

无线传感器网络距离自调整的 MDS 定位算法

叶飞虎¹ 白光伟^{1,2} 沈航³

(南京工业大学计算机科学与技术系 南京 210009)¹

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)²

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)³

摘要 定位技术是无线传感器网络中的关键支撑技术之一。针对移动无线传感器网络的特点,在深入分析现有多维定标节点定位算法的基础上,提出一种改进机制,即距离自调整的多维定标节点定位算法(SA_MDS)。该算法运用3种方法估算节点的两跳距离,然后自动调整节点间的估算距离,从而提高定位精度。仿真结果表明,采用SA_MDS算法,节点的定位精度有较大提高。

关键词 无线传感器网络,定位,多维定标,节点距离

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Self-adjusting Distance MDS Algorithm for WSNs

YE Fei-hu¹ BAI Guang-wei^{1,2} SHEN Hang³

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)¹

(State Key Laboratory of Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)²

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)³

Abstract Localization is one of the key technologies in wireless sensor networks (WSNs). Considering the characteristics of WSNs, this work began with a thorough investigation of the existing MDS_MAP localization algorithm. On this basis, we proposed a self-adjusting distances localization algorithm (SA_MDS). The basic idea behind SA_MDS is to estimate the distance between the two-hop nodes with three approaches, followed by self-adjustment of the estimated distances between nodes, in order to improve positioning accuracy. Our simulation results show that the SA_MDS algorithm improves the accuracy of node localization significantly.

Keywords WSNs, Localization, Multidimensional scaling, Distances of nodes

1 引言

在无线传感器网络中,由于传感器节点部署的不可控制性,如飞机撒播、节点实时移动等,使得网络中大多数节点位置不能事先确定,而无线传感器网络的大量应用都需要网络中节点的地理位置信息,如节点的成簇、绘制部署区域的地图等^[1]。另外,了解传感器节点位置信息还可以提高路由效率,为网络提供命名空间,向部署者报告网络的覆盖质量,实现网络的负载均衡以及网络拓扑的自配置^[2]。因此,在无线传感器网络(WSNs)的应用中,节点能够自主确定位置,被认为是基本能力和系统的基本服务之一。由于WSNs自身特点,如受到成本、功耗、拓展性等问题的限制,寻求WSNs自身定位机制成为许多研究机构和学者共同探讨的问题。

近年来,学术界提出了许多应用于传感器网络的定位系统。文献[2]对这些算法的原理及特点做了详尽的分析和描

述,给出了定位系统和定位算法的性能评价参数。到目前为止,现有的无线传感器网络节点定位算法都有各自的特点和应用范围。根据定位的需求,各算法在性能评价参数上各有取舍,没有哪一种算法是绝对优秀的。综合考虑算法的各个性能评价参数,使节点的定位精度最优,是定位算法的主要目标。定位算法的分类有很多种,根据定位过程中是否测量实际节点间的距离,可以把现有的定位算法主要分为两类:基于距离(Range-based)的定位算法和距离无关(Range-free)的定位算法。基于距离的定位算法对硬件有较高的要求^[3],它们首先利用RSSI、TOA、TDOA和AOA^[4]等技术测量节点之间的距离,然后用数学方法计算节点的坐标。距离无关定位算法主要有APIT算法^[5]、DV-HOP算法、Amorphous算法、Centroid算法等,它们主要利用节点的连通性来辅助节点定位。

本文首先深入分析现有的一些典型定位算法的原理和性

到稿日期:2011-06-04 返修日期:2011-08-06 本文受国家自然科学基金(60673185,61073197),江苏省自然科学基金(BK2010548),南京大学计算机软件新技术国家重点实验室开放课题(KFKT2010B08)资助。

叶飞虎(1986—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络节点定位技术, E-mail: njyefei@163.com;白光伟(1961—),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究方向为无线传感器网络、无线自组织网络、网络体系结构和协议、网络系统性能分析和评价、多媒体网络服务质量等;沈航(1984—),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络。

能,针对目前仍然存在的问题,并充分考虑无线传感器网络的特点,提出一种距离自调整的多维定标节点定位(SA_MDS)算法。其核心思想是通过数学方法获得多跳节点之间的距离,目的是自动调整多跳节点间的距离,从而提高定位精度。通过一系列的仿真实验证明,SA_MDS算法能够适应 WSNs 的特点,相比于 MDS-MAP 算法^[6],SA_MDS 算法能够提供更加精确的定位服务。

