

无线传感器网络分布式拓扑图生成模型

苏 涛 顾晶晶 黄涛涛

(南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 211106)

摘 要 拓扑保留图(Topology Preserving Maps, TPMs)作为实际坐标图的抽象视图,在无线传感器网络的路由、定位和边界节点识别等领域有广阔的应用前景。它可以从虚拟坐标系统中导出网络的拓扑图,且不依赖于任何物理位置信息。然而,在一些具有不规则边界的复杂网络以及使用不充分选择的参考节点来映射网络时,TPMs 无法达到理想的效果。为此,设计了一种新的拓扑保留图模型——基于多极值点选择的分布式拓扑图生成算法(Multiple Extreme Node Search-Distributed Topology Preserving Maps, MENS-DTPM),其中包括一种基于极值点选择的参考节点选择方法以及一种基于 TPMs 的分布式拓扑坐标生成算法。这种模型实现了更有效的参考节点选择,能够更好地反映网络的结构。仿真实验结果表明, MENS-DTPM 具有比同类算法更好的性能。

关键词 无线传感器网络,节点选择,拓扑保留图,虚拟坐标

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.05.009

Anchor Selection and Distributed Topology Preserving Maps in Wireless Sensor Networks

SU Tao GU Jing-jing HUANG Tao-tao

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract Topology preserving maps (TPMs), as a distorted version of physical map, have been widely applied in routing, localization and boundary node identification of wireless sensor networks. It can generate topology maps of networks from a virtual coordinate system without any physical distance information. However, the TPMs can suffer from suboptimal result when it comes to some complex networks with irregular boundary and insufficient anchor nodes are selected to map the networks. To this end, this paper developed a new topology preserving model, named multiple extreme node search-distributed topology preserving maps (MENS-DTPM), which consists of a new anchors selection method and a new distributed topological coordinates producing algorithm based on TPMs. This method achieves more effective selection of anchors, and can express the physical map better. Simulation results show that the MENS-DTPM method achieves better performance than other methods reported in the literature.

Keywords Wireless sensor networks, Anchor selection, Topology preserving map, Virtual coordinates

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)由大量能源受限的传感器节点组成,主要用于感知监测区域内的信息,其中节点的位置信息极为关键。一般情况下, WSN 网络中有一小部分节点通过其上搭载的 GPS 获取自身的位置,这类节点被称为锚节点;然后其他未知节点根据与信标节点的距离信息或者连通信息,并通过定位算法来确定其位置。但是 GPS 一般工作在开放的、没有障碍物遮挡卫星信号的环境中^[1],因此在一些有障碍物的场景下,如室内、地下,其位置信息无法获取或存在非常大的误差^[2]。因此,亟需一种更有效的模型来组织和定位 WSN,并且其不用依靠任何的位置信息。虚拟坐标系统(Virtual Coordinate Systems, VCS)^[3]便应运而生。

VCS 使用节点到参考节点的最小跳距来标记网络中的节点。不同于传统的锚节点, VCS 中的参考节点的实际物理位置是不可用的,并且是可以被任意选取的。VCS 最大的优点是不依赖于任何物理位置信息,具有更小的能耗,并且适用范围广。参考节点的选取会给 VCS 造成很大的影响,因此如何选取参考节点成为了基于 VCS 算法的主要挑战^[4]。

通常选择位于网络边界上的节点作为参考节点,因为网络内部的节点可能会产生局部最小值,影响网络的路由选择^[5]。因此,很多研究者都将参考节点选择在彼此距离尽可能远的位置或网络边界^[6-8]。但是,由于并不是所有的边界点都是“好”的参考节点(“好”的参考节点可以保证网络节点的路由选择,并且网络中不存在相同坐标值的节点),因此这些算法代价高,并且可能达不到理想的效果。此外,不依赖于任何定位算法去寻找网络边界也非常具有挑战性^[9]。为了解决

到稿日期:2017-03-17 返修日期:2017-05-05 本文受国家自然科学基金面上项目(61572253),航空基金项目(2016ZC52030)资助。

苏 涛(1993—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络;顾晶晶(1983—),女,副教授,主要研究方向为模式识别、无线传感器网络, E-mail: gujingjing@nuaa.edu.cn(通信作者);黄涛涛(1991—),男,硕士生,主要研究方向为机器学习、无线传感器网络。

