doi:10.11887/j.cn.201403018 http://journal.nudt.edu.cn

面向定位的分布式无线传感器网络细粒度调整方法*

周晓磊[1],陈 涛[1],巩旭东[1],洪 峰[2],罗雪山[1]
(1. 国防科技大学 信息系统工程重点实验室,湖南 长沙 410073;
2. 西安卫星测控中心,陕西 西安 710000)

摘 要:针对在初始的部署条件下不可定位的无线传感器网络,提出一种分布式的面向定位的网络调整方法。该方法通过节点所处的路径信息判别确定该节点的调整策略,从而使初始状况下不可定位的网络达到可定位条件,该方法仅需调整约11%节点就能够将稀疏的网络调整至可定位,比当前最好的网络调整方法减少了约40%。此外,该方法采用分布式执行策略,从而将定位所产生的通信负载和能耗均衡到网络中的多个节点,克服了先前集中式方法的可扩展性限制。大量的仿真实验结果表明,该方法较现有方法而言具有更高的执行效率。

关键词:无线传感器网络;定位;网络调整;可定位性;图刚性
中图分类号:TP393 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)03-0097-06

Fine-grained distributed localization-oriented adjustment approach for wireless sensor network

ZHOU Xiaolei[1], *CHEN Tao*[1], *GONG Xudong*[1], *HONG Feng*[2], *LUO Xueshan*[1]
(1. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Xi'an Satellite Center, Xi'an 710000, China)

Abstract: The non-localizable WSN in the initial deployment is focused upon, and a fine-grained distributed localization-oriented adjustment approach, named as LODA, is proposed. LODA decides the strategy of the node based on the path information to achieve the network localizability in an initially non-localizable network. Compared with the current network adjustment approaches, the approach proposed merely adjusts less than 11% nodes in a sparse network to achieve localizability, which is about 40% better than the current best approach. Besides, the algorithm in a distributed manner is designed to balance the communication load caused by the adjustment. Therefore, the scalability limitation in the previous centralized approaches is overcome. Extensive simulation results show that our approach outperforms the previous method in adjustment efficiency.

Key words: wireless sensor network; localization; network adjustment; localizability; graph rigidity

传感器节点对物理世界的观测信息必须辅以其位置信息才可发挥作用。尽管当前的传感器节点中已经能够嵌入全球定位系统(Global Positioning System,GPS)模块,但是由于造价以及能耗上的限制,仍然难以大规模应用于当前的无线传感器网络应用之中。理论研究结果表明[1-2],除非网络具有相当高的节点密度,否则难以通过基于测距的协同定位方法[3]进行定位。而在实际应用中,为了减少节点间的消息冲突和信道干扰,往往采用了拓扑控制机制,从而使得无线传感器网络在一般情况下难以达到非常密集的部署,这就使得网络的可定位性得不到保障。

本文针对不可定位的网络,提出了一种全新面向定位的分布式网络调整方法(Localization-Oriented aDjustment Approach,LODA),该方法证明了在2—连通的稀疏网络中节点可定位的充分条件。不同于以往集中式的网络调整方法,LODA仅根据节点自身所处的路径信息,就能够使得在初始条件下不可定位的网络转变为可定位的网络,从而支持当前的定位算法。此外,LODA大幅降低了需要进行调整的节点数目,从而有效提高了网络调整效率,并降低了网络调整能耗。实验结果显示,对于稀疏的2—连通网络,需要调整约11%的节点就能够使得该网络满足可定位性条件,比当前方法减少了约40%。

* **收稿日期**:2013-09-07
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61202487, 61170284)
作者简介:周晓磊(1986—),男,河北保定人,博士研究生,E-mail:zhouxiaolei@nudt.edu.cn;
罗雪山(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:xsluo@nudt.edu.cn

1 相关工作

在图论中的刚性理论[4]的基础上,学界已经对网络可定位性[5]和节点可定位性[6]进行了大量的研究,从而得出了网络和节点位置唯一性的判定条件。不可定位的网络定位与调整方法大致可分为移动节点辅助方法及网络自调整方法。