本文第 2 节深入研究现有的基于 MDS 的定位算法,分析这些算法存在的问题,并在此基础上提出 SA_MDS 算法,给出理论模型及算法流程;第 3 节通过仿真的方法对改进算法的性能进行分析评价;最后总结全文。

2 SA_MDS 算法的理论模型和算法描述

本节首先分析现有 MDS_MAP 算法的核心思想,然后提出改进的 SA_MDS 算法的假设及网络模型,在此基础上详细阐述 SA_MDS 算法的理论模型以及执行流程。

2.1 MDS_MAP 算法

多维定标技术^[7](Multidimensional Scaling, MDS)是一种源自心理测量学和精神物理学的数据分析技术,在工程领域、社会科学和心理学等方面都有较广泛的应用。Shang Yi 等首次把多维定标技术应用于 WSNs 的节点定位技术中,提出了 MDS_MAP 算法^[6]及其改进算法^[8],它们可以在 range-free 和 range-based 两种情况下进行节点定位,其核心思想是用多维定标技术处理节点之间的距离或者跳数的度量值,进而完成节点的定位,它主要分为 3 个步骤^[9]:

- 1) 获得节点的距离矩阵;
- 2) 根据距离矩阵信息,用 MDS 计算相对坐标图;
- 3) 利用已知锚节点的坐标信息将相对坐标图转换为绝对坐标图。

MDS-MAP 算法能够很好地适应 WSNs 中的节点定位,但该算法也有自己的不足之处。如算法采用最短路径代替节点间的实际几何距离,当最短路径距离与节点间的实际距离相差较大时,定位精度将受到较大影响。为此本文提出一种距离自调整的 MDS 定位算法(SA_MDS)。SA_MDS 算法对多跳邻居节点的距离进行数学处理,然后根据网络部署的实际情况自动调整节点间的距离,以提高节点定位精度。

2.2 网络模型及假设

为方便对 SA_MDS 算法进行理论分析,假设网络中的所有节点部署在边长为 R 的正方形区域内。网络中普通节点和锚节点的通信半径都为 γ ,锚节点可以感知自己的位置信息并且可以获得与一跳邻居节点的相对角度。根据无线传感器网络在应用中的特点,模型假设节点的通信区域不一定是理想的圆形区域,节点的邻居矩阵也不一定是对称矩阵。

2.3 SA_MDS 算法

定义 1 节点 i, l 为两跳邻居节点,若节点 k 同时为节点 i, l 的一跳邻居节点,则称节点 k 为节点 i, l 的关联节点。

在 SA_MDS 算法中,假设 n 个节点部署在 m 维空间中,节点获得邻居矩阵后,邻居矩阵如式(1)所示,节点可以应用如下数学方法获得两跳节点的距离。

根据节点的邻居矩阵式(1)可以获得节点 i, j, k, l 的连接关系图,如图 1(a)所示。

$$\begin{matrix} & \dots & i & j & k & l & \dots \\ \vdots & \begin{pmatrix} \cdot & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \cdot & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ i & \dots & 0 & 1 & 1 & \\ j & \dots & & 0 & 1 & 1 \\ k & \dots & & & 0 & 1 \\ l & \dots & & & & 0 \\ \vdots & \dots & & & & & \ddots \end{pmatrix} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{matrix} \quad (1)$$

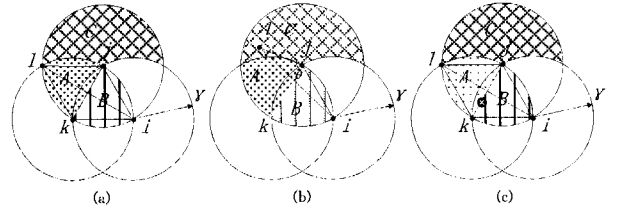


图 1 节点 i, j, k, l 关系图

图 1(a)中实线长度表示节点间可以直接测得的一跳距离,虚线长度表示节点间不可以直接测得的两跳距离。图 1(a)给出的是边界情况下的示意图,在实际情况下,只要节点 l 在区域 A 中,其都适合 SA_MDS 算法。节点 i, j 之间的距离用 d_{ij} 表示,若节点 i, l 具有 $m(m \geq 2)$ 个关联节点,任取其中两个关联节点 k, j ,则根据几何知识可以得到:

$$\cos \angle ijk = \frac{d_{ij}^2 + d_{jk}^2 - d_{ik}^2}{2d_{ij}d_{jk}} \quad (2)$$

$$\cos \angle kjl = \frac{d_{jk}^2 + d_{jl}^2 - d_{kl}^2}{2d_{jk}d_{jl}} \quad (3)$$

$$d_{il}^2 = d_{ij}^2 + d_{jl}^2 - 2d_{ij}d_{jl} \cos(\angle ijk + \angle kjl) \quad (4)$$

根据以上 3 式可以得到两跳距离 d_{il} 的大小。由数学知识可知 d_{il} 存在两个值,且它们关于直线 kj 对称。由于是两跳距离,因此只保留距离大于节点通信半径 γ 的值,舍弃另外一个不符合要求的值。

如果节点部署过于稀疏,或者节点 l 位于 C 区,则节点间的连接关系发生变化,如图 1(b)所示,即节点 i, l 只有一个关联节点。与图 1(a)相比较,图 1(b)中相邻节点不能提供足够的邻居信息,故不能应用式(2)一式(4)的数学方法获得节点两跳距离 d_{il} 。为了获得两跳距离 d_{il} ,需要判断关联节点 j 是否为锚节点。如果关联节点 j 是锚节点,则可以通过式(5)获得节点 i, l 之间的距离,式中 θ 为关联节点 j 与节点 i, l 的角度之和。

$$d_{il} = \sqrt{d_{ij}^2 + d_{jl}^2 - 2d_{ij}d_{jl} \cos \theta} \quad (5)$$

如果关联节点 j 不是锚节点,则不能通过上述数学方法获得两跳节点间的实际距离。用路径距离之和代替两跳节点间的实际距离,见式(6):

$$d_{il} \approx d_{ij} + d_{jl} \quad (6)$$

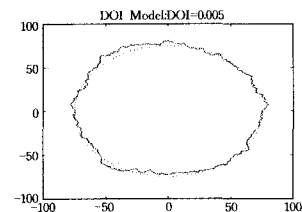


图 2 无线传输模式不规则度 DOI

在实际应用中,障碍物会对无线电的传播产生影响。另外,无线电在不同传输方向上传输时,数据包的丢失情况也不

尽相同。因此,无线传输模式不规则度 DOI^[10]在实际网络中是客观存在的,它对节点间的关系和定位精度都有较大影响。DOI表示无线电波在其传播方向上的最大变化范围,图2给出了DOI为0.005的示意图。

DOI的存在可能导致无法获得两个关联节点间的距离,如图1(c)所示。如果节点 i, l 的 m 个关联节点中任意两个关联节点间的距离都无法获得,就用路径距离之和的最小值代替两跳节点间的实际距离 d_{il} ,如式(7)所示。根据定位需求,可以用同样的方法自动调整更多跳数节点间的距离。

$$d_{il} \approx \min(\sum_{x=0}^m d_{ix} + d_{xl}, m \geq 2) \quad (7)$$

n 个节点间的距离 d_{ij} 构成距离矩阵 D 。将矩阵 D 双中心化,可以构造一个新的矩阵 D^* 。 D^* 中的元素 d_{ij}^* 由式(8)确定:

$$d_{ij}^* = -\frac{1}{2} (d_{ij}^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{ij}^2 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ij}^2 + \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}^2) \quad (8)$$

矩阵 D^* 进行奇异值分解,可以表示为式(9):

$$D^* = V \Lambda^2 V^T \quad (9)$$

式中的 V^2 是特征向量矩阵, Λ 是奇异值构成的对角阵。

根据定位要求选取其中最大的 K 个奇异值 Λ_K 及其对应的特征向量 V_K 来计算节点相对坐标矩阵 X ,如式(10)所示:

$$X = V_K \Lambda_K \quad (10)$$

从相对坐标矩阵到绝对坐标矩阵的转换是基于锚节点的坐标完成的。相对坐标矩阵 X 经过翻转、镜像、平移、缩放等一系列处理,可以获得节点的绝对坐标矩阵。首先,根据锚节点的相对坐标和绝对坐标可以获得相对坐标和绝对坐标的线性关系函数(T_{turn}),该函数(T_{turn})满足坐标变换后的锚节点估计位置与已知位置的平方误差最小;然后根据函数(T_{turn})和相对坐标矩阵 X 可以获得所有节点的绝对坐标矩阵,进而完成节点的定位。

