

基于梯度的受限空间安全定位方法

王宁 秦小麟 沈尧

(南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 210016)

摘要 现有的无线传感器网络定位技术消耗了大量的计算和处理资源,并且受到了环境因素以及对手攻击等干扰,在受限空间中定位精度较低,无法满足定位需求。为了提高受限空间中的定位精度,提出了一种基于梯度的安全定位算法,算法在双曲线定位模型基础上,引入梯度的概念,降低了算法的计算复杂度,使算法能够适应受限空间的环境要求,实现高效高精度的定位;为了提高算法的安全性,增加了对不一致性测量的选择性剪枝过程,增强了算法对恶意攻击的抵抗能力。最后,以室内走廊为实验环境进行了仿真验证,通过主频计时策略,提高了算法的定位精度。分析结果表明,在室内受限空间中,提出的算法在定位精度、能量消耗和抗干扰能力上优于现有算法。

关键词 双曲线定位模型,梯度,受限空间,安全定位

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Gradient Based Approach to Secure Localization Algorithm in Constrained Space

WANG Ning QIN Xiao-lin SHEN Yao

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract Existing wireless sensor network location technology can not satisfy the location demands, not only because it calls for a lot of calculation time and processing resources but also for it is interfered by environmental factors, attacks from other users and its positional accuracy is low. Therefore, in order to improve location accuracy in constrained space, a gradient-based security location algorithm was proposed in this paper, in which gradient is brought based on hyperbolic location model. This algorithm lowers the computational complexity so that it can satisfy the environmental demands of constrained space and achieve the high-accuracy localization. Meanwhile, to improve the security of the algorithm, the resistant ability was enhanced and the selective pruning process for inconsistency measuring was also adopted. We finally improved the location accuracy by using main frequency strategy according to the simulation results of indoor corridor experiments. And the results show that the proposed algorithm has higher performances not only on localization accuracy and energy consumption but also on anti-interference ability than the existing one.

Keywords Hyperbolic location model, Gradient, Constrained space, Secure localization

1 引言

随着感知技术在国防军事、环境监测、医疗服务、交通控制等领域^[1-4]的不断发展,无线传感器网络技术已成为当前信息技术领域的一个研究热点,而无线传感器网络中的节点定位问题尤为受到关注,因为它与实际的很多应用直接相关。节点的准确定位不仅能够提供检测事件或目标位置信息,也是传感网路由拓扑、覆盖、部署的基础。

无线传感器网络定位技术已被应用于各类场景,如森林火灾检测^[5]、交通路况检测、军事战场上未知节点检测等,对于室外非受限空间的定位技术已经相对成熟,多以基于传感器节点无线电信号测量的定位技术为主,以相应的测距算法为辅进行定位测量。而对像室内环境、煤矿行道等受限空间,存在非视距、多径、干扰多变等因素^[6],再加上传感器本身能

量受限、计算能力差等因素,像GPS等用于室外的定位技术不能直接用于室内,而对于重要文件的定位、走廊行道中移动对象的定位等问题越来越受到人们关注,这使得研究和关注室内定位技术变得尤为重要。

现有的无线传感器网络中的定位算法多针对室外非受限空间,对室内走廊、煤矿行道等受限空间来说,并不能直接使用这些算法,尤其是对于行道等特殊场景,传感器节点的拓扑结构并非传统网络模型中的网状结构,而是呈线状结构,因此,现有的定位算法并不能直接用于受限空间。目前在受限空间场景下定位的相关研究多采用RSSI渐变模型^[7]或RFID、红外等技术^[8],也有采用多种手段相结合的方法,但是由于受到室内环境以及障碍物等的限制,再加上极易受到网络环境中攻击者的干扰,这些算法的定位精度较低,并不能很好地实现定位效果。因此需要提出一种能耗低、定位精度高、

到稿日期:2013-03-26 返修日期:2013-06-15 本文受2010年度国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20103218110017),江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)资助。

王宁(1987-),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络技术, E-mail: nuaasdwangning@163.com; 秦小麟(1953-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为分布式环境的数据管理与安全; 沈尧(1986-),男,博士生,主要研究方向为云计算。

安全性强的适用于受限空间的定位算法。

针对上述问题,本文提出一种基于梯度的受限空间安全定位方法。算法具有较高的灵活性,能够较好地应用于受限空间中的线状网络拓扑;基于双曲线定位模型^[9]和梯度模型,只需要少量的锚节点辅助,即可实现高精度定位,并且算法的计算效率高,对资源的耗费少;算法的不一致性测量剪枝过程,可以抵抗恶意节点攻击,提升算法的安全性能。在实验中,针对现有传感器节点计时模块的缺点,提出采用节点主频计时的策略,将传感器节点计时精度由毫秒级提升至微秒甚至纳秒级,进一步提升算法精度。最后给出算法在定位精度和安全性等方面的实验分析。

2 相关工作

无线传感器网络中,确定节点或监测事件发生的位置,对传感器网络实施其感知监测活动至关重要,现有的无线传感器网络中的定位技术主要分为两类:基于测距的定位和无需测距的定位技术^[10,11]。