移动节点辅助方法利用具有移动能力的节点在网络中游走,通过测量移动节点和静态节点之间的距离来增加网络中的距离约束[7-10],从而使得网络满足可定位性条件。Pathirana 等人[7]利用嵌入惯性导航组件的移动机器人来辅助定位,通过接收信号强度建立机器人与固定节点间的距离约束,从而减少定位所需的信标节点数目。Sichitiu 等人[8]在移动节点上嵌入 GPS 模块作为移动的信标节点来定位盲节点。Priyantha 等[9]及 Wu 等[10]学者则提出了仅需要移动节点与固定节点间的距离信息的定位方法。然而,移动节点的使用将带来巨大的成本及时间开销,使其可扩展性受到限制。此外,传感网部署区域中移动节点的可达性本身也受到限制。

网络自调整方法不需增加额外的移动节点,仅需通过增强部分节点的通信功率来增大节点的测距范围,从而增加网络中边的数量,并通过这种自调整的方式使得网络可被定位[11,13,17]。Anderson 等[11]从网络可定位性的角度进行调整,且不区分节点可定位性。因此,其调整粒度过粗,大大增加了定位网络需要调整节点的数量,从而产生了巨大的开销,降低了定位的效率。与本文相类似的,Chen 等[13,17]均从节点可定位性的角度来减少需要调整的点的个数,以达到细粒度的网络调整,降低调整所需的成本开销。所不同的是,本文提出的方法需要调整更少的节点,同时采用分布式的执行策略,一方面进一步减少了网络调整的代价,另一方面则通过均衡定位所产生的通信负载克服了网络调整方法的可扩展性限制。

2 理论基础

网络可定位性回答了在给定距离图的前提下网络中全部节点是否都是可被定位的问题。Jackson 等人[12]证明了对于一个包含不少于 4 个点的图是全局刚性的,当且仅当它是 3—连通且冗余刚性的。在此基础上,Eren 等人[5]证明了:一个网络是可定位的,当且仅当所对应的距离图是全局刚性的且包含三个信标节点。Yang 等人[6]提出了节点可定位性的充分条件和必要条件,以识别网络中可被定位的和不可被定位的节点。

定理 1[6]:给定距离图 $G=(\boldsymbol{V},\boldsymbol{E})$ 以及由 $k\geqslant 3$ 个位置已知节点组成的集合 $\boldsymbol{B}\subset\boldsymbol{V}$。如果一个点被包含在某个冗余刚性组件内,且在该组件内有三条不相交的路径连接该点到集合 $\boldsymbol{B}$ 中三个不同的点,则该点是可被定位的。冗余刚性组件是指图 $\boldsymbol{G}$ 中的极大冗余刚性子图。

引理 1[12]:二维平面中包含 $2n-3$ 条边的图 $\boldsymbol{G}$ 是刚性的,当且仅当其不存在包含多于 $2n'-3$ 条边的子图,其中 n' 为子图中节点的数量。

定理 2[13]:令 $\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{V},\boldsymbol{E})$ 为一条路径,从一个可被定位的点开始,结束于另一个可被定位的点,并且 $\boldsymbol{P}$ 中至少有三个可被定位的点。令 $\boldsymbol{V}_N$ 表示不可被定位的点的集合,$\boldsymbol{E}_N$ 表示边的集合,$\forall(i,j)\in\boldsymbol{E}_N$,有 $i\in\boldsymbol{V}_N$ 且 $\forall(i,j)\in\boldsymbol{E}^2$,那么 $\boldsymbol{P}'=(\boldsymbol{V},\boldsymbol{E}\cap\boldsymbol{E}_N)$ 是可被定位的。

定理 2 从节点所处的路径信息的角度说明了将不可定位的节点调整为可被定位的节点的充分条件。即若某个不可定位节点处于一条至少有 3 个可被定位节点的路径中,则可通过点增强操作使得该节点变为可定位节点。点增强操作是指通过调节节点的发送功率,使得其测距范围达到初始测距范围的 2 倍,从而在距离图上与其所有的 2 跳邻节点间产生一条新的边。下文称定理 2 中的路径 $\boldsymbol{P}$ 为可定位路径。

定理 3:给定一个 2—连通网络 $\boldsymbol{G}=(\boldsymbol{V},\boldsymbol{E})$,若包含 3 个或 3 个以上的信标节点,对于任意一个节点 $v_n\in\boldsymbol{V}$,则至少存在一条可定位路径 P 能够满足以下条件之一:

1)$\boldsymbol{P}$ 的两个端点均为可定位节点;

2)$\boldsymbol{P}$ 中至少包含 3 个可定位节点;

3)$\boldsymbol{P}$ 中包含 v_n。

证明:$|\boldsymbol{V}|=3$ 时,定理显然成立。以下证明中,仅考虑 $|\boldsymbol{V}|>3$ 的情况。如图 1 所示,图中实心点表示可定位节点,空心点表示位置未知的节点。曲实线表示连接 v_1 和 v_n 的简单路径,曲虚线表示连接 v_2 和 v_n 的简单路径,v_a 到 v_b 段是实线和虚线的叠加,直线表示两点间的边。对于任意节点 v_n,因为图 $\boldsymbol{G}$ 是 2—连通的,所以一定存在 v_n 到 v_1 的简单路径 p_1 和 v_n 到 v_2 的简单路径 p_2。

如果 p_1 和 p_2 不相交,那么即存在 v_1 到 v_2 且经过 v_n 的简单路径。如果 p_1 和 p_2 相交,也即两条

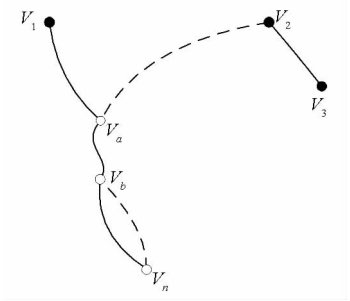


图 1　定理 3 的证明示意图

Fig. 1　Example of theorem 3

简单路径在某些位置会重合,如图 3 所示,假设 p_1 和 p_2 在 v_a 到 v_b 段会重合,那么此时删掉节点 v_a,图 $\boldsymbol{G}$ 就不再连通,与图 $\boldsymbol{G}$ 是2—连通的相矛盾。所以一定存在 v_1 到 v_2 且经过 v_n 的简单路径 $\boldsymbol{P}$。

因为可定位节点位置已知,所以任意可定位节点对之间均存在一条边,如图 1 中(v_2, v_3)。若 p_1 和 p_2 中包含了 v_3,则 P 中已包含三个信标节点,定理得证。若 v_3 不被包含在 $\boldsymbol{P}$ 中,则在 $\boldsymbol{P}$ 的以 v_2 为端点的一端加入边(v_2, v_3)构成路径 $\boldsymbol{P'}$,则存在路径 $\boldsymbol{P'}$包含 3 个信标节点,定理得证。□

由于点 v_n 是任意选取的,所以对于网络中任意一个不可定位的点,均可以找到一条包含 v_n 的可定位路径 $\boldsymbol{P}$。因此,定理 3 证明了对于任意2—连通网络,所有不可定位节点均能够根据自身所在的位置信息决定是否需要进行点增强操作,从而使得整个网络达到可定位性条件。

3　算法设计与实施

LODA 方法通过接收的来自相邻节点的消息,获取节点所在的路径信息,并据此判断该节点的可定位性及调整方法。

3.1　实施流程

在调整过程中,网络中一个节点 u 可向其邻居节点发送以下 3 种消息:

Ⅰ类型:包含 u 当前的可定位性信息;

Ⅱ类型:包含信标节点到 u 的一条简单路径;

Ⅲ类型:消息中包含一条可定位路径。

如图 2 所示,LODA 的执行过程主要包括以下三个步骤:

第 1 步:发送消息。包括信标节点向其相邻节点发送Ⅰ类型消息;节点收到Ⅰ类型消息后可能继续发送新的Ⅰ类型消息;节点收到Ⅱ类型消息后转发Ⅱ类型消息,如果该节点可定位,则还会发送Ⅰ类型和Ⅲ类型消息;节点收到Ⅲ类型消息后转发此消息。

