained relay node placement in wireless sensor networks: computational complexity and efficient approximations[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(8): 1399-1411.

[18] ZAFAR B, MIR Z H, SHAMS S M. On improved relay nodes placement in two-tiered wireless sensor networks[C]//IEEE MILCOM 2009. Boston, United States, c2009: 1-7.

[19] TANG J, HAO B, ARUNABHA S. Relay node placement in large scale wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2006, 29(4): 490-501.

[20] CHEN Z K, CHEN C C. Relay node placement in wireless sensor network[C]//The Fourth Workshop on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks. c2008: 544-553.

[21] 曾斌, 魏军, 姚路. 传感器网络中继节点扩展部署的优化算法研究[J]. 通信学报, 2012, 33(4):152-162.

ZENG B, WEI J, YAO L. Optimal scalable redeployment algorithm of relay nodes in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2012, 33(4): 152-162.

作者简介：



苗春雨 (1978-), 男, 吉林四平人, 浙江工业大学博士生, 浙江师范大学副教授, 主要研究方向为无线网络、无线传感器网络、网络安全等。

陈丽娜 (1978-), 女, 吉林长春人, 博士, 浙江师范大学副教授, 主要研究方向为室内定位、认知无线电等。

戴国勇 (1983-), 男, 浙江杭州人, 浙江工业大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络。

杨帆 (1987-), 女, 浙江杭州人, 浙江工业大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。

陈庆章 (1955-), 男, 河南郑州人, 博士, 浙江工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、分布式处理与协同计算等。