基于测距的定位技术有 RSSI、TOA、TDoA、AOA 等,这些方法的特点是对传感器节点有较高的要求,并易受温湿度、障碍物等实际环境的影响。RSSI 测距法^[12]是根据无线传感器节点发射以及接收信号的强度,计算出信号的传播损耗,利用无线电自由空间衰减模型将传输损耗转化为距离进行定位。TOA 方法^[13]通过获得信标信号的到达时间进行测距,但需要发射节点和接收节点满足时间同步,一个小的同步误差都会造成较大的定位误差。TDoA 方法^[14]采用超声波和电磁波协同进行定位,可以抵消部分由于接收节点和发射节点共同原因造成的误差,但是超声波易受温湿度、气压、障碍物等因素影响,并且需要兼顾发射器和接收器的方向性问题,所以误差较大。对于 AOA 方法^[15]来说,接收节点通过天线阵列或多个超声波接收机感知发射节点信号的到达方向,计算相对方位或角度,需要安装昂贵的接收设备,硬件要求较高,测角误差也较大。

无需测距的技术利用网络连通性等信息估算节点间的位置关系,能耗较低,应用较多的算法有 Centroid 算法、APIT 算法、DV-Hop 算法、SLA 算法等。质心算法(Centroid)^[16]对锚节点相关信息所构成的封闭多边形求质心,得到节点位置,该方法基于节点的连接性,应用较广。APIT 算法^[17]则是定位节点从所有能够与之通信的锚节点中选择任意 3 个节点,判断自身是否在这 3 个锚节点所组成的三角形内部,再求所有包含定位节点三角形的相交区域的质心作为自己的估计位置。DV-Hop 算法^[18]使用距离向量交换协议,使网络中所有节点获得距锚节点的跳数,并根据各个锚节点的位置信息计算网络中平均每跳的距离,定位节点接收到平均每跳距离后,根据跳数或加权值^[19]计算与锚节点之间的距离,再利用三边测量法或极大似然估计法得到节点坐标。SLA 算法^[20]通过锚节点不断地改变自身量级感知定位节点,不同量级对应不同的感知范围,一旦锚节点感知到定位节点,即将自身坐标和量级对应的距离发送给定位节点,定位节点根据多组坐标和距离值确定位置。

由于无线传感器网络环境多变,攻击者很容易进行攻击,干扰定位,因此,也有很多安全定位方案被提出。Du 等人提出的 LAD 方案^[21]利用事先获知网络节点的分布信息,检测

节点的估计位置是否与它的观测位置一致,如果不一致的几率超过阈值,则报告异常。但是该方案仅停留在对异常的检测阶段,而没有给出如何处理异常,以及在发现异常之后如何提高定位正确性。D. Liu 等提出的基于投票的机制^[22]将感知区域分成若干等大小的方形,然后由锚节点确定一个环形候选区,对每个方形区域扫描一次,统计候选区的覆盖情况,取覆盖率最高的方形组成区域的质心,作为定位节点的位置,这一方法需要对整个区域进行多次扫描,耗费较大,但安全性较高,能够较好地排除恶意节点的干扰。

受到环境等因素的干扰,上述方法在受限空间中部署较为困难,并且定位精度较低,所以不能直接应用于室内受限空间。David Munoz 等提出了一种双曲线定位模型^[9],该方案在理论上提升了定位的精度,并有效地解决了传感器网络中的同步问题,但是,该方法通过计算电磁波的传送时间进行计时,在实际应用中会产生较大的误差。本文针对受限空间,以双曲线模型为基础,引入梯度模型,提出一种高效并且定位精确的无线传感器网络定位方法,该方法能够较好地部署在受限空间线状网络中,满足定位需求。

3 问题描述与符号、模型定义

为了方便问题描述,本文以室内走廊空间、煤矿行道等线状拓扑结构的场景为基础,研究线状受限空间中无线传感器网络的定位问题。下面对基于 LS 的位置估计模型和带有攻击的定位模型进行说明。

3.1 基于 LS 的位置估计

基于 LS 的位置估计方法是目前较为常用的定位模型,设有 N 个已知位置的锚节点被部署在已建立空间坐标系的场景中用于协助定位,则可以设一个节点的真实位置为 $P = [x_{\text{true}}, y_{\text{true}}, z_{\text{true}}]^T$,对应的第 i 个锚节点的位置定义为 $P_i = [x_i, y_i, z_i]^T$,每个定位节点与锚节点之间的估计距离为 d_i ,由于受温湿度等环境因素干扰, d_i 受信道中噪声的干扰。参考文献^[23],设噪声为服从于均值为 0、方差为 σ^2 的高斯噪声。对于给定的噪声,测量值集合 $\{(P_i, d_i)\}, i=1, 2, \dots, N$,可以通过解式(1)所示的最小二乘法超定方程来获得定位节点的估计位置 $\hat{P} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]^T$:

$$\|P_i - \hat{P}\| - d_i = 0, i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

3.2 带有攻击的定位模型

现有的针对节点定位的攻击,主要有两种攻击手段:独立的无协同攻击和多节点协同攻击。无协同攻击指攻击者捕获的各个节点之间独立干扰定位过程,各个攻击节点只能利用自身有限的通信和计算资源发起攻击;协同攻击指攻击者利用更多的资源,协同多个节点制造一个容易迷惑定位节点的假位置进行干扰。