第 2 步:可定位性判定。节点收到路径信息后,检测能否与之前接收到的路径信息拼接出一条以信标节点为端点的简单路径。若存在,则通过定理 2 确定是否需要调整。

第 3 步:判断网络可定位性。节点根据收到的不同的Ⅰ类型消息的数目来判断是否网络中所有节点已被定位。如果整个网络已经可被定位,停止发送消息,调整过程结束。否则重复以上 3 步。网络经过调整后,满足可定位性条件,即可通过现有的网络定位算法对进行定位,如 Sweeps[16]、Wheel[6]等。图 3 给出了不可被定位节点收到消息后的工作流程。

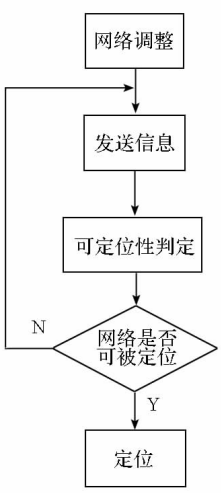


图 2　LODA 方法流程图

Fig. 2　Flow chart of LODA approach

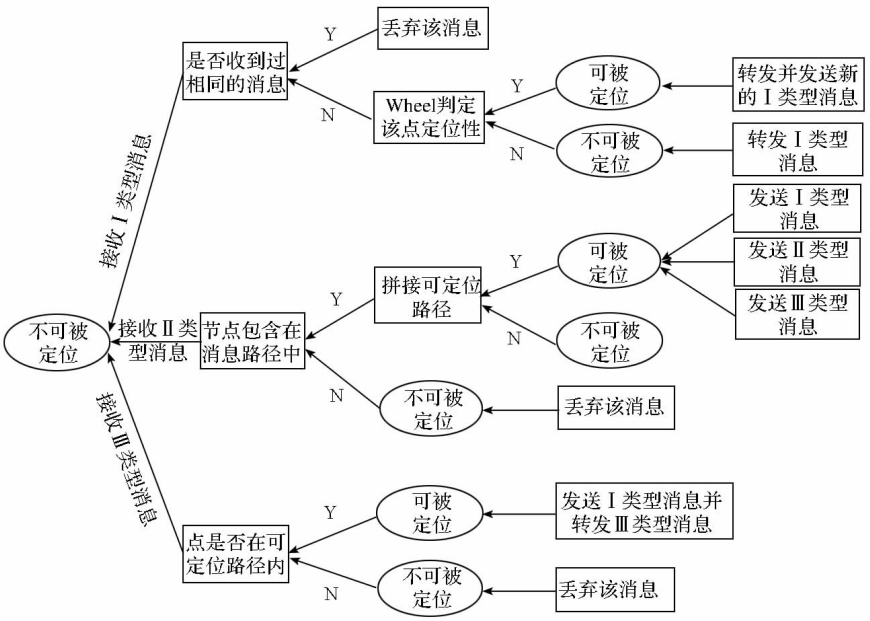


图 3　不可被定位点的工作流程

Fig. 3　Workflow of the non-localizable node

3.2 算法设计

算法 1 给出了节点 u 收到Ⅰ类型消息后的响应过程。若 v 是 u 的邻居,则判定 u 的可定位性,如果 u 可被定位,则发送包含 u 可定位性信息的Ⅰ类型消息。

算法 1 AdjustByNeighbor

已知:节点 u 接收到邻居节点发送的Ⅰ类型消息,消息内容为 v 是可定位的

```
if v 是 u 的邻居 then
    if u 可被 Wheel 定位 then
        标记 u 是可定位节点
        向 u 的邻居节点发送新的Ⅰ类型消息,内容为 u 当前可定位
    end if
end if
if u 未记录 v 是可定位的 then
    记录 v 是可定位的
    将此消息向邻居节点发送
end if
```

算法 2 给出了节点收到Ⅱ类型消息后的响应过程。节点 u 收到包含路径 p 的Ⅱ类型消息,首先判断 u 是否能够加入 p 中构成一条新的简单路径 p',若不可以,则丢弃此消息。若可以,则将 p' 封装为Ⅱ类型消息转发。如果需要对节点 u 进行调整,则向网络中发送包含 u 可定位性信息的Ⅰ类型消息。

