

基于 RSSI 的无线传感器网络迭代安全定位算法*

罗 臻, 刘宏立, 徐 琨

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 分析了无线传感器网络节点定位过程中的安全性问题, 针对接收信号强度指示 (RSSI) 测距技术, 提出了一种结合梯度下降法和离群检测技术的安全定位算法。仿真和实验结果表明: 使用该算法的无线传感器节点在存在攻击的环境下依然能够正常定位, 当平均测距误差为 0.7 m 时, 定位误差为 1 m。

关键词: 无线传感器网络; 算法; 安全定位; 接收信号强度指示; 梯度下降法; 离群检测

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2015)01-0116-04

RSSI-based iteration secure localization algorithm for WSNs*

LUO Zhen, LIU Hong-li, XU Kun

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Analyze security problem in localization process of wireless sensor networks (WSNs) node, present a secure localization algorithm which combines gradient descent method and outlier detection technology based on RSSI ranging technology. Simulation and experimental results both show that wireless sensor nodes which use this algorithm can still locate normally in the presence of attack, and the localization error is about 1m when the average ranging error is 0.7 m.

Key words: wireless sensor networks (WSNs); algorithm; secure localization; RSSI; gradient descent method; outlier detection

0 引 言

无线传感器网络 (WSNs) 广泛应用于环境监测、军事监视等领域^[1], 但大多数应用中, 无线传感器网络被部署在无人值守甚至恶意危险环境中, 在这样的条件下, 必须考虑网络的安全性问题, 以确保网络的正常运行。

传感器节点的位置对于大多数无线传感器网络是十分重要的^[2]。当无线传感器网络被部署在恶意危险的环境中时, 攻击者可能通过干扰信号或俘获一些锚节点来对定位过程进行攻击, 使得其他节点不能准确地估计它们的位置。不正确的位置可能会导致严重的后果, 因此, 确保传感器位置的正确性是很重要的。所以, 在考虑定位精度的同时, 也需要考虑定位过程的安全性。近年来, 研究者已经提出了很多安全定位算法, 如基于位置验证的安全定位、ESLS、基于稳健性计算的安全定位等^[3-11]。

基于接收信号强度指示 (RSSI) 的定位方法, 由于不需要额外的硬件资源, 是无线传感器网络中最可行的方法之一^[12]。但是现有的方法大多假设传感器网络被部署在非攻击的环境中, 而且对算法的评估仍停留在仿真的层面上,

没有考虑算法应用的实际环境, 无法验证算法的实际可行性。德州仪器公司设计的基于 Zig Bee 的 CC2430 无线收发芯片, 提供了基于 RSSI 的定位引擎, 单个芯片的通信半径达到 30 ~ 35 m。本文设计了基于 RSSI 的安全定位算法, 并采用 CC2430 无线节点硬件平台进行了大量的实验, 通过对实验数据的分析验证了算法的可行性。

1 问题描述

在描述安全定位过程之前首先描述无线传感器网络的定位过程。传感器网络通常包含有两种类型的节点: 普通节点和信标节点 (锚节点)。普通节点不知道自己的位置, 而锚节点知道自己的位置, 那么, 定位过程就是要估算普通节点的位置。这样的过程可以分为两个步骤, 如图 1 所示。

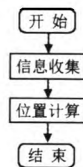


图 1 定位流程图

Fig 1 Localization process

收稿日期: 2014-05-14

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61172089); 湖南省科技厅资助项目 (2012FJ4119)

1)信息收集:收集定位信息,其中可以包括网络连通性、节点之间的距离和角度、锚节点的位置以及普通节点的初步估计位置等。相邻节点之间的距离可以通过 RSSI、到达时间(TOA)或者到达时间差(TDOA)来测量;多跳节点之间的距离可以通过 DV-Hop 或者 DV-Distance 来测量;角度可以通过到达角(AOA)来测量。