基于以上描述,给出SA_MDS定位算法的执行流程图,如图3所示。

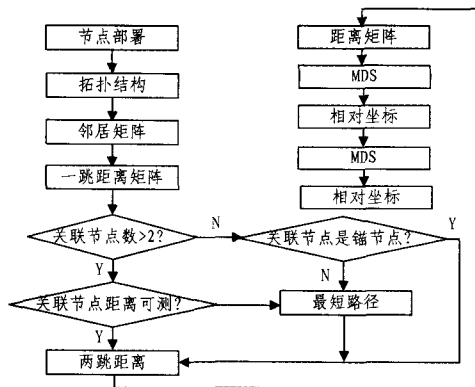


图3 SA_MDS算法流程图

3 算法性能分析与评价

为了有效评估SA_MDS算法的性能,本文通过仿真实验的方法将其与MDS算法进行比较分析。

3.1 仿真实验设计

为了更真实地反映算法在实际应用中的性能,实验在3种场景下进行,即正方形(Square)的随机(Random)部署场景(S_{Ra})、正方形(Square)的均匀(Regular)分布场景(S_{Re})和

C形随机部署场景(C_{Ra}),并在实验中引入两种无线传输模式:理想的(Perfect)无线传输模式和DOI无线传输模式^[10]。实验中具体的参数取值见表1。

表1 实验参数	
参数	设置
部署区域	$10r \times 10r$
节点通信半径 γ	$1.5r$
锚节点通信半径 γ	$1.5r$
无线传输模式不规则度DOI	$0 \sim 0.01$

3.2 仿真结果分析

图4和图5分别给出了节点在随机部署场景下的分布图和节点间的连接关系图。节点被随机部署在 500×500 的正方形区域内,图中红色星形点表示锚节点,蓝色点表示普通节点。图6显示执行SA_MDS定位算法后节点的定位误差,误差距离用红色的线段表示。为了更加直观形象地反映SA_MDS算法的性能,将SA_MDS算法的定位误差与MDS_MAP算法的定位误差进行了比较,如图7—图12所示。图7给出了理想传输模型下节点数量对定位精度的影响。从图中可以看出,SA_MDS算法与MDS_MAP算法的定位精度都随着节点数量的增加而增加,但无论是在节点数量低的情况还是在节点数量高的情况下,SA_MDS算法的定位精度都优于MDS_MAP算法的定位精度。这是由于随着节点数量的增多,一跳邻居节点也增多,可以直接测量的距离增多,从而定位精度得到提高。在SA_MDS算法中,节点的两跳距离是通过一跳节点的距离计算出来的,而在MDS_MAP算法中,节点的两跳距离是由最短路径距离代替的,故SA_MDS算法的定位精度要优于MDS_MAP算法的定位精度。图8显示了理想传输模型下锚节点数量对定位精度的影响。从仿真结果可以看出,随着锚节点数量的增加,两种算法的定位误差都在减小。当锚节点数量到达一定值后,定位精度不再随着锚节点数量的增加而增加。从仿真结果还可以看出,在锚节点数量相同的情况下,SA_MDS算法的定位精度要高于MDS_MAP算法的定位精度。图9显示了节点在不同位置时两种定位算法定位性能的比较。仿真节点数是200个,其中包含15个锚节点,节点在 500×500 的正方形区域内随机撒播了10次,即节点的连接关系发生变化。仿真结果表明,在节点数和锚节点数都相同的场景下,SA_MDS算法的定位精度都要高于MDS_MAP算法的定位精度,而且SA_MDS算法定位精度的波动更小,算法更稳定。

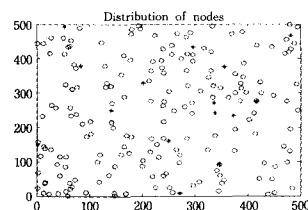


图4 节点部署图(S_{Ra})