算法 2 GetNewPath

已知:节点 u 接收到邻节点的Ⅱ类型消息,消息中包含简单路径 p

```
if 将 u 加入 P 的末端能构成一条新的简单路径 p' then
    if u 未被定位 then
        for u 点之前接收到的每条简单路径 p_i
            if p'和 p_i 能构成一条简单路径 new_p then
                在 new_p 中执行点增强 u^2
                标记 u 为可定位节点
                向邻居节点发送Ⅰ类型消息,内容为 u 可被定位
                向邻居节点发送Ⅲ类型消息,内容为可定位路径 new_p
            end if
        end for
    end if
    向邻节点发送包含 p'的Ⅱ类型消息
end if
```

算法 3 给出了节点接收到Ⅲ类型消息后的处理过程。节点 u 收到包含可定位路径 p 的Ⅲ类型消息,若 u 不在 p 中,则抛弃。否则,对 u 进行调整,标记为可定位,向网络中发送包含 u 可定位性信息的Ⅰ类型消息,并转发Ⅲ类型消息。

算法 3 AdjustByPath

已知:节点 u 接收到邻居节点发送的Ⅲ类型消息,消息中包含可定位路径 p

```
if u 不可被定位并且 u 被包含在 p 中 then
    在 p 内对 u 做点增强 u^2
    向邻节点发送Ⅰ类消息,内容为 u 可定位
    向邻节点发送Ⅲ类消息,内容仍为 p
end if
```

对于Ⅰ类型消息,每个节点将自身定位信息和收到的其他节点的定位信息传播至整个网络的通信开销 $O(dN)$,其中 d 为网络平均节点度,N 为网络内节点总数。由于每个节点的计算只涉及判定邻居节点中可定位节点的数量,因此处理Ⅰ类型消息的计算复杂度为 $O(d)$。

对于Ⅱ类型消息,对于任意节点 u,其转发的消息数量是信标节点到 u 的简单路径的数量 p,记路径的平均长度为 l,那么每个点的通信开销为 $O(pl)$。当节点收到Ⅱ类型消息,就需要与已存储的路径进行拼接,其计算复杂度为 $O(pl)$。$O(p)$ 条Ⅱ类型消息所产生的单点计算复杂度为 $O(p^2l)$。

对于Ⅲ类型消息,每个节点的通信开销为接收并转发一条可定位路径,所以通信复杂度为 $O(l)$。其计算复杂度为判断一个点是否在可定位路径中,即 $O(l)$。

综上所述,LODA 方法所产生的通信开销为 $O(pl)$,其计算复杂度为 $O(dN+p^2l)$。LODA 通过分布式的执行策略有效地降低了通信开销,从而适用于大规模传感器网络应用。

4 仿真与评估

为了验证 LODA 的正确性及性能,本文通过 TOSSIM 及 Matlab 仿真程序,进行了大量的仿真实验。通过由 TOSSIM 所提供的工具生成了在 $[0,20]^2$ 的区域内 400 个节点的 2—连通网络。节点间通过 Disk 模型进行测距。为了表征不同的网络密度,动态调整节点最大测距半径 R,其初始值为 1.2,调整步长为 0.01。从而运行了 100

个仿真实例以评估 LODA 方法的性能①。

本文对初始的网络通过 LODA 方法进行调整的正确性及效率进行了评估,并统计了逐个轮次中需要调整的节点数目及可被 Wheel[6] 方法识别的可定位节点数,如图 4 所示。对于初始的稀疏网络而言,LODA 方法经过 18 个轮次,共调整了 20% 的节点以达到网络可定位性。调整轮次在数值上与当前网络中传播的 I 类型消息中最大的路径长度相等,因此可作为调整效率指标。

由于网络中任意一对信标节点间的平均路径长度要大于 14,所以前 7 轮次中,节点难以通过接收到的 I 类型消息中的路径拼接出一条合法路径。而在第 8 ~ 11 轮次中,能够识别出的待调整的节点和可定位节点数目剧增。其原因是节点已经可以从接收到的 I 类型消息中拼接出合法路径,并做出相应调整变成可定位的节点,与此同时,与可定位节点处于同一个全局刚性子图的节点也可以通过 Wheel 方法获得自身的可定位性。而在第 12 ~ 14 轮次,由于网络中规模较大的全局刚性子图中的节点都明确了自身的可定位性,未获得定位性的节点多数为不在全局刚性子图中的节点或者处于网络中心附近的节点②。因此,网络仅仅是传递了 I 类型的消息,增大了消息中路径的长度,以便在后续轮次能够通过方法 1 获得新的可定位节点。最后,在第 15 ~ 18 轮次,网络中剩余的节点能够构造的路径长度增加,从而得以判定其是否需要调整。