这一问题, Dihanapala 等人提出了一种参考节点选择算法——ENS 算法^[4], 其实现了有效的参考节点选择。该算法定义了网络中的极值点, 并选择其作为参考节点, 且能够同时决定参考节点的数量和位置。

此外, 由于缺乏方向信息, VCS 在 WSNs 中的应用受到了很大的限制。因此, 有学者提出了拓扑保留图, 即 TPMs 模型, 其能够从 VCS 中还原出方向信息, 并且产生网络拓扑图^[10]。TPMs 可以保留网络的内部和外部的边界信息(内部边界指网络中的空穴边界), 以及节点间的相对位置信息。TPMs 很好地解决了无法获得实际物理坐标情况下的 WSN 拓扑、路由和边界检测^[11]的问题。之后, Jiang 等人又对 TPMs 做出了改进, 引入了径向信息, 这在一定程度上减少了视图的扭曲^[12]。

目前, VCS 虽然已经取得了一些研究成果, 但是在某些情况下无法得到理想的效果。ENS 算法能够为 VCS 选择参考节点, 但是该算法在具有不规则边界的网络中只能选出少量的参考节点, 以此为基础的 VCS 便无法很好地表示网络的特征, 生成的网络拓扑图也与实际坐标图相差较大。此外, TPMs 算法能够从 VCS 导出网络的拓扑图, 但是其在大规模复杂网络中的精度不高, 拓扑图的扭曲程度依然很高。

为了解决上述问题, 提出一种新的模型——基于多极值点选择的分布式拓扑图生成模型 MENS-DTPM。该模型基于极值点选择算法提出了一种节点选择算法, 能够适用于更复杂的网络, 实现更有效的参考节点选取。该模型还提出了一个分布式的 TPMs 生成算法, 即将分布式的思想引入到 TPMs 中, 根据参考节点选择的结果将网络划分为多个簇, 在每个簇内部生成拓扑图, 使其在大规模复杂网络中具有更好的效果, 能更好地反映网络的结构特征。

本文第 2 节介绍了虚拟坐标系统以及拓扑保留图的相关内容; 第 3 节详细介绍了 MENS-DTPM 模型的设计思想以及主要过程; 第 4 节给出实验结果及分析; 最后总结全文并展望未来工作。

2 相关知识回顾

2.1 虚拟坐标系统

VCS 使用节点到参考节点的最小跳距来标记网络中的节点, 能够不依赖位置信息对网络特征进行描述。WSN 中节点的虚拟坐标(Virtual Coordinate, VC)可以用一个 M 维的向量来表示, M 为网络中参考节点的数量, 向量中的每一项表示节点到对应参考节点的最小跳距。VCS 是由网络中所有节点的 VC 构成的坐标系统, 是 WSN 节点连通图的一个高维抽象, 其维数为参考节点的个数。

考虑一个具有 M 个参考节点以及 N 个普通节点的网络, 其中 $M \ll N$ 。VCS 中, 每个节点都可以表示为一个 M 维的向量, 其中第 j 项表示节点到 j 号参考节点的最小跳距。

节点 n_i 的虚拟坐标 VC_i 可以用式(1)表示:

$$VC_i = [h_{n_i A_1}, \dots, h_{n_i A_j}, \dots, h_{n_i A_M}] \quad (1)$$

其中, $h_{n_i A_j}$ 表示节点 n_i 到参考节点 A_j 的最小跳距。

2.2 方向虚拟坐标

方向信息和相对位置信息在 VCS 中是不可用的。方向

虚拟坐标(Directional Virtual Coordinate, DVC)可以还原出 VCS 中损失的方向性。DVC 与 VC 的主要区别在于, VC 是一个向量, 而 DVC 是一个值。

DVC 将角度的概念引入到了虚拟坐标系统中。DVC 由一对随机选择的节点定义。假设随机选择的节点为 R_j 和 R_k , 则节点 n_i 的 DVC 值可以表示为^[4]:

$$DVC_i = f(h_{n_i R_j}, h_{n_i R_k}) = \frac{h_{n_i R_j}^2 - h_{n_i R_k}^2}{2h_{R_j R_k}} \quad (2)$$

其中, DVC_i 表示节点 n_i 的 DVC 值, $h_{R_j R_k}$ 表示节点 R_j 和 R_k 间的最小跳距。

DVC 值在参考节点选择算法 ENS^[4] 中被用来寻找作为网络参考节点的极值点。极值点是指网络的角落中的节点。文献[13]已经证明了 DVC 的值沿着平行与随机节点连线的方向单调递增或递减, 因此, 极值点在它的邻域内拥有最大或最小的 DVC 值。