(1)对于无协同攻击,攻击者假设是在每一个被捕获的节点上单独行动,通过扰乱发给定位节点的时间戳或者锚节点的位置信息,阻止定位节点精确地估计与锚节点之间的距离。由于修改任意一个参数都能够转化为对距离的影响,因此可以认为恶意节点修改的是 $\{(P_i, d_i)\}$ 中 d_i 的值。设恶意节点对距离的干扰服从独立均匀分布,则能够得到节点的估计位置,如式(2)所示:

$$d_i^{(x)} = \begin{cases} \text{disk}_i + u_i + n_i, & \text{if node } i \text{ is malicious} \\ \text{disk}_i + n_i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $disk_i = \|P_i - P\|$, 表示定位节点与锚节点之间的实际距离; u_i 为均值为 0、方差为 σ_{attack}^2 的均匀分布; $n_i \sim N(0, \sigma^2)$ 是服从于高斯分布的测量噪声。

对于定位节点来说, 可以通过与 N 个锚节点通信获得与各个锚节点之间的测量值 $\{(P_i, d_i^{(c)})\}, i=1, 2, \dots, N$ 来估计自身的位置。

(2) 对于协同攻击来说, 攻击者协同多个恶意节点, 以一个假位置 $P_{mal} = [x_{mal}, y_{mal}, z_{mal}]^T$ 迷惑定位节点, 使其将自身的位置估计为该假位置。在这种情况下, 定位节点得到的估计位置如式(3)所示:

$$d_i^{(c)} = \begin{cases} \|P_i - P_{mal}\| + n_i, & \text{if node } i \text{ is malicious} \\ disk_i + n_i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $disk_i$ 为定位节点与锚节点之间的实际距离; n_i 是服从于高斯分布的测量噪声。定位节点通过 $\{(P_i, d_i^{(c)})\}, i=1, 2, \dots, N$ 来估计自身的位置。协同攻击的强度主要受定位节点的真实位置和假位置之间的距离 $\|P_{mal} - P\|$ 的大小影响。

4 受限空间中的安全定位机制

为了准确地描述算法, 本节首先提出基于双曲线模型的受限空间定位算法(Hyperbolic-model based Localization Algorithm in Constrained Space, 简称 HLA-CS), 然后在该算法的基础上, 引入梯度模型和剪枝过程, 提出基于梯度的受限空间安全定位算法(Gradient based Approach to Secure Localization Algorithm in Constrained Space, 简称 GASLA-CS), 并对提出的两个算法进行说明和分析。

4.1 基于双曲线模型的受限空间定位算法

基于测距的方法通过测量锚节点发出的信标信号到达定位节点的时间来获取二者之间的距离, 这些方法均要求网络中各个节点保持时间同步, 而无线传感器网络的时间同步问题并没有完全解决, 一个小的同步误差就可能产生较大的空间定位误差^[24], 而双曲线模型较好地解决了时间同步问题, 可以用于基于测距的定位方案。下面简要地描述双曲线定位模型的原理。

如图 1 所示, 节点 1 和节点 2 为已知位置信息的锚节点, 用于辅助定位, 定位节点 P 为未知节点。节点 1 发布一个自身的位置坐标和时间戳给节点 2 和定位节点, 节点 2 收到来自节点 1 的消息后, 加上节点 2 自己的位置坐标后一起转发给定位节点, 这样, 定位节点就获得了一组来自于节点 1 和节点 2 的 TDoA 测量值。

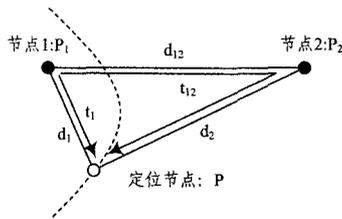


图 1 双曲线定位模型

上述过程中的转发延迟取决于节点的处理速度和路由协议, 是先验的。为了考虑可能的微小差异, 在这里假设该延迟围绕一个已知的均值分布。定位节点收到来自节点 1 和节点 2 的信号后, 减去延迟时间, 即求出到达时间的不同。

令节点 1、节点 2 和定位节点的位置分别为 P_1, P_2, P 。用 d_{12}, d_1, d_2 分别表示节点间的距离, 节点 1 发送其位置坐

标给节点 2 和定位节点的时间为 t_0 , 定位节点收到节点 1 消息的时间是 t_1 , 收到经节点 2 转发消息的时间为 t_{12} 。则有:

$$\begin{aligned} d_1 &= v(t_1 - t_0) \\ d_{12} + d_2 &= v(t_{12} - t_0) \Rightarrow d_2 - d_1 = v(t_{12} - t_1) - d_{12} \triangleq \Delta l_{12} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, v 是信号在媒介中的传播速度。由式(4)可以看出, 根据定位节点获得的到达时差 $t_{12} - t_1$, 可以确定定位节点位于以 P_1 和 P_2 为焦点的双曲线的一支上。对于实际场景, 如图 2 所示, 建立空间直角坐标系, 定位节点在以 P_1 和 P_2 为焦点的旋转双叶双曲面上。

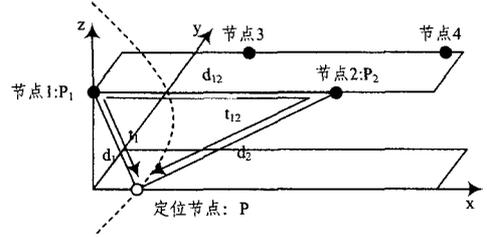


图 2 三维环境下的双曲面定位模型

为了获取位置信息, 定位节点可以获取多组锚节点的到达时差值, 求得对应的双曲面, 计算各个双曲面的交点, 即定位节点的位置。

以图 2 所示双曲线为例, 在三维空间中, 标准旋转双叶双曲面的方程为:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

