

基于室内地图推演与信号穿墙修正的定位优化方法

孙大洋¹, 石文孝¹, 张定国²

(1. 吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 巴斯大学自主机器人研究中心, 巴斯 BA27AY)

摘要: 针对室内定位中信号穿墙非视距传播带来的测量误差问题, 提出了一种穿墙测距与视距测距相混合的穿墙修正定位优化方法。在室内典型的隔墙非视距场景中, 建立了近似拟合信号穿墙传播特性的测距模型, 将穿墙入射角、墙体结构、介电常数、墙体厚度等因素参数化, 并借助室内地图进行节点与锚点间的隔墙判定, 仅根据室内地图及冗余测距信息即可进行定位求解。仿真与 UWB 实测实验结果表明, 在考虑信号穿墙传播的多变地图场景下, 所提方法的室内定位平均精度优于加权最小二乘法的平方测距定位方法。

关键词: 室内定位; 超宽带测距; 信号穿墙修正; 地图推演

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022187

Positioning optimization method based on indoor map deduction and signal through-wall correction

SUN Dayang¹, SHI Wenxiao¹, ZHANG Dingguo²

1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

2. Centre for Autonomous Robotics, University of Bath, Bath BA27AY, UK

Abstract: An optimization method of through-wall corrected positioning based on mixed measurements of through-wall ranging and LoS ranging was proposed to solve the problem caused by NLoS measurement error. An approximate model of through-wall measurements was first proposed aiming at the typical through-wall NLoS scenario, which made indoor positioning method independent to the factors of the signal incident angle, the structure, the dielectric constant and the thickness of the wall. Then with the help of map deduction, whether there was a wall between the to-be-located node and the anchor node could be judged, and the positioning optimization method was proposed so that localization can be solved with only the redundant measurements. Simulations and UWB experiments show that in a variable map scenario considering through-wall propagation the proposed method outperforms SR-WLS (squared-range and weighted least square) in the aspect of average accuracy of indoor positioning.

Keywords: indoor positioning, UWB ranging, signal through-wall correction, map deduction

0 引言

室内高精度定位作为一项基础技术在各行各业中发挥着重要作用^[1], 如何提高复杂环境下室内定位系统的定位能力是一个重要的研究课题。在众多室内定位技术中, 超宽带技术 (UWB, ultra wide

band)^[2]与红外线、蓝牙、超声波、射频识别等技术相比, 不仅具有数据传输速率高、抗干扰和穿透能力强等优点, 还可以达到更高的定位精度^[3]。UWB 技术若采用双边双向测距 (DSTWR, double-sided two-way ranging) 算法^[4], 其测距误差主要来源于测距节点晶体振荡器的频率误差与节点

收稿日期: 2022-04-22; 修回日期: 2022-09-05

通信作者: 石文孝, swx@jlu.edu.cn

基金项目: 吉林省科技厅重点研发基金资助项目 (工业领域) (No.20200401089GX)

Foundation Item: Science and Technology Development Program of Jilin Province (No.20200401089GX)

间的时延差，在节点间无显著障碍物阻挡的情况下，测距精度可达厘米级^[5]。

然而，“节点间无显著障碍物遮挡”这一场景过于理想，室内空间构成复杂多变，非视距 (NLoS, non-line-of-sight) 传播的影响普遍存在，并且会产生多径效应，影响定位精度^[6]。因此在室内定位中，减小 NLoS 传播影响对提高定位精度十分关键。已有学者在很多方面对 NLoS 的影响进行了研究^[7-8]，如 NLoS 识别^[9]、NLoS 路径定位^[10]及 NLoS 消除^[11]等。由于 NLoS 会带来较大的测量误差，使用 NLoS 测量结果进行定位求解必然会影响定位精度，因此可采用简单移除 NLoS 测距的方式进行定位算法改进，提高定位精度。NLoS 识别即可用于这种改进，使用 NLoS 识别结果移除 NLoS 测距，之后使用视距测量集合进行定位。但该方法仅从分类层面对测距误差进行限制，不能最大效率地提高测量信息的利用率，在测距信息较少的情况下也会因为视距测量较少而无法定位。利用 NLoS 路径进行定位是基于散射体信息的方法，适合传播路径有可规避障碍物的场景，不适用于信号穿墙传播情形。NLoS 消除的解决思路更多的是将 NLoS 的特性与形成机理考虑进来，不单纯以 NLoS 识别为目标，因此可以更有效地对测量信息加以利用。在室内 NLoS 问题的众多成因中，墙体是空间结构中的主要因素，在室内环境中具有普遍性，对于以墙体遮挡为主的 NLoS 误差，如能建立可应用于实际测量的信号穿墙模型，即可最大限度地消除非视距误差对定位结果的影响。