2.3 拓扑保留图

DVC 虽然还原了 VCS 中损失的方向信息, 但是无法产生节点的坐标。TPMs 使用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)进行降维, 从 VCS 中提取方向信息。

TPMs 是网络的一个抽象视图, 能够保留网络节点的相对位置信息, 可应用于一些不需要或无法获得实际坐标的情况^[9]。TPMs 的主要思想如下:

假设 A 是一个 $M \times M$ 的矩阵, 由网络中所有参考节点的 VC 构成, 其中第 i 行表示 i 号参考节点的虚拟坐标。对矩阵 A 进行 SVD 分解, 如式(3)所示^[10]:

$$A = U_A \cdot S_A \cdot V_A^T \quad (3)$$

P 是一个 $N \times M$ 的矩阵, 由网络中所有节点的 VC 构成, 其中第 i 行表示 i 号节点的虚拟坐标。将其右乘矩阵 A 的右奇异矩阵 V_A , 如式(4)所示^[12]:

$$P_{SVD} = P \times V_A \quad (4)$$

其中, P_{SVD} 是一个 $N \times M$ 的矩阵, 包含了节点的主要信息。 P_{SVD} 的第一列用 $P_{SVD}^{(1)}$ 表示, 其提供主要的信息, 包含了一维的径向信息; 而第二列 $P_{SVD}^{(2)}$ 和第三列 $P_{SVD}^{(3)}$ 提供了一个二维的笛卡尔坐标^[11], TPMs 选取这两列作为拓扑保留图中的坐标, 如式(5)所示^[14]:

$$[X_T, Y_T] = [P_{SVD}^{(2)}, P_{SVD}^{(3)}] \quad (5)$$

其中, X_T 和 Y_T 都是 N 维的向量, 表示所有节点的拓扑坐标, 第 i 行表示 i 号节点的拓扑坐标。

3 MENS-DTPM 模型

MENS-DTPM 模型可以实现更充分的节点选择, 减少变形, 比 TPMs 更接近于网络的实际结构。MENS-DTPM 包含两个主要的阶段, 即参考节点选择阶段和分布式产生 TPMs 的阶段。

3.1 参考节点选择 MENS 算法

参考节点选择算法为网络选取参考节点, 对 VCS 以及拓扑图的生成会产生很大影响。本节将提出一种基于极值点选择算法的参考节点选择算法, 其能够适用于更复杂的网络, 实现更有效的参考节点选取。

文献[4]提出的 ENS 算法以一种完全分布式的方法计算

每一个节点的 DVC 值,然后每一个节点检查其是否为局部最大值或最小值,若是则将其选为参考节点。通过这种方式,ENS 可以同时决定参考节点的数目和位置。该文献已经证明了参考节点选择会对 TPMs 造成很大的影响。但是,ENS 算法在不规则边界的网络中并没有很好的效果。例如,图 1 给出一个小型的不规则边界网络示例,其中, R_1 和 R_2 是两个随机选择的节点, n_1 和 n_2 是两个边界节点。由于极值点是指网络的角落中的节点,因此 n_1 和 n_2 中至少有一个是极值点。但是在 ENS 算法中, n_1 和 n_2 都不会被选择为参考节点。由于两个节点到 R_1 和 R_2 的跳数相等,即 $h_{n_1, R_1} = h_{n_2, R_1}$ 并且 $h_{n_1, R_2} = h_{n_2, R_2}$,根据式(2),这两个节点的 DVC 值也是相等的。这两个节点是两跳的邻居节点,每一个节点都不是其邻域内的最大值或最小值。因此,不规则边界的网络中有很多极值点无法被 ENS 算法选择。

针对上述问题,对 ENS 算法进行改进,提出了 MENS 算法,该算法在普通网络和复杂边界的网络中都可以实现参考节点的选取。考虑到一些极值点有相同的 DVC 值,该算法允许参考节点的 DVC 值在 k 跳邻居节点中有相同的最大值或最小值。为了避免在一个很小的区域内出现多个参考节点(如图 1 中 n_1 和 n_2 同时成为参考节点),规定任何一个节点的 k 跳范围内最多只能有一个参考节点。因此,当一个节点一旦被选为参考节点,它将在 k 跳邻居中广播这一信息;其他收到信息的节点不会被选择成为参考节点,即使它有最大或最小的 DVC 值。