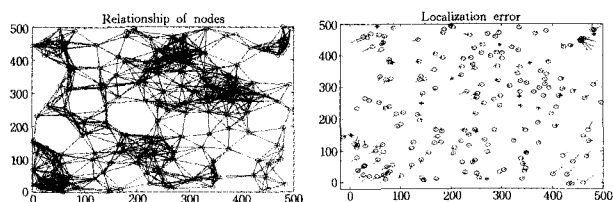


图5 节点连接关系图(S_{Ra} , Perfect Model) 图6 节点定位误差图(S_{Ra} , Perfect Model)

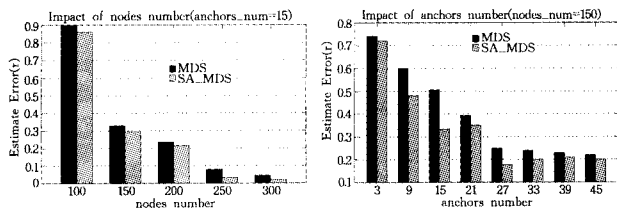


图7 节点数对定位精度的影响 (S_Ra, Perfect Model) 图8 锚节点数对定位精度的影响 (S_Ra, Perfect Model)

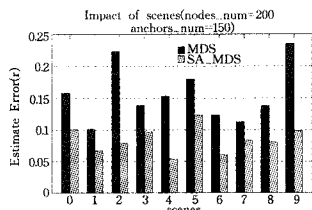


图9 不同位置关系下定位精度的比较 (S_Ra, Perfect Model)

图10和图11显示了DOI模型下节点数量和锚节点数量对定位精度的影响。仿真结果与理想传输模型下的仿真结果相似,在相同节点数量或者相同锚节点数量的情况下,SA_MDS算法的定位误差都要比MDS_MAP算法的定位误差低。图12给出了不同DOI对定位精度的影响。从图中可以看出,在DOI值相同的情况下,SA_MDS算法能够提供更加精确的定位服务,而且SA_MDS算法的误差变化比MDS_MAP算法的误差变化平缓。这是因为DOI的存在导致节点通信区域不是理想的圆形区域,节点间的最短路径与真实距离的差值更具有随机性,使得误差变化的随机性增加。

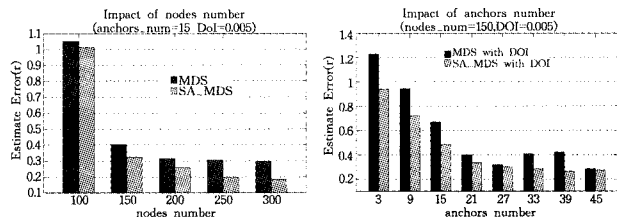


图10 节点数对定位精度的影响 (S_Ra, DOI Model) 图11 锚节点数对定位精度的影响 (S_Ra, DOI Model)

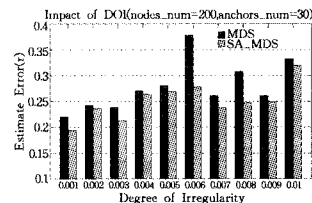
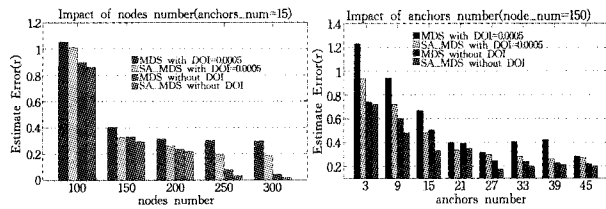


图12 DOI对定位精度的影响 (S_Ra, DOI Model)

图13给出了不同无线传输模式下节点数量和锚节点数量对定位精度的影响情况。从仿真结果可以看出DOI模型和理想传输模型下定位误差的差异,无论是SA_MDS算法还是MDS_MAP算法,算法在理想传输模型下的定位精度都要高于DOI模型下的定位精度。图13还表明,随着锚节点数增加、节点总数增加,算法的定位精度在提高;在相同节点数或者锚节点数的情况下,SA_MDS算法的定位误差都要比MDS算法的定位误差小。