由于不同墙体内部材料及结构具有复杂性，对无线信号穿墙折射的真实模型进行建模较为复杂。有学者研究了 UWB 信号穿墙单次折射模型下消除 NLoS 误差的性能^[12]，表明了单次折射模型减小穿墙定位模型中 NLoS 误差影响的可行性。在后续的研究中，文献[13]在假设已知室内场地的实际大小的基础上，搭建信号穿墙传播模型，分析模型下定位误差，得到该模型能够有效减小 NLoS 误差的结论；文献[14]采用了等效源法^[15]进行近似，利用 UWB 节点与墙体间几何关系，搭建信号穿墙传播模型，在已知入射角的情况下对穿墙定位进行仿真，由 NLoS 误差信息对到达时间 (ToA, time of arrival) 方法的测距结果进行修正，以提高测量精度。

从穿墙传播模型的建立到在定位模型中的使

用，不仅某次信号传播是否隔墙需要已知，判定是否使用该模型还涉及穿墙传播模型的无线信号穿墙入射角、墙体介电常数、厚度等参数，这些都会对定位结果的精度产生影响。而且由于墙体施工的不一致性，墙体规格、材料都存在很大差别，甚至无法获得，如空心砖墙体涉及的参数就更多，情况就更为复杂。自无线信号穿墙传播的等效源法^[15]提出以来，目前科研人员对于穿墙定位的讨论还是以信号传播模型的研究或定位系统的仿真为主，仍需要已知信号穿墙入射角或墙体厚度、介电常数等信息才能定位。

本文在上述研究的基础上，通过对信号入射角度的合理近似，以及墙体参数的一致化处理，弱化了穿墙传播模型在实际定位模型求解中的约束条件，以飞行时间 (ToF, time of flight) 测距为基础，提出了一种基于室内地图推演与信号穿墙修正的定位优化方法。该方法采用信号穿墙单次折射模型，结合地图推演的方式对目标进行定位，不需要已知墙体厚度、相对介电常数以及信号穿墙入射角，即可计算出定位坐标，同时具有较高的精确度。

1 无线信号穿墙传播测距模型

视距条件下，经典的 ToF 测距^[16]需要根据无线信号在节点之间的传播时间 Δt 和光速 c 计算出节点之间距离 s ，即

$$s = c\Delta t \quad (1)$$

在墙体阻隔的典型非视距情况下，由于无线信号在墙体内部的传播速度和传播方向都会发生改变，若不考虑信号穿墙特性，穿墙测量距离往往大于信号传播的实际距离，就会导致定位偏差。为简化验证，本文仅考虑节点位于同一水平面上的二维穿墙场景，如图 1 所示的信号穿墙传播模型中，2 个节点分布在墙体两侧，假设墙的厚度为 d_{wall} ，墙的相对介电常数为 ε ，而墙的相对磁导率 μ 近似为 1，信号穿墙入射角为 α ，在墙体内传播折射角为 θ ，参考节点的坐标为 (a, b) ，定位节点的坐标为 (x, y) ，则 2 个节点间的直线距离为