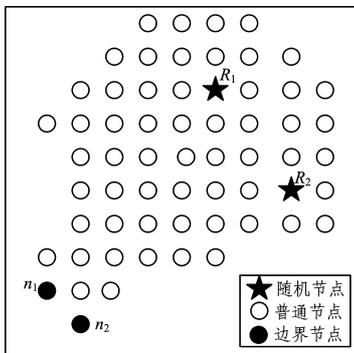


图 1 复杂边界网络示例

Fig. 1 Example of network with irregular boundary

MENS 算法主要分为 3 步:

- 1) 在网络中随机选择两个节点,之后这两个节点向整个网络洪泛自己的信息;
- 2) 其他节点在收到信息后,计算各自的 DVC 值;
- 3) 节点首先查看是否收到参考节点信息,若收到则结束过程,否则检查自己的 DVC 值是否为 k 跳邻域内的最大值或最小值(允许与其他节点相等),即节点 n_i 是否满足式(6):

$$\begin{aligned} f(h_{n_i, R_1}, h_{n_i, R_2}) &\leq f(h_{n_j, R_1}, h_{n_j, R_2}); \forall n_j \in K_k(n_i) \text{ or} \\ f(h_{n_i, R_1}, h_{n_i, R_2}) &\geq f(h_{n_j, R_1}, h_{n_j, R_2}); \forall n_j \in K_k(n_i) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, R_1 和 R_2 是两个随机节点, $f(h_{n_i, R_1}, h_{n_i, R_2})$ 是指节点 n_i 的 DVC 值, $K_k(n_i)$ 表示节点 n_i 的 k 跳范围内的节点集合。

该节点若满足式(6),则成为参考节点,并向其 k 跳邻域内广播这一信息。

MENS 算法能够同时决定参考节点的位置和数量,是

MENS-DTPM 模型的第一阶段;下一阶段将利用 MENS 算法选出的参考节点生成拓扑保留图。

3.2 分布式 TPM 模型

原始 TPMs 在复杂网络中会损失很多网络的细节,如图 2 所示。

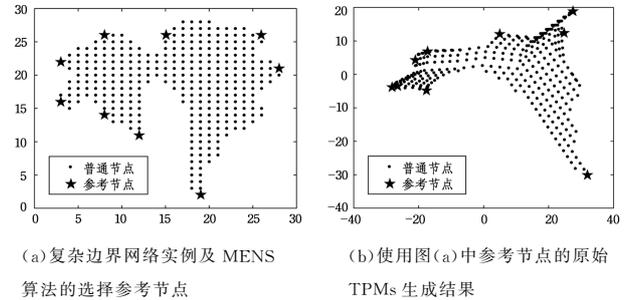


图 2 复杂边界网络 TPMs 生成结果

Fig. 2 Results of TPMs in Network with irregular boundary

图 2 中的网络为一个具有 320 个节点的不规则边界网络,使用上一节提出的 MENS 算法进行参考节点的选择,选择结果如图 2(a)所示(图 2 与下文所有图中的网络实际坐标图,仅用于表示参考节点选择的结果及与拓扑图的对比,实际计算中的实际物理坐标未知,仅利用连通关系进行计算,得出拓扑图);同时使用选出的参考节点和 TPMs 模型生成网络拓扑图,结果如图 2(b)所示。从图 2(b)可知,TPMs 是对网络的物理坐标图的一个扭曲视图,能够反映网络的基本结构。但是,图 2(b)中左部及右上部的节点过于密集,无法确定节点的对应关系以及相应部分的网络结构。

为了解决上述的问题,将分布式的方法引入到 TPMs 中,使得网络被划分为多个簇。实验表明,TPMs 在小型网络中的表现比在大型网络中的表现更好。因此,可以更充分地选择参考节点,以减少拓扑保留图的变形,使其更接近于实际的物理坐标图。

如此,我们面临的首要问题便是如何划分网络以及设置划分簇的个数。考虑到 MENS 算法可以同时决定参考节点的数量和位置,并且所有的参考节点都是极值点,相互距离都比较远,一个简单的想法是使用参考节点作为簇首来划分网络,然后其他节点根据路由最小原则加入到离它最近的参考节点所在的簇。但是这种方法存在一个问题:这些簇之间并没有交集。由于经过 TPMs 后的拓扑坐标系与实际坐标系不同,每个簇分别进行 TPMs 后形成的坐标系彼此也不相同,因此需要使这些簇两两之间至少有 3 个公共点,并且可以进行坐标系之间的转换。