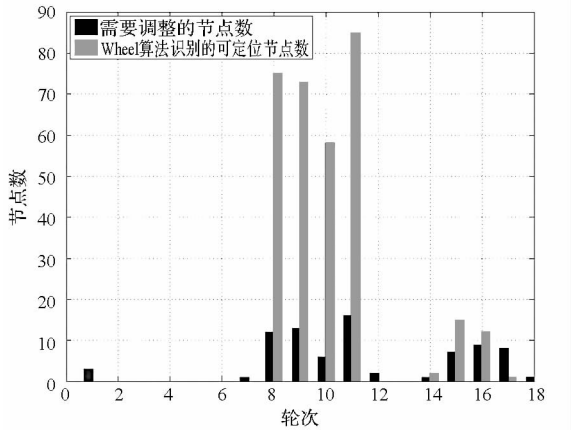


图 4　逐轮次判别的可定位节点和需要调整节点数

Fig. 4　Numbers of localizable nodes and nodes requiring adjustment in each round

本文进一步评估了 LODA 方法的效率及所需调整的节点所占的比率随网络密度的变化,如图 5 所示。调整轮次作为网络调整的效率指标。随着网络平均度的增加,将网络调整成可被定位的状态所需的计算轮次越来越少。而对于稀疏网络[16](平均度数小于 10),最多仅需要进行 15 轮次,调整 11% 的节点。当节点平均度数达到 14 时,LODA 方法仅需要进行 5 轮调整,所调整的节点数目也仅占 2%。

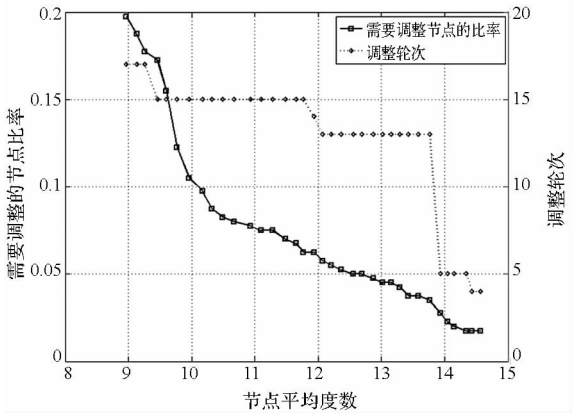


图 5　需调整节点比率及轮次随节点平均度数的变化

Fig. 5　Proportions of the nodes requiring adjustment in each round vs. average node degree

事实上,随着网络平均度的增大,两点间的平均路径长度会变短,因此单点调整效率会随着网络平均度的增大而提高,此外,随着网络密度的增大,网络中满足可定位性条件的初始节点数目也逐渐增多,网络中边的数目增多,也使得网络变密集,那么在相同信标节点和可定位节点分布下,网络中满足节点可定位条件的节点也就越多。尽管对于节点平均度数较低的网络需要多个轮次的执行过程,然而网络调整尽在网络部署之初进行,多轮次的时间开销并不会对整个网络的运行产生巨大影响。

在仿真与评估过程中,为了进一步验证 LODA 方法的调整效率,本文将 LODA 方法同当前最好的集中式调整方法——基于组件的网络调整方法(Localizability Aided Localization, LAL)进行了仿真对比。由于基于组件的网络调整方法并不逐轮次执行,本文采用新增加的边数作为度量调整效率的指标。如图 6 所示,对于 400 个节点规模的网络而言,LODA 方法仅需要增加约合方法 60% 的边就能够使得初始不可定位的网络达到网络可定位性。特别是对于稀疏网络而言,LODA 方法的优势就更为明显。