$$D = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2} \quad (2)$$

假设光速为 c ，墙内传播的信号波速可以近似认为满足

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (3)$$

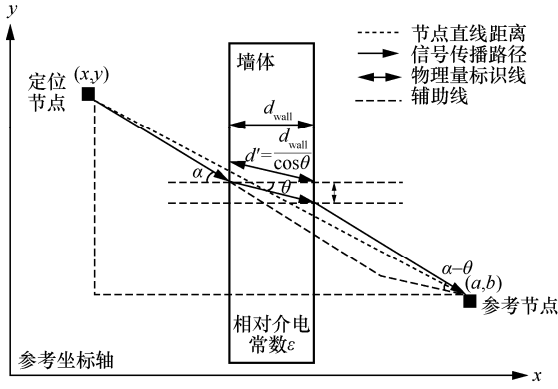


图 1 信号穿墙传播模型

根据无线通信原理，仅考虑信号在墙内传播时发生单次折射的情况，信号在墙内的等效传播距离 d' 为^[17]

$$d' = \frac{d_{\text{wall}}}{\cos \theta} \quad (4)$$

结合式(3)和式(4)可得，墙体内传播的额外时延为

$$\Delta \tau = \frac{d'}{v} - \frac{d'}{c} = \frac{d_{\text{wall}}(\sqrt{\epsilon} - 1)}{c \cos \theta} \quad (5)$$

依照图 1 的信号穿墙传播模型，由斯涅尔折射定律^[18]，有

$$\sin \alpha = \sqrt{\epsilon} \sin \theta \quad (6)$$

在实际环境中， α 通常是未知的。本文为简化模

$$\sqrt{\left(1 + \frac{d_{\text{wall}}^2 D^2}{(x-a)^2} - \frac{2d_{\text{wall}} |y-b|}{(x-a)}\right) \cdot \left[\sqrt{D^2 - \frac{(x-a)^2}{\epsilon}} - \frac{(x-a)^2}{\sqrt{\epsilon}}\right]} + \frac{\sqrt{\epsilon} d_{\text{wall}} D}{(x-a)} = \delta_i \cdot c \quad (11)$$

由此，获得了无线信号穿墙传播模型中信号传播时间与节点位置、墙体厚度以及墙体介电常数之间的函数关系。当 $\alpha = 0$ 时，式(11)为

$$\hat{d} = \sqrt{(x-a)^2 + (y-d)^2} + (\sqrt{\epsilon} - 1)d_{\text{wall}} \quad (12)$$

与信号传输路径垂直墙的情况计算所得表达式一致^[15]，可视为信号在墙内不发生折射。

2 考虑信号穿墙传播的定位模型

在本文推导的无线信号穿墙传播测距模型的基础上，对室内定位中基于测量的多边定位模型进行了改进，获得本文提出的考虑信号穿墙优化的定位 (TWO-L, through-wall optimized localization) 模型。锚点与定位节点间的位置关系有 2 种：一种是隔墙，另一种是不隔墙。在满足图 1 推导模型计算条件 $D \gg d_{\text{wall}}$ 的情况下，锚点可以随意摆放在墙内

型计算难度，在模型的构建中采用了近似处理：将 α 认为是 2 个节点间直线与墙体所成角度。在节点间距离远大于墙体厚度的情况下，即 $D \gg d_{\text{wall}}$ 时，可以认为 α 和两节点直线与墙所成角度之间的差值对计算的影响可以忽略^[19]。经测算，在假设 α 为 45° 时，近似角度仅与实际角度偏差 0.5° ，故该假设在一般锚点间摆放距离足够大的测距场景中是适用的。采用近似方式拟合 α ，有

$$\sin \alpha = \frac{|x-a|}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}} \quad (7)$$

折射模型中，信号传播的等效距离可以利用余弦定理进行求解，由式(2)、式(6)及式(7)整理可得

$$\cos(\alpha - \theta) = \frac{|y-b|}{D} \sqrt{1 - \frac{(x-a)^2}{\epsilon D^2}} - \frac{(x-a)^2}{\sqrt{\epsilon} D^2} \quad (8)$$

根据图 1 模型，结合式(2)和式(8)，利用几何关系可计算出信号传播的几何距离 $d_{\text{G-path}}$ 为

$$d_{\text{G-path}} = \sqrt{D^2 + d'^2 - 2Dd' \cos(\alpha - \theta)} + d' \quad (9)$$