为了解决这一问题,规定一些节点可以属于多个簇。判断节点属于哪个簇的规则如下:

$$\begin{aligned} n_i \in S(A_s) \text{ where } A_s = \arg \min_{j=1, \dots, M} h_{n_i, A_j} \text{ or} \\ h_{n_i, A_s} - \min_{j=1, \dots, M} h_{n_i, A_j} \leq \alpha \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $S(A_s)$ 表示包含参考节点 A_s 的簇。每个节点不仅属于离它最近的参考节点所在的簇,还属于其他簇,这个簇的簇首和该节点之间的跳距与该节点和参考节点之间的最小跳距的差在一个小阈值 α 范围内。 α 为用于限制各簇间交集大小的参数。

完成簇的划分之后,对每一个簇生成拓扑保留图。首先,利用 MENS 算法在簇内重新选取新的参考节点;然后使用式(3)一式(5)生成拓扑坐标。

3.3 MENS-DTPM 模型

结合上述两种算法,提出 MENS-DTPM 模型。MENS-DTPM 模型组须包含两个阶段。

阶段 1 使用 MENS 算法获得参考节点集,具体过程参见 3.1 节。

阶段 2

步骤 1 利用参考节点集将网络划分为几个簇,每个参考节点作为一个簇的簇首,簇首节点随后向网络广播自己的信息,其他节点收到信息后根据距离簇首的跳数以及式(6)决定自己所属的簇;

步骤 2 每个簇再次利用 MENS 算法选择簇内的参考节点;

步骤 3 每个簇构建自己的 VCS,并使用式(3)一式(5)生成 TPMs。

4 仿真实验和分析

本节将通过 Matlab2013a 进行仿真实验来评估 MENS-DTPM 方法的性能。设置所有网络节点的通信范围为 1 跳^[4]。由于 MENS 中的参数 k 影响了网络中参考节点的数量,任意节点 k 跳范围内最多只有一个参考节点,因此若 k 值过小,则会导致网络中的参考节点过多,加剧拓扑图的扭曲;若 k 值过大,则会导致选择参考节点不充分,不能反映网络的结构。因此,设定 MENS 算法中 $k \in [1, 10]$,经过多次实验后发现,在 k 为 4 时,算法可取得最好的效果。DTPM 模型中的参数 α 用于保证划分的簇间的公共节点数量,多次实验结果表明,将 α 设为 2,可以保证网络中相交的簇之间的公共点至少有 3 个。

4.1 MENS 算法验证

将 MENS 算法与 ENS 算法进行对比实验,以验证参考节点选择算法 MENS 的性能。实验中使用一个包含有 358 个节点且具有不规则边界的传感器网络,其具体分布如图 3(a)所示。实验中使用 ENS 算法和 MENS 算法选择的参考节点生成拓扑图,之后对两次的生成结果进行对比分析。图 3 为实验结果图:图(a)表示 ENS 算法的选择结果,其中星号表示选出的参考节点;图(b)表示使用 ENS 算法选出的参考节点生成的拓扑图;图(c)表示 MENS 算法的选择结果,星号表示选出的参考节点;图(d)表示使用 MENS 算法选出的参考节点生成的拓扑图。图 3 中 ENS 算法仅能选择出 5 个参考节点,并且这 5 个参考节点的分布相对集中,网络的右侧部分没有参考节点,导致生成的拓扑图中右侧的节点集中在一起,无法反映出网络的结构特征。而在相同的情况下,MENS 算法能够选出 9 个参考节点,且它们基本分布在网络的不同部分,生成的拓扑图也基本保留了原网络的结构,从生成的拓扑图中能清晰地看出节点间的相互位置、网络边界、网络的布局等信息。总之,相比于 ENS 算法,MENS 算法实现了更有效的参考节点的选择,生成的网络拓扑图损失更小,更接近于网络的实际物理坐标图。