对任意锚节点 i , 其与锚节点 1 为焦点所构成的双曲面方程为:

$$\frac{(x' - \Delta l)^2}{a^2} - \frac{y'^2}{b^2} - \frac{z'^2}{b^2} = 1 \quad (6)$$

式中, $\Delta l = \frac{1}{2} \|P_i - P_1\|, i=2, 3, \dots, N$ 。

设各锚节点与 x 轴均有一定的夹角, 所以, 结合式(7)的旋转矩阵:

$$\mathcal{R}_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

能够得到

$$\begin{aligned} [x' \ y' \ z']^T &= [x \ y \ z] \cdot \mathcal{R}_z(\theta_z) \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta_z \cdot x - \sin\theta_z \cdot y \\ \sin\theta_z \cdot x + \cos\theta_z \cdot y \\ z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\theta_z = \arctan \frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}, i=2, 3, \dots, N$ 。

根据定位节点获取的 TDoA 值, 可以求出双曲线的各项参数, 将参数以及上述旋转公式代入双曲面方程(6)可以得到最终的方程为:

$$\begin{cases} \frac{4(x' - \Delta l)^2}{[v(t_{12} - t_1) - d_{12}]^2} + \frac{4y'^2 + 4z'^2}{[v(t_{12} - t_1)]^2 - 2vd_{12}(t_{12} - t_1)} = 1 \\ [x' \ y' \ z']^T = [x \ y \ z] \cdot \mathcal{R}_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos\theta_z \cdot x - \sin\theta_z \cdot y \\ \sin\theta_z \cdot x + \cos\theta_z \cdot y \\ z \end{bmatrix} \\ \tan\theta_z = \frac{y_i - y_1}{x_i - x_1} \\ \Delta l = \frac{1}{2} \|P_i - P_1\|, i=2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (9)$$

利用多组锚节点协同定位, 联立相应的双曲面方程和定位节点所在的平面方程, 可以得到定位节点所在平面上一个封闭区域, 再通过质心算法求得封闭区域的质心坐标, 即可获得定位节点的坐标。

下面以室内走廊场景为例, 详细描述 HLA-LS 定位算法, 算法分为以下 4 步:

- (1) 主锚节点感知定位节点, 并广播消息;
- (2) 辅助锚节点转发消息;
- (3) 定位节点根据接收到的两类消息, 计算到达时差, 求解双曲面方程;
- (4) 投影, 求质心得到定位节点的位置坐标。

算法描述如算法 1 所示。

算法 1 基于双曲线模型的受限空间定位算法 HLA-CS

输入: 主锚节点 P_1 , 辅助锚节点 $P_i, i=2, 3, \dots, N$, 各个锚节点坐标已知

$P_i = [x_i, y_i, z_i]^T, i=1, 2, \dots, N$

输出: 定位节点位置坐标 $P = [x, y, z]$

1. while (sensor(P_1) = P) // 当主锚节点感知到定位节点时, 执行下列操作
2. broadcast (ID $_{P_1}, P_1, t_0$); // 广播消息给辅助锚节点和定位节点
3. for each $P_i (i=2, 3, \dots, N)$ received message from P_1 do
4. send (ID $_{P_i}, P_i, t_0$); // 转发消息给定位节点
5. end for
6. for each message from P_i received by P do
7. P calculate the hyperboloid equation;
8. Project the hyperboloid to the plane of the localizing node;
9. $P = [x, y, z] = \text{Centroid}(\cdot)$;
10. end for
11. end

算法第 2 行, 主锚节点感知到定位节点后即广播消息给辅助锚节点和定位节点, 消息包含该锚节点的位置信息以及发送消息的时间戳, 格式为(消息源节点, 源节点坐标, 始发节点坐标, 始发节点时间戳); 第 4 行描述的是算法的第(2)步, 即辅助锚节点收到主锚节点广播的消息后, 在消息中加上自己的位置坐标, 将消息转发给定位节点; 第 6—10 行是定位节点的处理过程, 定位节点收到相应的各个锚节点的信息后, 分别记录主锚节点发送的消息的到达时刻和经过各个辅助锚节点转发后的消息到达的时刻, 再利用各个锚节点的坐标信息, 根据式(9)计算双曲面方程; 第 8—9 行将各条双曲面方程投影至定位节点所在的平面, 并把计算多条双曲面投影后所得双曲线围城的封闭区域的质心作为定位节点的位置坐标。

对于不同的受限空间场景, 部署算法的复杂程度不同: 对于室内走廊或其他空旷的室内环境, 可通过多组双曲面与定位节点所在平面联立, 按照上面的方法获得定位节点坐标; 对于煤矿、考古行道等环境, y 方向(参照图 2 坐标系)距离可以忽略, 则可以将三维环境转化为二维, 联立多组双曲线, 即可计算得到定位节点的坐标。