2)位置计算:普通节点的位置通过收集到的信息计算出来。简单的定位算法包括三边定位法、多边定位法以及三角定位法等。更复杂的定位算法有 MDS-MAP 算法、LMS 算法、投票算法等。

安全定位的提出是为了解决当前定位系统的不安全性和脆弱性。大多数当前的定位系统都明确或隐性地假定网络被部署在可信的环境中,在这样的环境下,普通节点可以获得正确的距离或其他信息。然而,在现实中,环境中的攻击者可能会有意妨碍定位过程。攻击者可能会俘获一些锚节点,也可能会拦截、干扰、修改或重放数据包,这样,未知节点估计的位置将严重偏离真实位置。安全定位就是为了解决这些漏洞,使定位过程在存在攻击的条件下也能正常进行。

2 基于 RSSI 的安全定位方法

在实验中使用的定位方法为梯度下降法,并结合离群检测技术来滤除具有攻击性的 RSSI 数据^[13]。

2.1 梯度下降法

通过锚节点的位置来估计未知节点的位置,数学上就是计算一组方程的解。最简单的定位算法是如图 2 所示的三边定位法。

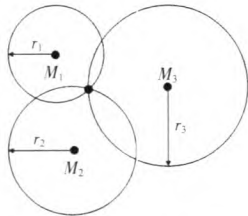


图 2 三边定位法示意图

Fig 2 Diagram of trilateration method

如果锚节点数量继续增多,三边定位法就演变成多边定位法,给定多个已知锚节点的位置 $M_i=(x_i,y_i)$,未知节点的位置 $P=(u_x,u_y)$ 可以通过求解下面的方程组获得

$$(u_x-x_i)^2+(u_y-y_i)^2=r_i^2,i=1,2,\cdots,n. \tag{1}$$

此方程组是关于节点位置 (u_x,u_y) 的超定方程组,其最小二乘解可以通过梯度下降法迭代求得,设

$$f(u_x,u_y)=\sum_{i=1}^n(\sqrt{(u_x-x_i)^2+(u_y-y_i)^2}-r_i)^2. \tag{2}$$

求其梯度,得

$$g(k)=-\nabla(f(u_x,u_y))|_{u_x=\hat{u}_x(k-1),u_y=\hat{u}_y(k-1)}$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^n(|M_i-\hat{P}(k-1)|-r_i)\frac{M_i-\hat{P}(k-1)}{|M_i-\hat{P}(k-1)|} \\ &= \sum_{i=1}^n g_i(k). \end{aligned} \tag{3}$$

那么,节点位置的估计值 $\hat{P}=(\hat{u}_x,\hat{u}_y)$ 由下式求得

$$\hat{P}(k)=\hat{P}(k-1)+\gamma(k)\frac{g(k)}{|g(k)|}. \tag{4}$$

其中, $\gamma(k)$ 为第 k 次迭代的步长。

2.2 离群检测

为了模拟存在攻击的环境,刻意在某些节点之间设置具有吸收功能的障碍物,以此削弱信号强度,此时未知节点接收到的 RSSI 值比真实的 RSSI 值要小。如果在定位过程中,未知节点依然使用这些具有攻击性的 RSSI 数据,那么,定位结果将会偏离节点的真实位置,使得定位误差明显增大。为了节点能够滤除这些具有攻击性的 RSSI 数据,本文对上面提出的梯度下降法进行了研究和分析,发现在式(3)中,梯度 $g(k)$ 由 n 个分量 $g_i(k)$ 相加而成,这里的 n 刚好是锚节点的数量,所以,不难想象每个锚节点发送的信息对应一个分量 $g_i(k)$,总的梯度 $g(k)$ 就是由 n 个锚节点发送的信息共同组成。进一步观察发现,随着迭代次数的增加,恶意锚节点所发送信息(即具有攻击性的 RSSI 数据)产生的 $g_i(k)$ 分量模值比正常锚节点所发送信息产生的分量模值明显偏大,利用这一点就可以滤除掉具有攻击性的 RSSI 数据。