设由节点获得的信号传播时间为 δ_i ，满足

$$d_{\text{G-path}} + \Delta \tau c = \delta_i c \quad (10)$$

将式(4)、式(5)、式(8)和式(10)整理可得

或者墙外，与定位节点通信获取定位节点与锚点群间的信号传播时间，如图 2 所示。

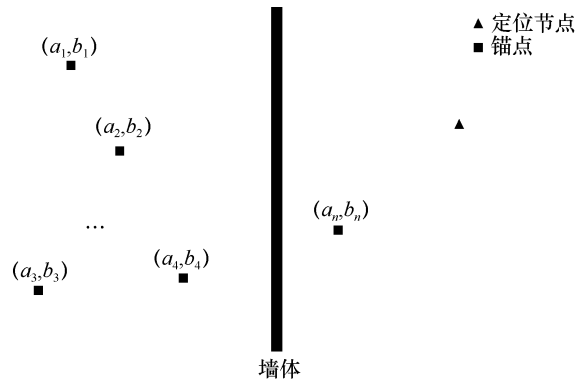


图 2 锚点群与定位节点的分布示意

结合无线信号穿墙传播测距模型，定义一个穿墙标志变量 $N = \{N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n\}$ ， $N_i = 1$ 表示锚

点 i 与定位节点间使用信号穿墙模型, $N_i=0$ 表示锚点 i 与定位节点之间使用视距传播模型。假设利用 UWB 获得的距离信息 $d = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$, 模型求解方程组为

$$\begin{aligned} \sqrt{D_1^2 + d_1'^2 - 2D_1d_1' \cos(\alpha - \theta)} + \sqrt{\varepsilon}d_1' &= d_1 \\ \sqrt{D_2^2 + d_2'^2 - 2D_2d_2' \cos(\alpha - \theta)} + \sqrt{\varepsilon}d_2' &= d_2 \\ \sqrt{D_3^2 + d_3'^2 - 2D_3d_3' \cos(\alpha - \theta)} + \sqrt{\varepsilon}d_3' &= d_3 \\ &\vdots \\ \sqrt{D_n^2 + d_n'^2 - 2D_nd_n' \cos(\alpha - \theta)} + \sqrt{\varepsilon}d_n' &= d_n \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $D_k = \sqrt{(x - a_k)^2 + (y - b_k)^2}, k = 1, 2, 3, \dots, n$, $d_k' = \frac{N_k d_{\text{wall}}}{\cos \theta}, k = 1, 2, 3, \dots, n$ 。墙体厚度 d_{wall} 和相对介电常数 ε 未知, 定位节点坐标 (x, y) 未知, 而各锚点坐标 (a_k, b_k) 已知。

因此在二维空间中, 穿墙定位问题转化为在测距信息与锚点坐标已知的情况下按照式(13)求解定位节点坐标的问题, 只需锚点个数大于或等于 4 即可满足方程组有唯一收敛解的求解条件。据此本文定义目标函数为

$$\min_{x,y} f(\mathbf{x}) = \|\mathbf{F}(\mathbf{x})\|_2^2 = \sum_i^n F_i(\mathbf{x})^2 \quad (14)$$

其中, $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}) - d_1 \\ f_2(\mathbf{x}) - d_2 \\ \vdots \\ f_n(\mathbf{x}) - d_n \end{bmatrix}, f_i(\mathbf{x}) = \sqrt{D_i^2 + d_i'^2 - 2D_id_i' \cos(\alpha - \theta)} + \sqrt{\varepsilon}d_i', i = 1, 2, \dots, n$

$\mathbf{x} = [x, y, d, \varepsilon]^T$ 为待求解参数。

利用 Levenberg-Marquardt 方法^[20]求解该目标函数, 搜索方向可设置为

$$(\mathbf{J}(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{J}(\mathbf{x}_k) + \lambda_k \mathbf{I}) d_k = -\mathbf{J}(\mathbf{x}_k)^T F(\mathbf{x}_k) \quad (15)$$