上述算法中, 辅助锚节点的数量可以根据部署情况和精度要求灵活变动, 锚节点的多少对于定位的影响将在第 5 节讨论。

4.2 基于梯度下降的安全定位算法

利用算法 1 的方法, 参与定位的每对锚节点均生成一个双曲面方程, 定位节点需要进行大量运算, 消耗较多资源, 这

在资源受限的无线传感器网络中很难达到。除此之外, 对于不安全的网络环境, 时常发生攻击行为, 因此, 本节引入“梯度”的概念, 在算法 1 的基础上, 结合剪枝策略, 提出低能耗安全定位算法。

首先, 在没有攻击并且测量噪声为高斯噪声时, 定位节点 P 能够得到真实位置的可能性为:

$$\Pr(\{d_i\}_{i=1}^N | P, \{P_i\}_{i=1}^N) = L(\mu, \sigma^2) \quad (10)$$

将第 3 节描述的 LS 位置估计模型公式代入上式, 得到关于距离差的最小二乘法意义上的概率:

$$\begin{aligned} L(\mu, \sigma^2) &= \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \|P_i - P\| - d_i\right\} \\ &= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{N/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N (\|P_i - P\| - d_i)^2\right\} \end{aligned} \quad (11)$$

采用最大似然估计来获得真实位置的估计值 \hat{P} , 即根据信号的欧氏距离进行判断, 认为概率最大的情况下的位置就是定位节点的位置, 也就是说, 当式(10)中的概率最大时, 求得的位置即为定位节点的真实位置。根据式(10)、式(11), 要使概率最大, 则要最小化负指数部分, 如式(12)所示:

$$\begin{aligned} \hat{P} &= \arg \max_P \Pr(\{d_i\}_{i=1}^N | P, \{P_i\}_{i=1}^N) \\ &= \arg \min_P \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\|P_i - P\| - d_i)^2 \\ &= \arg \min_P f(P) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $f(P)$ 定义为耗费函数, 表示式(11)中的负指数。这里得到的最大似然估计值 \hat{P} 与式(1)中最小二乘法(LS)得到的估计值相同。

为了求得梯度, 对估计位置在空间各个方向上求全微分, 得到的就是耗费函数的梯度公式, 然后根据梯度的方向进行定位处理, $f(P)$ 越小, 定位精度越高, 所以估计位置应该沿着负梯度的方向更新。具体过程如下: 首先对定位节点进行初始化位置估计, 设其初始位置为 $\hat{P}(0)$ 。在第 k 步迭代中, 耗费函数 $f(P)$ 的梯度根据当前的估计位置 $\hat{P}(k-1)$ 确定, 然后沿着负梯度的方向更新新的估计位置。令 $g(k)$ 表示当前估计位置的耗费函数的负梯度:

$$g(k) = -\nabla_P (f(P)) |_{P=\hat{P}(k-1)} \quad (13)$$

式中, $\nabla_P(\cdot)$ 定义关于位置 P 的梯度。

然后根据式(14)沿着负梯度的方向移动一步, 得到新的估计值:

$$\hat{P}(k) = \hat{P}(k-1) + \delta(k) \times \frac{g(k)}{\|g(k)\|} \quad (14)$$

式中, $\delta(k)$ 是第 k 次迭代的步长; $\frac{g(k)}{\|g(k)\|}$ 是沿着负梯度方向的单位向量。

负梯度 $g(k)$ 是:

$$\begin{aligned} g(k) &= -\nabla_P (f(P)) |_{P=\hat{P}(k-1)} \\ &= -\nabla_P \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\|P_i - P\| - d_i)^2 \right) |_{P=\hat{P}(k-1)} \\ &= \sum_{i=1}^N (\|P_i - \hat{P}(k-1)\| - d_i) \times \frac{P_i - \hat{P}(k-1)}{\|P_i - \hat{P}(k-1)\|} \\ &= \sum_{i=1}^N g_i(k) \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $g_i(k)$ 定义为:

$$g_i(k) = (\|P_i - \hat{P}(k-1)\| - d_i) \times \frac{P_i - \hat{P}(k-1)}{\|P_i - \hat{P}(k-1)\|} \quad (16)$$

$g_i(k)$ 表示定位节点在第 i 个锚节点方向上的负梯度, 为了更直观地理解梯度, 将梯度组件 $g_i(k)$ 想象成一个力矢量, 如图 3 所示, 图中单向虚线箭头表示梯度, 方向为连接当前估计位置 $\hat{P}(k-1)$ 和锚节点 P_i 的位置, 量级大小为以锚节点为圆心、 d_i 为半径的圆与当前估计位置之间的距离。将所有 N 个 $g_i(k)$ 矢量求和后可以得出整体的梯度。

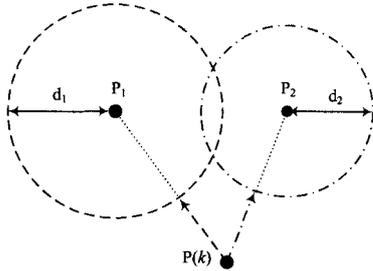


图 3 梯度的矢量表示

将上述位置估计过程与算法 1 结合, 就能够使用梯度的概念来降低算法 1 的复杂度, 并提升算法的安全性。为了简化描述过程, 仍令锚节点 1 作为主锚节点, 由锚节点 1 向其余的 $N-1$ 个辅助锚节点发送数据包进行定位。用 P_i 定义第 i 个锚节点的位置。则 P 点满足:

$$\|P - P_1\| - \|P - P_i\| = \Delta_{i1}, i=2, 3, \dots, N \quad (17)$$

式中, Δ_{i1} 是按式(4)描述的通过锚节点 i 和可信节点 1 而获得的 TDoA 测量。

在只有测量噪声存在时, 式(18)表示在最小二乘意义上的位置估计:

$$\begin{aligned} \hat{P} &= \arg \min_P \sum_{i=2}^N (\|P - P_1\| - \|P - P_i\| - \Delta_{i1})^2 \\ &= \arg \min_P f_{gr}(P) \end{aligned} \quad (18)$$