3 算法仿真与实验

实验中,10 个锚节点如图 3 所示放置。分析了在 5 个不同位置(A~E)的实验结果,并与仿真结果作了比较。未知节点从每个锚节点获取 100 个 RSSI 数据,其中,锚节点 5,7,8 为恶意锚节点。

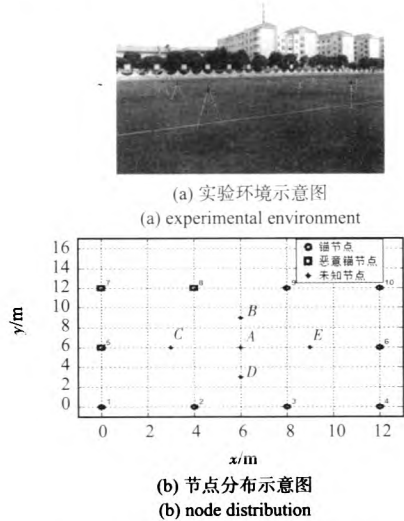


图 3 实验环境与节点分布示意图

Fig 3 Diagram of experimental environment and nodes distribution

表 1 列出了节点 A 到所有锚节点的真实距离和测量距

离,其中斜线加粗部分为对恶意锚节点的测量结果,从表中可明显看出:对正常锚节点的测量结果在误差允许范围内,而对恶意锚节点的测量结果误差很大。

表 1 节点 A 测距结果
Tab 1 Ranging results of node A

锚节点	实际距离(m)	测量距离(m)	测量误差(m)
1	8.5	7.4	1.1
2	6.3	6.0	0.3
3	6.3	5.3	1.0
4	8.5	7.5	1.0
5	6.0	18.8	12.8
6	6.0	5.2	0.8
7	8.5	14.9	6.4
8	6.3	27.1	20.8
9	6.3	6.6	0.3
10	8.5	7.6	0.9

收集完距离信息以后,使用梯度下降法并结合离群检测技术来估计节点 A 的位置,并与仿真结果比较。仿真中,测量噪声是均值为 0,方差为 1 的高斯噪声,攻击模型采用文献[13]中的独立攻击模型。仿真结果为 500 次实验的平均值。

图 4 示出了节点 A 的定位结果。从图中可以看到:测量得到的位置和仿真结果都分布在真实位置的周围,且误差基本一致。同时,用传统的多边定位算法对节点 A 进行了定位,由于存在恶意锚节点的影响,定位结果与真实位置相距甚远,已无法在图中标示出来。由于节点 A 位于坐标中央,具有一定的特殊性,接下来,对节点 B、C、D、E 作了同样的实验。

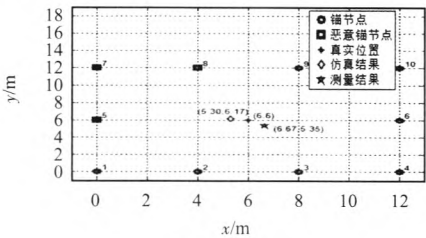


图 4 节点 A 定位结果
Fig 4 Positioning result of node A

表 2 和图 5 分别示出了节点 B 的测距结果和定位结果。可以看到,节点 B 的平均测距误差比节点 A 的平均测距误差大 0.2 m 左右,定位误差比节点 A 大 0.5 m 左右,测量得到的位置和仿真结果基本一致。

表 3 示出了节点 C 的测距结果,其定位结果如图 6 所示。从图 4~图 6 中可以看出:在基于 RSSI 测距技术的条件下,梯度下降法结合离群检测技术可以很好地滤除恶意锚节点的影响,从而对未知节点进行准确定位。在平均测距误差为 0.7 m 时,定位误差大概为 1 m。而传统的多边定