① 初始测距半径条件下,网络为 2—连通图。因此,任意 $R > 1.2$ 的网络实例均为 2—连通图。

② 节点到所有信标节点的最短跳数越大,节点距离网络中心就越近。

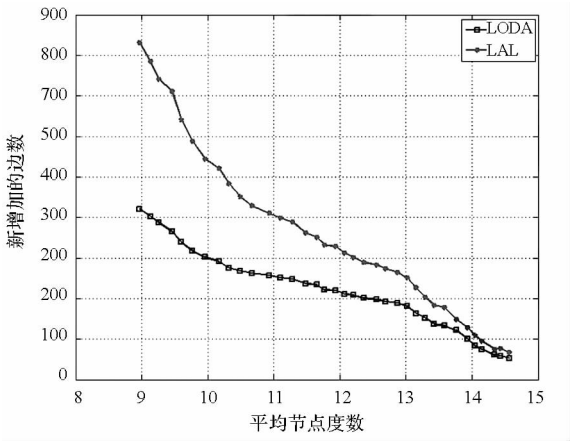


图6 网络调整新增边数

Fig. 6 Number of added edges in network adjustment

5 结论

不可定位的无线传感器网络的定位问题严重制约着大规模无线传感器网络的实际应用。本文针对不可定位的网络,提出了一种分布式的细粒度的网络调整方法。该方法仅需调整不超过20%的节点,就能够将不可定位网络调整为可被定位的网络。此外,本文采用了分布式的执行策略,克服了先前集中式算法中的可扩展性限制。下一步工作中,本文将进一步研究提高网络调整效率的方法,并优化调整过程中所产生的通信负载,以降低能耗,从而更适用于大规模传感网的快速部署。

参考文献(References)

[1] Goldenberg D K, Krishnamurthy A, Maness W C, et al. Network localization in partially localizable networks[C]// Proceedings of 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies,2005,1:313 - 326.

[2] Liu Y H, Yang Z, Wang X P, et al. Location, localization, and localizability[J]. Journal of Computer Science and Technology,2010, 25(2): 274 - 297.

[3] Patwari N, Ash J N, Kyperountas S, et al. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 54 - 69.

[4] Hendrickson B. Conditions for unique graph realizations[J]. SIAM Journal of Computing,1992, 21 (1): 65 - 84.

[5] Eren T, Goldenberg O K, Whiteley W, et al. Rigidity, computation, and randomization in network localization[C]// Proceedings of Twenty - third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications, 2005,4: 2673 - 2684.

[6] Yang Z, Liu Y H. Understanding node localizability of wireless ad-hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(8):1249 - 1260.

[7] Pathirana P N, Bulusu N, Savkin A V, et al. Node localization using mobile robots in delay - tolerant sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(3): 285 - 296.

[8] Sichitiu M L, Ramadurai V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon[C]//Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Mobile Ad - hoc and Sensor Systems, 2004: 174 - 183.

[9] Priyantha N B, Balakrishnan H, Demaine E D, et al. Mobile-assisted localization in wireless sensor networks [C]// Proceedings of INFOCOM'05, 2005: 172 - 183.

[10] Wu C H, Zhang Y, Sheng W H, et al. Rigidity guided localization for mobile robotic sensor networks [J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2010, 6(2):114 - 128.

[11] Anderson B D, Belhumeur P N, Eren T, et al. Graphical properties of easily localizable sensor networks[J]. Wireless Network, 2009, 15 (2): 177 - 191.

[12] Jackson B, Jordán T. Connected rigidity matroids and unique realizations of graphs[J]. Journal of Combinatorial Theory, Series B, 2005, 94(1): 1 - 29.

[13] Chen T, Guo D K, Yang Z, et al. Improving the efficiency of localization-oriented network adjustment in wireless sensor networks[J]. IEEE Communication Letters, 2011, 15(9): 983 - 985.

[14] Yang Z, Liu Y H, Li X Y. Beyond trilateration: on the localizability of wireless ad hoc networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2010, 18(6): 1806 - 1814.

[15] Aspnes J, Eren T, Goldenberg D K, et al. A theory of network localization [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(12): 1663 - 1678.

[16] Goldenberg D K, Bihler P, Cao M, et al. Localization in sparse networks using sweeps[C]//Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Network, 2006: 110 - 121.

[17] Chen T, Yang Z, Liu Y H, et al. Localization-oriented network adjustment in wireless ad-hoc and sensor networks[J]. IEEE Transations on Parallel and Distributed Systems,2013,25(1):146 - 155.