对应的梯度为:

$$g_{gr}(k) = -\nabla_P f_{gr}(P) |_{P=\hat{P}(k-1)} \quad (19)$$

则在每次迭代中, 沿着负梯度方向移动一步更新位置, 即当前估计沿负梯度方向向双曲线交点移动。则基于梯度的受限空间安全定位算法主要分为以下两个过程:

(1) 位置估计

将定位节点获得的距离差参数代入式(18), 再根据式(19)求出每一步迭代的梯度, 得到新的位置估计。每次迭代都能得到一个新的估计, 这个新的估计更有可能成为节点的真实定位。梯度下降算法最终收敛于最大似然估计, 在没有恶意节点的情况下, 最大似然估计和最小二乘估计相同。如前面描述的一样, 由于定位节点获得的测量值有部分是来自攻击者的, 因此最小二乘估计法会产生较大的误差。为了排除攻击者的干扰, 一旦梯度下降算法收敛于最小二乘方案, 算法就转向一个选择阶段, 对一些梯度力矢量按照步骤(2)的方法进行剪枝。

(2) 选择剪枝

在无协作攻击的情况下, 来自各种恶意节点的相互独立

的干扰趋向于最终达到平衡, 并且在最小二乘意义上接近于真实定位。在协作攻击的情况下, 当有不足 50% 的节点是恶意的情况下, 真实位置满足式(1)方程的个数多于恶意节点报告的位置满足方程的个数, 因此从算法第(1)步得到的 LS 估计接近于真实的位置 P , 而不是恶意节点选择的位置 P_{mal} , LS 解决方案更趋近于真实的位置而不是 P_{mal} 。但是随着恶意节点数目的增多, 耗费函数 $f(x)$ 的不断更新, 得到的位置估计会更接近于 P_{mal} 。所以, 裁剪一小部分量级较大的梯度力矢量, 再使用剩下的向量计算新的梯度, 这样, 在每一步迭代中, 就沿着新的梯度的方向移动一步进行估计的更新。

算法的详细过程如算法 2 所示。

算法 2 基于梯度的受限空间安全定位算法 GASLA-CS

输入: 用于定位的锚节点个数 L ; L 个锚节点构成的集合 S ; 迭代次数 K ; 步长 $\delta(k)$; 测量值集合 $\{(P_1, P_i, \Delta_{i1})\}, i=1, 2, \dots, L$, 其中 $P_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 为各个锚节点的位置坐标, Δ_{i1} 为测量的距离差。

输出: 位置估计值 $\hat{P}(K) = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]^T$ 。

1. Initialization($P(0)$);
2. stage=1;
3. for $k=1:K$ do//迭代 K 次
4. for $i=1:(L-1)$ do
5. $g_i(k) = (\|P_i - P_1\| - \|P_i - \hat{P}(k-1)\| - \Delta_{i1}) \times \frac{P_i - \hat{P}(k-1)}{\|P_i - \hat{P}(k-1)\|}$
6. end for
7. $g(k) = \sum_{i=1}^L g_i(k)$;
8. if ($g(k) < \text{threshold} \parallel \text{stage} == 2$) then
9. stage=2;
10. $S = \{\text{the } L/2 \text{ anchor nodes whose gradient are the smallest}\}$
11. else
12. $g(k) = \sum_{i \in S} g_i(k)$
13. end if
14. $\hat{P}(k) = \hat{P}(k-1) + \delta(k) \times \frac{g(k)}{\|g(k)\|}$
15. end for
16. end

算法 4—7 行为计算梯度的过程; 9—10 行为剪枝过程, 留下梯度值最小的一半锚节点的信息更新总的梯度; 14 行是根据迭代后的梯度的方向更新定位节点的新的位置估计。

算法 2 在算法 1 的基础上引入梯度的概念, 使得算法的计算复杂度降低, 实现高能定位, 并且, 增加了剪枝过程, 提升了算法的安全性。

5 实验与性能评估

为了对提出的算法的性能进行比较, 采用 Matlab 编写仿真程序, 模拟提出的算法的过程。实验的硬件环境是 Intel (R) Core(TM) i3-2120CPU 3. 3GHz, 3G 内存, 软件环境为 Windows 7 操作系统。

为了使仿真更符合实际情况, 我们的实验参数仿照加州大学伯克利分校研制的 TelosB 节点设定, TelosB 节点是 CrossBow 公司 Telos 系列节点的 Rev. B, 通信芯片为

CC2420,其CPU主频为8MHz。在长15m、宽2m、高3m的走廊区域的顶部,按照图4所示,每隔5m布置一个锚节点。实验中噪声以及信道链路等参数参照Stanford大学Meyer团队测量的图书馆噪声值设定。