表 2 节点 B 测距结果
Tab 2 Ranging results of node B

锚节点	实际距离(m)	测量距离(m)	测量误差(m)
1	10.8	9.4	1.4
2	9.2	8.1	1.1
3	9.2	8.1	1.1
4	10.8	9.1	1.7
5	6.7	19.9	13.2
6	6.7	5.6	1.1
7	6.7	11.5	4.8
8	3.6	23.8	20.2
9	3.6	3.6	0.0
10	6.7	6.9	0.2

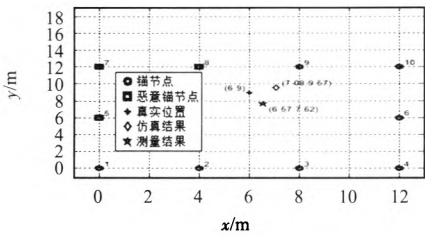


图 5 节点 B 定位结果

Fig 5 Positioning result of node B
位算法在存在恶意锚节点的情况下不能对未知节点进行准确定位。节点 D 和节点 E 的情况类似于节点 B 和节点 C,由于篇幅受限,这里不再列出其测距结果和定位结果。

表 3 节点 C 测距结果
Tab 3 Ranging results of node C

锚节点	实际距离(m)	测量距离(m)	测量误差(m)
1	6.7	5.1	1.6
2	6.1	5.7	0.4
3	7.8	7.4	0.4
4	10.8	9.7	1.1
5	3.0	11.2	8.2
6	9.0	8.1	0.9
7	6.7	18.3	11.6
8	6.1	12.5	6.4
9	7.8	6.6	1.2
10	10.8	12.2	1.4

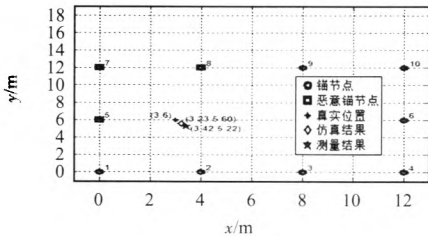


图 6 节点 C 定位结果

Fig 6 Positioning result of node C

4 结束语

针对 RSSI 测距技术,本文提出了一种梯度下降法结合

离群检测技术的安全定位算法,然后使用基于 Zig Bee 的 CC2430 射频芯片对该算法进行了实验测试并与仿真结果作了比较。对实验数据的研究分析表明:该算法在存在恶意锚节点的实际环境中,依然能对未知节点进行准确定位,当平均测距误差为 0.7 m 时,定位误差为 1 m 左右。

参考文献:

- [1] Dong B, Mahdy A M. Underwater wireless sensor networks: Efficient schemes using semidefinite programming[J]. International Journal on Advances in Networks and Services, 2010, 3(1): 186-195.
- [2] Adel G A E, Hussein A E, Salwa E R, et al. An energy aware WSNs geographic routing protocol[J]. Universal Journal of Computer Science and Engineering Technology, 2010, 1(2): 105-111.
- [3] He D, Cui L, Huang H, et al. Design and verification of enhanced secure localization scheme in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(7): 1050-1058.
- [4] Jian L, Yang Z, Liu Y. Beyond triangle inequality: Sifting noisy and outlier distance measurements for localization[C]// IEEE Proceedings of INFOCOM, 2010: 1-9.
- [5] Misra S, Xue G, Bhardwaj S. Secure and robust localization in a wireless Ad Hoc environment[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(3): 1480-1489.