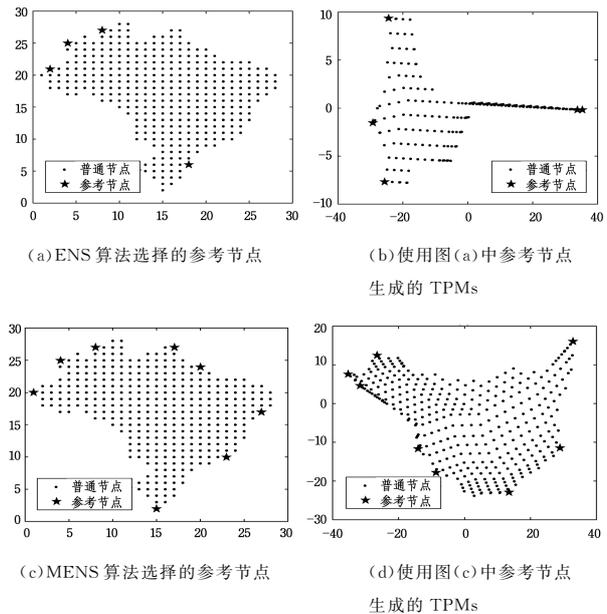


图 3 MENS 与 ENS 对比结果图

Fig. 3 Comparison of MENS and ENS

4.2 MENS-DTPM 模型验证

本节对 MENS-DTPM 模型的效果进行验证。利用 MENS 在网络中选出的参考节点集将网络划分为多个簇,然后分布式地对每个簇进行处理。在每一个簇中,再次使用 MENS 算法选择簇内的参考节点,并生成簇内虚拟坐标系,利用式(3)一式(5)生成 TPMs。

实验使用的网络是图 2(a)所示的复杂网络。图 4 给出了分簇的结果,整个网络被划分为 9 个簇。各簇间的相交节点数如表 1 所列,其中“—”表示簇之间没有相交节点。从表 1 可知,相交的簇之间的公共点都超过了 3 个,可以进行簇间的坐标转换。

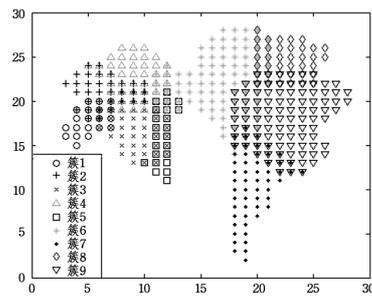


图 4 MENS-DTPM 模型的分簇结果

Fig. 4 Clustering result of MENS-DTPM

表 1 各簇间的相交节点数

Table 1 Number of intersecting nodes in each cluster

	簇 1	簇 2	簇 3	簇 4	簇 5	簇 6	簇 7	簇 8	簇 9
簇 1	—	9	7	3	—	—	—	—	—
簇 2	9	—	10	17	—	—	—	—	—
簇 3	7	10	—	12	13	—	—	—	—
簇 4	3	17	12	—	4	9	—	—	—
簇 5	—	—	13	4	—	6	—	—	—
簇 6	—	—	—	9	6	—	8	13	19
簇 7	—	—	—	—	—	8	—	—	17
簇 8	—	—	—	—	—	13	—	—	12
簇 9	—	—	—	—	—	19	17	12	—

使用图4中的簇2进行实验,结果如图5所示。其中,图(a)为簇2的实际物理坐标图,星号为使用MENS算法选出的簇内参考节点;图(b)为使用ENS算法选出的参考节点生成的全局拓扑图中簇2节点所对应的部分;图(c)为使用MENS算法选出的参考节点生成的全局拓扑图中簇2节点所对应的部分(即图2(b)中簇2节点对应的部分);图(d)为使用图(a)中选出的参考节点生成的拓扑结果,即使用MENS-DTPM的结果。从结果可以看出,图(b)所示的拓扑图中的右侧节点过于密集,无法确认节点的对应关系以及网络结构;而图(c)和图(d)基本反映了网络的结构,这也证明了MENS算法的有效性;而图(d)比图(c)的节点更少,更加清晰地反映了网络的结构。因此,MENS-DTPM模型能够实现更有效的参考节点选择,能够更好地反映网络的结构。