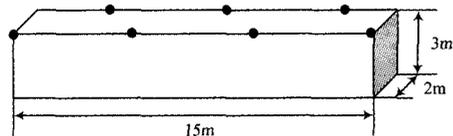


图4 走廊空间的节点部署图

TelosB节点计时模块的计时精度可以达到毫秒级,对于像ToA和TDoA等通过信号的传播时间计算距离的方法而言,由于无线传感器信号传播速度为光速(3×10^8 m/s),毫秒精度的计时不足以满足定位的需求,因此,在真实节点上,为了提升算法的精度,可以改进传感器节点的计时模块,采用节点的CPU主频计时。在仿真实验中,为了模拟这一过程,在Windows平台下通过调用系统指令,实现类似的功能。Windows系统中常用的计时器有两种,一种是timeGetTime多媒体计时器,它可以提供毫秒级的计时,精度无法满足定位需求;另一种是QueryPerformanceCount计数器,可以提供微秒级的计数。为了进一步提升精度,并方便算法部署,采用文献[25]中提供的方法,用_emit伪指令直接在C++程序中嵌入调用CPU中“时间戳(Time Stamp)”部件的机器指令RDTSC(Read Time Stamp Counter),实现计时功能。由于TelosB节点的主频只有8MHz,采用主频计时精度只能达到微秒级,因此,在下面的实验中,直接将得到的纳秒级数据的后3位舍去,使仿真结果与节点实际情况相符。

下面在上述实验环境下,分析比较本文算法与RSSI和DV-hop算法的性能。

5.1 定位算法仿真

图5显示了3种算法在设定的实验条件下,真实位置与测量位置的实验结果比较,横坐标方向为走廊长的方向,纵坐标为走廊宽的方向。实验中设置了7个锚节点,位置坐标分别为(0,0),(5,0),(10,0),(15,0),(4,2),(9,2),(14,2),并选取了不同的点进行定位。由实验结果可以看出,RSSI方法和DV-hop算法的定位误差均较大,而GASLA-CS算法有较高的定位精度,并且较为稳定。

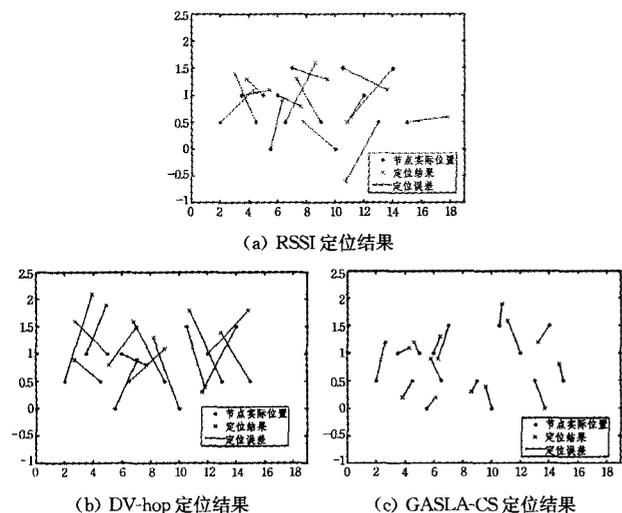


图5 定位结果图

针对上述实验结果,分析节点在不同位置定位误差的大小。可以看出,RSSI方法定位不稳定,当定位节点出现在锚节点附近时,定位误差较大,而DV-hop算法定位效果较为稳定。图6显示了3种方案中对于不同位置的各个节点的定位误差的大小,基于RSSI的定位方法和DV-hop算法误差相对较高,平均误差分别为2.109米和2.228米,而本文提出的方法的平均误差仅为0.699米。

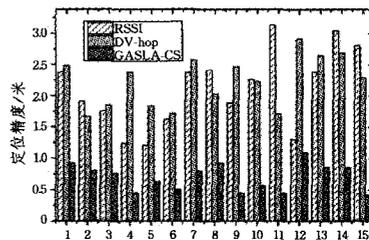


图6 定位误差情况对比

5.2 锚节点数量对算法的影响

不同的锚节点数量对算法的影响也很大,对于RSSI方法来说,至少需要知道3个锚节点的信息才能够进行定位,而对于DV-hop方法来说,在锚节点很少或者锚节点部署较为稀疏的情况下很难维持定位的精度。图7显示了参与定位的锚节点数量不同对算法定位精度的影响。从实验结果可以分析出,GASLA-CS算法只需要两个锚节点协助定位,即可实现较高的定位精度,定位误差约为1.72米,当锚节点数超过4时即可实现较高精度的定位,并且定位精度维持在一个稳定的状态,所以该算法只需要少量锚节点即可实现高精度定位,降低了传感器节点执行算法的能量消耗。而另外两种算法定位精度受锚节点多少的影响较为明显,参与定位的锚节点越多,定位精度越高。

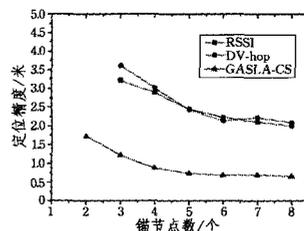


图7 锚节点数量对定位误差的影响

5.3 对算法安全性的评估

GASLA-CS算法考虑了安全性的要求,对恶意节点攻击和节点失效有一定的鲁棒性。实验中对参与定位的锚节点进行处理,使部分锚节点在受限空间中随机发出错误定位信息,实验结果如图8所示,随着恶意锚节点数目的增多,定位误差逐渐增大,在恶意锚节点数目不足50%时,算法的定位精度能维持在较高水平。可以看出,相较于RSSI和DV-hop算法,GASLA-CS算法对恶意攻击有较强的容忍性。