其中, $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 为 $F(\mathbf{x})$ 的 Jacobian 矩阵, 标量 λ_k 控制搜索方向 d_k 的幅值和方向, d_k 为优化函数 $\Phi(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{F}(\mathbf{x})\|_2^2$ 的下降方向, \mathbf{I} 为 $\mathbf{J}(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{J}(\mathbf{x}_k)$ 中的对角项矩阵。

由于 Levenberg-Marquardt 方法的求解需要设置初值 $\mathbf{x}^{(0)}$, 故可先利用多边测量方法, 忽略墙体厚度影响, 获取定位节点近似坐标作为求解初值。当各堵墙的厚度及建造材质近似相同时, 可将各堵墙视作一致进行定位求解, 这种近似并不会对模型求解定位节点坐标造成太大的偏差。本文对此进行

了仿真验证, 实验场景如图 3 所示。

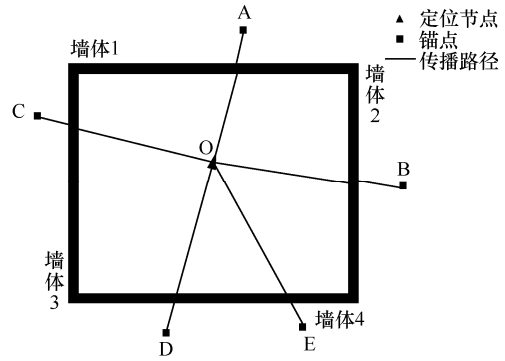


图 3 实验场景

假设实验场景中 4 堵墙的墙体厚度与相对介电常数设置如表 1 所示。

表 1 4 堵墙的墙体厚度与相对介电常数设置

墙体	厚度	相对介电常数
墙体 1	0.30	4.43
墙体 2	0.35	4.63
墙体 3	0.40	5.53
墙体 4	0.30	4.43

本文进行了两组仿真实验, 一组墙体参数设置如表 1 所示, 另一组所有墙体参数均设置为与墙体 1 一致。将两组实验的坐标结果采用欧氏距离计算坐标偏差值^[21], 仿真中测距方差设置为 10, 进行了 100 次实验, 累积分布函数 (CDF, cumulative distribution function) 曲线如图 4 所示。

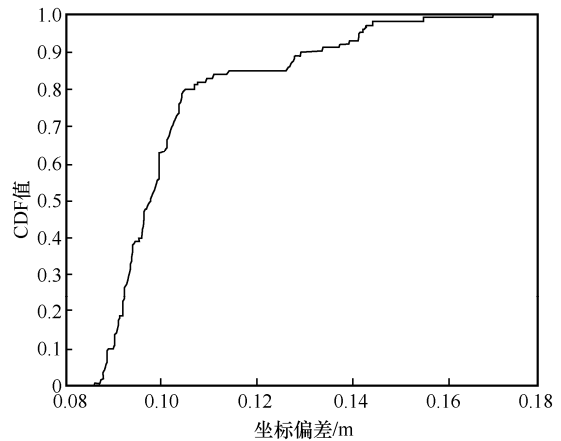


图 4 两组仿真实验坐标偏差 CDF 曲线

由图 4 可知, 坐标偏差大概率集中在 0.16 m 以内, 因此, 在墙体厚度与材质相差不大的情况下, 对墙体做近似相同处理是可行的。在实际应用中, 在同一室内环境下墙的厚度及建造材质的相对介电常数也是近似一致的, 因此本文推导的定位模型具

有较强的适应能力，可以匹配多种测距定位场景。

3 结合地图推演的穿墙定位模型

第 2 节中探讨的模型确定了已知穿墙标志向量条件下定位坐标的求解，但在实际应用中，定位节点与锚点间隔墙的关系可能由于定位节点的移动而改变，因此如何自动获取穿墙标志向量也是值得探讨的问题。利用深度学习的方法对 UWB 非视距误差进行识别是一种方式^[22]，结合地图推演是另一种方式，本文采用地图推演方式。在图 3 建立的模型的基础上，本文考虑利用多边测量方法，搭建一个能够估计定位节点所处位置进而获得穿墙标志向量对定位节点坐标进行求解的模型。