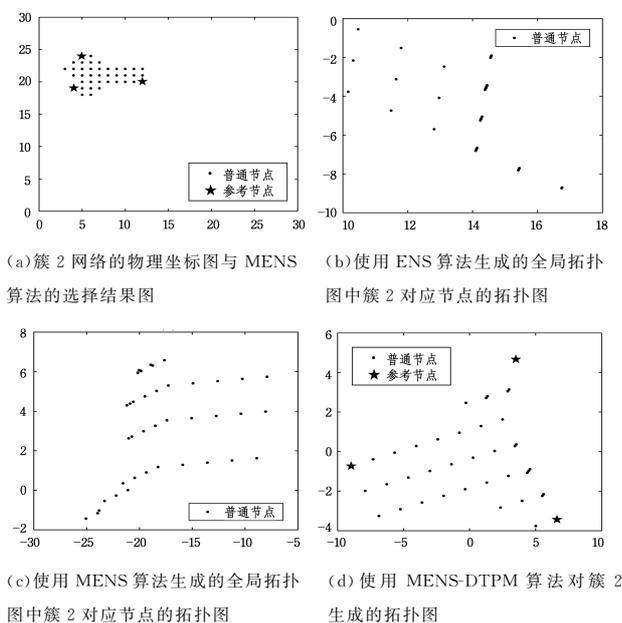


图5 MENS-DTPM结果图

Fig. 5 Results of MENS-DTPM

结束语 TPMs是一种新的模型,可以不依赖任何物理距离信息,从虚拟坐标系统中产生网络拓扑图,为WSN中的拓扑、路由和边界检测提供物理坐标图的替代。然而,TPMs在复杂边界网络中不能取得理想的效果,为此,设计了MENS-DTPM模型。首先,提出一种新的参考节点选择方法,即MENS算法,实现了更有效的参考节点选择。然后,将分布式的思想引入TPMs,并提出一种新的拓扑保留图生成方法。最后,结合这两部分,提出了MENS-DTPM模型,该模型能减小拓扑图的扭曲程度。实验结果表明,相比于同类算法,所提模型具有更好的效果。

参考文献

[1] KWON O H, SONG H J, PARK S. Anchor-free localization through flip-error-resistant map stitching in wireless sensor network[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(11): 1644-1657.

[2] SIMEK M, MORAVEK P, KOMOSNY D, et al. Distributed

recognition of reference nodes for wireless sensor network localization[J]. Radioengineering, 2012, 21(1): 89-98.

- [3] CARUSO A, CHESSA S, DE S, et al. GPS free coordinate assignment and routing in wireless sensor networks[C]// 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. 2005: 150-160.
- [4] DHANAPALA D C, JAYASUMANA A P. Anchor selection and Topology Preserving Maps in WSNs-A Directional Virtual Coordinate based approach[C]// 2011 IEEE 36th Conference on Local Computer Networks. California: IEEE Computer Society, 2011: 571-579.
- [5] DHANAPALA D C, JAYASUMANA A P. CSR: Convex subspace routing protocol for wireless sensor networks[C]// IEEE 34th Conference on Local Computer Networks. 2009: 101-108.
- [6] KARP B, KUNG H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]// International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2000: 243-254.
- [7] RAO A, RATNASAMY S, PAPANITRIOU C, et al. Geographic routing without location information[C]// International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2003: 96-108.
- [8] CAO Q, ABDELZAHER T. Scalable logical coordinates framework for routing in wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks(TOSN), 2006, 2(4): 557-593.
- [9] SAUKH O, SAUTER R, GAUGER M, et al. On Boundary Recognition without Location Information in Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of International Conference on Information Processing in Sensor Networks. New York: Association for Computing Machinery, 2008: 207-218.
- [10] DULANJALIE D, DHANAPALA C, ANURA A, et al. Topology preserving maps from virtual coordinates for wireless sensor networks[C]// Proceedings of IEEE Conference on Local Computer Networks. California: IEEE Computer Society, 2010: 136-143.
- [11] LIU K, ABUGHAZALEH N. Aligned virtual coordinates for greedy routing in WSNs[J]. International Journal of Sensor Networks, 2006, 3(4): 252-265.
- [12] JIANG Y, DHANAPALA D C, JAYASUMANA A P. Tracking and prediction of mobility without physical distance measurements in sensor networks[C]// IEEE International Conference on Communications. 2013: 1845-1850.
- [13] DHANAPALA D C, JAYASUMANA A P. Directional Virtual Coordinate Systems for Wireless Sensor Networks[C]// IEEE International Conference on Communications. 2011: 1-6.
- [14] DHANAPALA D C, JAYASUMANA A P. Topology Preserving Maps—Extracting Layout Maps of Wireless Sensor Networks From Virtual Coordinates[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(3): 784-797.
- [15] KIRBY M. Geometric data analysis: an empirical approach to dimensionality reduction and the study of patterns[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2000.