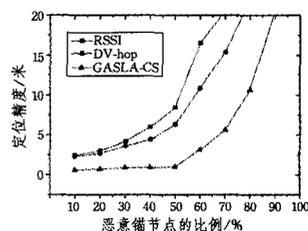


图8 恶意锚节点对定位精度的影响

结束语 现有无线传感器网络定位算法能量消耗大、定位精度不高,很难满足不同场景的定位需求,尤其是对于受限空间,更因受限空间中非视距、多径、干扰多变等环境因素的干扰,算法定位精度较低。本文在双曲线定位模型的基础上提出了一种基于梯度的无线传感器网络定位算法,该算法能够较好地适应室内受限空间场景,并且只需要少量的锚节点协同定位即可获得较高精度的定位。实验证明,本文提出的算法在受限空间环境中具有较高的适应性,能够实现高精度的安全定位。

由式(9)可以看出,基于双曲面的定位方法还要根据实际情况考虑节点的部署问题,参与定位的锚节点的位置决定了双曲面的焦距以及张角等因素,进一步影响定位结果;并且,对辅助锚节点的部署既要考虑定位的精确性,又要考虑覆盖程度。因此,下一步的工作是提出一种适合于不同受限空间情境的定位节点部署方案,该方案能够适应多种受限空间中的拓扑环境,实现高精度全覆盖的室内定位。

参 考 文 献

- [1] Mainwaring A M, Culler D E, Polastre J, et al. Wireless sensor networks for habitat monitoring[C]//WSNA. 2002;88-97
- [2] Noury N, Hervé T, Rialle V, et al. Monitoring behavior in home using a smart fall sensor and position sensors[C]//Microtechnologies in Medicine and Biology, 1st Annual International, Conference on 2000. IEEE, 2000;607-610
- [3] Meyer S, Rakotonirainy A. A survey of research on context-aware homes[C]//Proceedings of the Australasian information security workshop conference on ACSW frontiers 2003. Volume 21, Australian Computer Society, Inc., 2003;159-168
- [4] Knaian A N. A wireless sensor network for smart roadbeds and intelligent transportation systems[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [5] Yu L, Wang N, Meng X. Real-time forest fire detection with wireless sensor networks[C]//Proceedings. 2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2005. IEEE, 2005, 2;1214-1217
- [6] IEEE Std 1149.7-2009. Reduced-Pin and Enhanced-Functionality Test Access Port and Boundary-Scan Architecture[S]. IEEE Standard Board, 2009
- [7] Mao G, Fidan B, Anderson B. Wireless sensor network localization techniques[J]. Computer Networks, 2007, 51(10): 2529-2553
- [8] Zhu W, Cao J, Xu Y, et al. Fault-tolerant RFID reader localization based on passive RFID tags[C]//INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE. IEEE, 2012;2183-2191
- [9] Muñoz D. Position location techniques and applications[M]. Academic Press, 2009
- [10] Zhu S, Ding Z. A simple approach of range-based positioning with low computational complexity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12):5832-5836
- [11] Heidari M, Alsindi N A, Pahlavan K. UDP identification and error mitigation in ToA-based indoor localization systems using neural network architecture[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7):3597-3607
- [12] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system[C]//INFOCOM 2000, Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE, 2000, 2;775-784
- [13] Harter A, Hopper A, Steggle P, et al. The anatomy of a context-aware application[J]. Wireless Networks, 2002, 8(2): 187-197
- [14] Girod L, Estrin D. Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing[C]//2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001. IEEE, 2001, 3; 1312-1320
- [15] Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA[C]//INFOCOM 2003, Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications, IEEE Societies. IEEE, 2003, 3;1734-1743
- [16] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices[J]. Personal Communications, IEEE, 2000, 7(5):28-34
- [17] He T, Huang C, Blum B M, et al. Range-free localization schemes for large scale sensor networks[C]//Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, 2003;81-95
- [18] Bulusu N, Estrin D, Girod L, et al. Scalable coordination for wireless sensor networks; self-configuring localization systems [C]//International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA 2001). Ambleside, UK, 2001
- [19] 王新生, 赵衍静, 李海涛. 基于 DV-Hop 定位算法的改进研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(2):76-78
- [20] Anjum F, Pandey S, Agrawal P. Secure localization in sensor networks using transmission range variation[C]//IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE, 2005;9-203
- [21] Du W, Fang L, Peng N. Lad: Localization anomaly detection for wireless sensor networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2006, 66(7):874-886
- [22] Liu D, Ning P, Liu A, et al. Attack-resistant location estimation in wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Information and System Security (TISSEC), 2008, 11(4):22
- [23] Qiao D, 乔大鹏. Solutions for wireless sensor network localization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2011, 15:4-31
- [24] Patwari N. Location estimation in sensor networks[D]. The University of Michigan, 2005
- [25] Feng Yuan. Windows 图形编程[M]. 北京:机械工业出版社, 2002;15-17