在已知锚点坐标与室内地图的条件下，首先利用定位节点与锚点间的距离信息由多边测量方法计算出定位节点的推演位置；然后根据推演位置与室内地图进行定位节点与锚点之间是否隔墙的判别，如果推演位置与锚点之间的线段与墙体线段相交，设置穿墙标志为 1，否则为 0；最后根据穿墙标志向量建立穿墙定位模型，使用推演位置迭代计算定位节点的修正位置。地图推演判定穿墙标志向量的流程如图 5 所示。

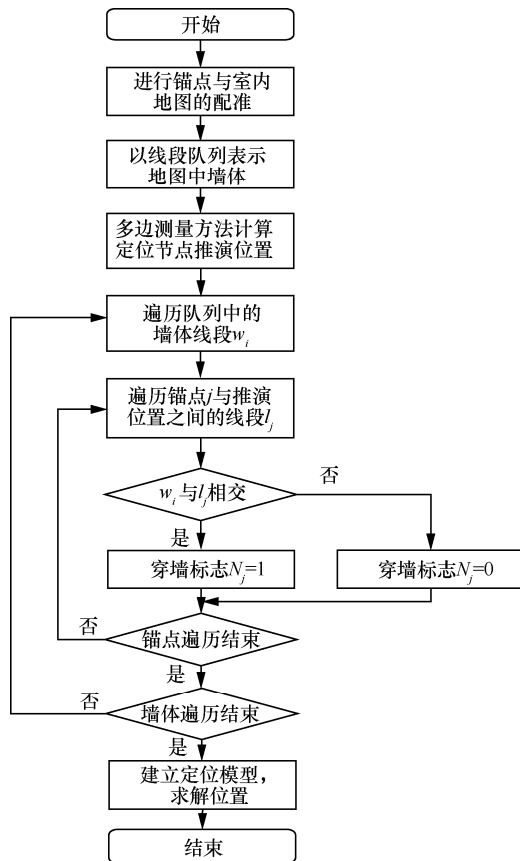


图 5 地图推演判定穿墙标志向量的流程

由于在假设无墙的情况下计算推演位置将会引入计算偏差，对于该偏差是否会对穿墙标志向量产生误判的问题，本文进行了实验分析，使用 UWB 测试了以厚度为 30 cm、相对介电常数为 4.43 的墙为实验条件的测距偏差，节点分布如图 6 所示。