(a)节点数对定位精度的影响 (b)锚节点数对定位精度的影响

图13 随机部署DOI模型和理想模型定位精度的比较

图14显示了均匀部署场景下节点间的连接图。节点被均匀地部署在 500×500 的正方形区域内,红色星形点表示锚节点,蓝色点表示普通节点。图15显示执行SA_MDS定位算法后节点的定位误差,误差距离用红色的线段表示。观察图6和图15可以直观地看出,SA_MDS算法在均匀部署场景下的定位精度要远高于随机部署场景下的定位精度。图16给出了均匀场景下锚节点数量对定位精度的影响。由于节点是均匀部署的,因此两跳节点间的距离可以应用SA_MDS算法得到,相比于用最短路径代替两跳节点间的实际距离,这可以大大提高节点的定位精度。从仿真结果图上也可以看出,SA_MDS算法的定位精度约为MDS_MAP算法定位精度的两倍。比较图8、图11、图16可以看出,在均匀部署场景中,算法对锚节点的依赖程度要远小于随机部署场景下算法对锚节点的依赖程度。

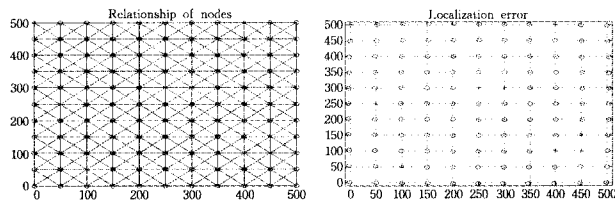


图14 节点连接关系图 (S_Re, Perfect Model) 图15 节点定位误差图 (S_Re, Perfect Model)

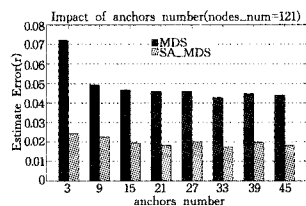


图16 锚节点数对定位精度的影响 (S_Re, Perfect Model)

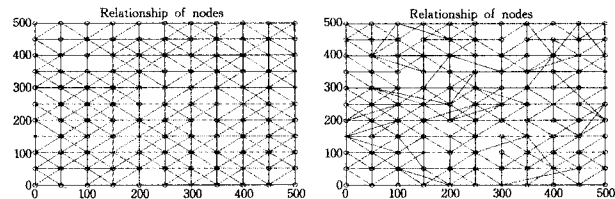


图17 DOI=0.005时节点连接关系图 (S_Re, DOI Model) 图18 DOI=0.01时节点连接关系图 (S_Re, DOI Model)

图17和图18分别给出了节点在不同DOI下的连接关系图。连接关系图直观地反映了随着DOI的增加,节点间的连接关系也越来越复杂。这是因为DOI的值越大,节点通信距离的变化范围就越大,进而导致节点的连接关系也就越复

(下转第47页)

- less Networks[J]. Communications of the ACM, 2004, 47(6): 41-46
- [7] Perrig A, Stankovic J, Wagner D. Security in Wireless Sensor Networks[J]. Communications of the ACM, 2004, 47(6): 53-57
- [8] Cunningham P, Carney J. Stability problem with artificial neural networks and the ensemble solution[J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2000, 20(3): 217-225
- [9] 李全亮. 基于改进的 BP 神经网络在我国税收预测中的应用[J]. 企业经济, 2008(7)

- [10] Nielsen M, Lund O. An artificial neural network-based alignment algorithm for MHC class II peptide binding prediction[J]. BMC Bioinformatics, 2009, 10: 296
- [11] Lin Y H, Shie J R, Tsai C H. Using an artificial neural network prediction model to optimize work-in-process inventory level for wafer fabrication[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36: 3421-3427

(上接第 43 页)

杂。图 19 和图 20 分别显示了在均匀部署场景 DOI 传输模型下锚节点数量和 DOI 对定位精度的影响。仿真结果表明, DOI 的存在导致两种算法的定位精度都有所波动, 但大多数情况下, SA_MDS 算法的定位精度都要高于 MDS_MAP 算法的定位精度。

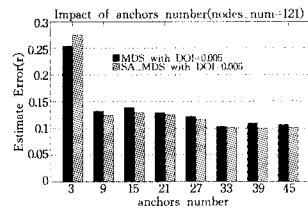


图 19 锚节点数对定位精度的影响(S_Re, DOI Model)

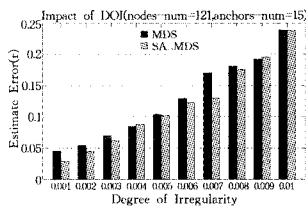


图 20 DOI 对定位精度的影响(S_Re, DOI Model)