(上接第 109 页)

圈单元中心距的增大,传感器对相邻裂纹缺陷的分辨能力越强,空间分辨率越来越高。

依据以上分析,基于线圈单元间互感设计的阵列涡流传感器以空间分辨率为主要参考指标的优化原则如下:线圈外半径不宜过小;线圈单元内半径、轴向厚度尽量选在最大空间分辨率处;线圈单元的提离距离尽量小些,有利于提高传感器的空间分辨率;线圈单元中心距不宜过大,过大会导致互感作用过小,难以提取裂纹缺陷的有效信息。

3 结 论

本文通过 ANSYS 有限元仿真模拟了线圈单元相关参数对基于线圈单元间互感设计的阵列涡流传感器检测灵敏度和空间分辨率的影响,在此基础上提出了优化设计原则,从理论上对其优化设计进行了阐述,为其实际应用提供了参考,并得出如下结论:

1) 基于线圈单元间互感的阵列涡流传感器设计时,不能同时满足检测灵敏度和空间分辨率的最大要求,要择其一为主要参考指标,另一指标为辅助参考指标。

2) 阵列涡流传感器设计时要兼顾检测灵敏度和空间分辨率,线圈单元外半径选择要适宜,不能过大或过小;线圈单元内半径要在最大检测灵敏度和最高分辨率处优化取值;线圈单元轴向厚度选取在最高空间分辨率,同时检测灵

- [6] Zeng Y, Cao J, Hong J, et al. Secure localization and location verification in wireless sensor networks: A survey[J]. The Journal of Supercomputing, 2013, 64(3): 685-701.
- [7] Zeng Y, Cao J, Hong J, et al. SecMCL: A secure Monte Carlo localization algorithm for mobile sensor networks[C]// IEEE 6th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, 2009: 1054-1059.
- [8] Zeng Y, Cao J, Zhang S, et al. Pollution attack: A new attack against localization in wireless sensor networks[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2009: 1-6.
- [9] 叶阿勇,许 力,林 晖. 基于 RSSI 的传感器网络节点安全定位机制[J]. 通信学报, 2012, 33(7): 135-142.
- [10] 张广峰,段其昌,刘 政. 基于加强学习与联想记忆粒子群优化算法的节点定位[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(3): 72-77.
- [11] 胡中栋,贾方方. 基于角度判断的无线传感器网络 APIT 定位算法研究[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(1): 73-75.
- [12] Amitangshu P. Localization algorithm in wireless sensor networks: Current approaches and future challenges[J]. Network Protocol and Algorithm, 2010, 2(1): 45-74.
- [13] 罗 臻,刘宏立,徐 琨. 一种容忍恶意锚节点独立攻击的安全定位算法[J]. 传感技术学报, 2013, 26(12): 1724-1727.

作者简介:

罗 臻(1989-),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络。

敏度不能过小;实际制作条件线圈单元尽量贴近被检工件和线圈单元中心距要根据主要指标选取。

参考文献:

- [1] 丁天怀,陈祥林. 电涡流传感器阵列测试技术[J]. 测试技术学报, 2006, 20(1): 1-2.
- [2] 赵 磊. 阵列涡流无损检测技术的研究及进展[J]. 无损探伤, 2009, 33(2): 19-22.
- [3] Pelletier E, Grenier M, Chahbaz A, et al. Array eddy current for fatigue crack detection of aircraft skin structures[C]// Proc 5th International Workshop, Advances in Signal Processing for Non-Destructive Evaluation of Material, Quebec, 2005: 86-90.
- [4] 林俊明. 电磁无损检测技术的发展与新成果[J]. 工程与试验, 2011, 50(4): 1-2.
- [5] 刘 波. 涡流阵列无损检测中裂纹参数估计和成像方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011: 8-9.
- [6] 徐可北. 涡流阵列检测技术[J]. 冶金分析, 2004(2): 645-647.
- [7] 何永勃,邵雨果. 基于阵列涡流技术的裂纹特征量研究[J]. 中国民航大学学报, 2010, 29(2): 80-81.
- [8] 刘 波,罗飞路,侯良洁. 平板表层缺陷检测涡流阵列传感器的设计[J]. 传感技术学报, 2011, 24(5): 680-681.

作者简介:

刘少伟(1988-),男,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向为过程装备电涡流无损检测。