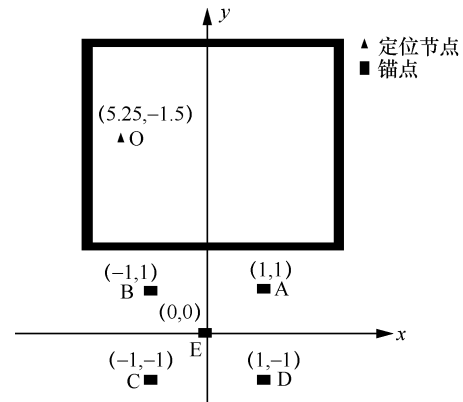


图 6 实验场景中节点分布

图 6 绘制了各节点的坐标值，对定位节点 O 进行测距，将距离值与利用式(2)计算的距离相减，所得测距偏差结果绘制成 CDF 曲线，如图 7 所示。

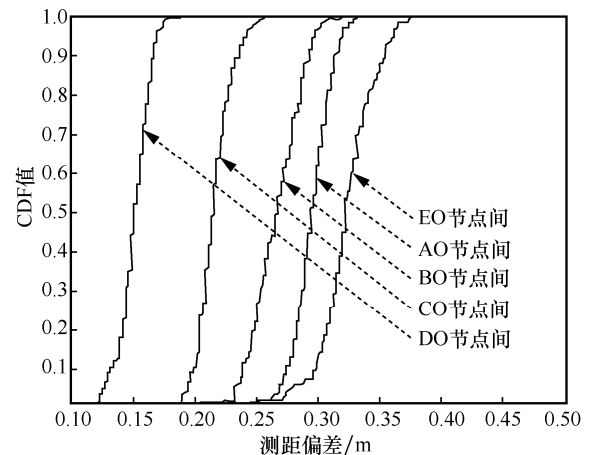
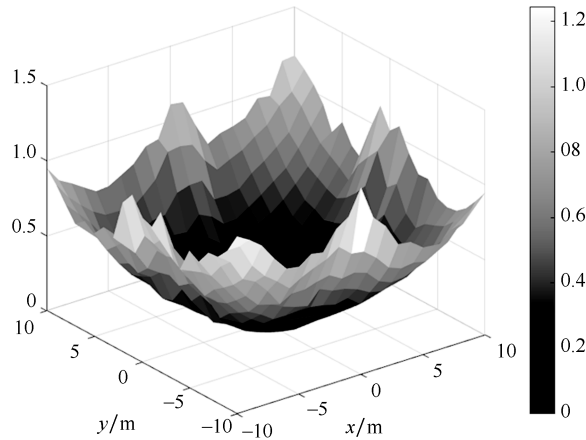


图 7 信号穿墙传播测距偏差 CDF 曲线

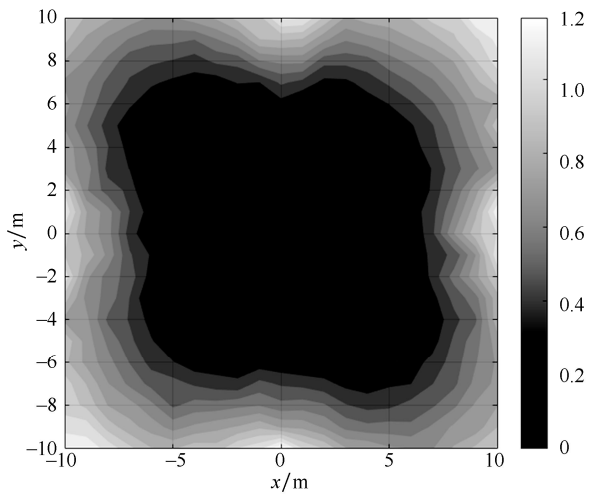
由图 7 可知，测距偏差随节点位置的不同而呈现出不同的偏差区间。若穿墙标志向量的计算结果出现偏差，则位置偏差应大于 0.30 m。因此，在使用地图推演模型时只要定位节点不紧靠墙壁，推演位置就可以相对准确地对隔墙情况进行判别。对于定位节点紧靠墙壁情形，由于信号穿墙、反射等特性较为复杂，本文不进行深入讨论。

考虑到锚点与定位节点的位置关系将对定位误差产生影响，本文在二维平面上对锚点与定位节点的几何分布进行分析，用几何精度因子 (GDOP, geometric dilution of precision) 作为度量指标。根据

图 6，在 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的空间内选取定位节点，绘制定位节点内 GDoP 分布，如图 8 所示。由图 8 可知，对于场景内不同的定位位置，锚点分布会对定位结果产生一定的影响。



(a) 三维GDoP分布



(b) GDoP二维等势图

图 8 定位节点内 GDoP 分布

4 实验验证与性能分析

为验证地图推演穿墙定位模型的有效性，本节分别通过仿真实验和 UWB 实测实验的方式对模型进行了验证。

4.1 仿真实验

依照考虑信号穿墙的定位模型，选择了 5 个 UWB 节点作为锚点，假设墙体厚度 $d = 30\text{ cm}$ ，相对介电常数 $\epsilon = 4.43$ ，测距信息模拟 UWB 测量，测距误差服从 $N(0, \sigma^2)$ 正态分布，其中，方差设置为 $\sigma^2 = 10$ 。按照无线信号穿越的是否为同一堵墙，本文设定了锚点坐标与墙体结构的 2 种仿真场景分别如图 9 和图 10 所示。