为了更充分反映 SA_MDS 算法的性能, 在 C 形随机部署场景下也做了仿真实验。图 21 示出了节点在 C 形区域内的连接关系。图 22 显示了 C 形网络下节点数量对定位精度的影响。从图中可以看出, 在相同条件下, SA_MDS 算法的定位精度要高于 MDS_MAP 算法的定位精度。图 23 反映了 C 形网络下锚节点数量对定位精度的影响。仿真结果表明, 在相同锚节点数的情况下, 相比于 MDS_MAP 算法, SA_MDS 算法能够提供更加精确的定位服务。

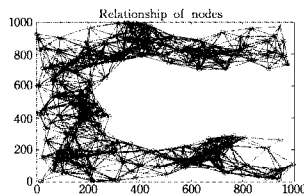


图 21 节点连接关系图(C_Ra, Perfect Model)

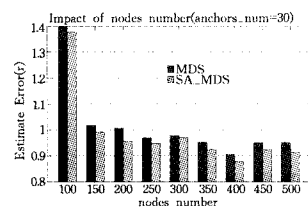


图 22 节点数对定位精度的影响(C_Ra, Perfect Model)

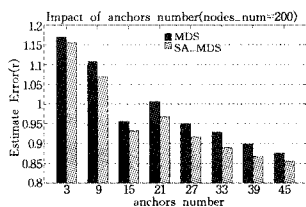


图 23 锚节点数对定位精度的影响(C_Ra, Perfect Model)

结束语 节点定位技术是 WSNs 中关键的支撑技术之一。本文用数学方法对 MDS_MAP 定位算法进行了改进, 提出了距离自调整的多维定标节点定位算法(SA_MDS)。SA_

MDS 算法根据节点的连接情况, 对节点的两跳距离运用 3 种方法估算, 然后自动调整节点间的估算距离进行定位。仿真实验结果证明, SA_MDS 算法能够适应 WSNs 的特点, 在 3 种部署场景、两种无线传输模式下, SA_MDS 算法比 MDS_MAP 算法能够提供更加精确的定位服务。在获得相同定位精度的要求下, SA_MDS 算法需要的节点数量、锚节点数量都要比 MDS_MAP 算法需要的节点数量少, 这样可以降低网络部署所需要的成本。下一步的工作是研究网络模型及其动态特性对算法的影响, 以便在更加真实的网络环境中取得较好的定位效果。

参考文献

- [1] Datta S, Klinowski C, Rudafshani M, et al. Distributed localization in static and mobile sensor networks[C]// Proceedings of IEEE WiMob. Montreal, Que, 2006: 69-76
- [2] 王福豹, 史龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J]. 软件学报, 2005, 16(5): 857-868
- [3] Chiang S-Y, Wang Jin-long. Localization in Wireless Sensor Networks by Fuzzy Logic System[C]// Proceedings of the 13th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems. Berlin, Heidelberg, 2009: 721-728
- [4] Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AoA[C]// Proceedings of IEEE INFOCOM. San Francisco, California, USA, 2003: 1734-1743
- [5] He T, Huang C, Blum B M, et al. Range-free localization schemes for large scale sensor networks[C]// Proceedings of ACM MobiCom. San Diego, California, USA, 2003: 81-95
- [6] Shang Yi, Ruml W, Zhang Ying. Localization from Mere Connectivity[C]// Proceedings of ACM MobiHoc. Annapolis, Maryland, USA, 2003: 201-212
- [7] Navas J C, Imielinski T. Geographic Addressing and Routing[C]// Proceeding of ACM MobiCom. Budapest, Hungary, 1997: 66-76
- [8] Shang Yi, Ruml W. Improved MDS-based Localization[C]// Proceeding of IEEE INFOCOM. Hong Kong, China, 2004: 2640-2651
- [9] Wu Chang-hua, Sheng W, Zhang Y. Mobile Sensor Networks Self Localization Based on Multi-dimensional Scaling[C]// Proceedings of ICRA. Roma, Italy, 2007: 4038-4043
- [10] Zhou Gang, He Tian, Krishnamurthy S, et al. Models and Solutions for Radio Irregularity in Wireless Sensor Networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2006, 2(2): 221-262