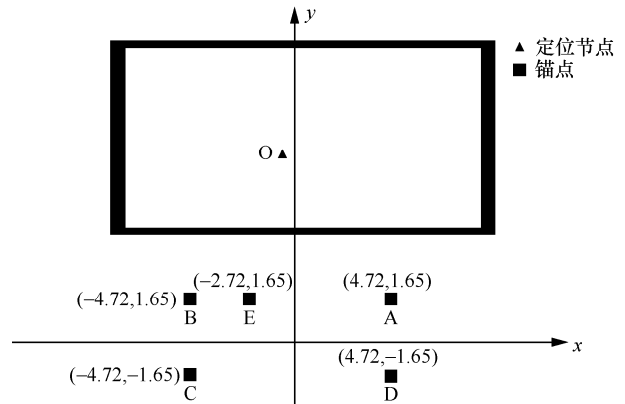


图 9 仿真场景 1

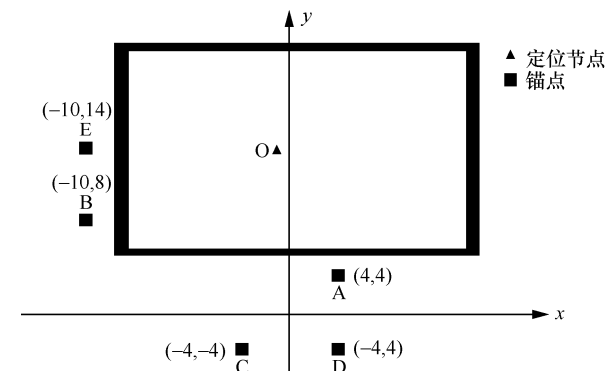


图 10 仿真场景 2

对于仿真场景 1，取定位节点坐标为 $(-1.83, 5.72)$ 以及 $(2, 8)$ ；对于仿真场景 2，取定位节点坐标为 $(-1, 11)$ 以及 $(6, 10)$ 。仿真中进行了多组实验，将本文提出的 TWO-L 方法与经典的最小二乘 (LS, least square) 法^[23]以及使用加权最小二乘法的平方测距定位 (SR-WLS, squared-range and weighted least square) 方法^[24]的定位误差进行了对比，SR-WLS 方法将穿墙测距统一看作 NLoS 测距，并对信号穿墙导致的 NLoS 测距值进行了修正。2 种场景下不同定位节点处的仿真结果分别如图 11~图 14 所示。

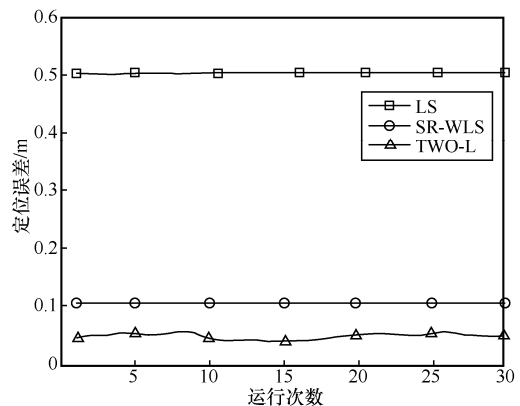


图 11 仿真场景 1(-1.83, 5.72)处仿真结果

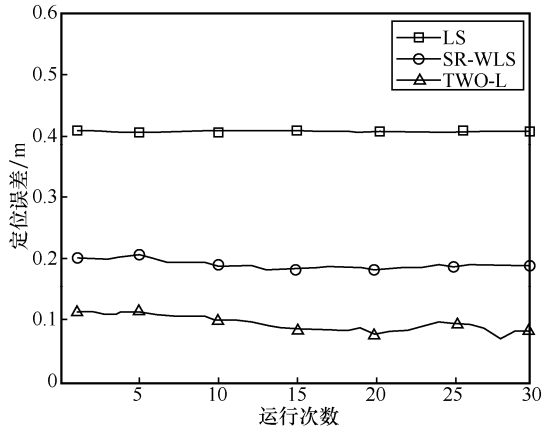


图 12 仿真场景 1(2,8)处仿真结果

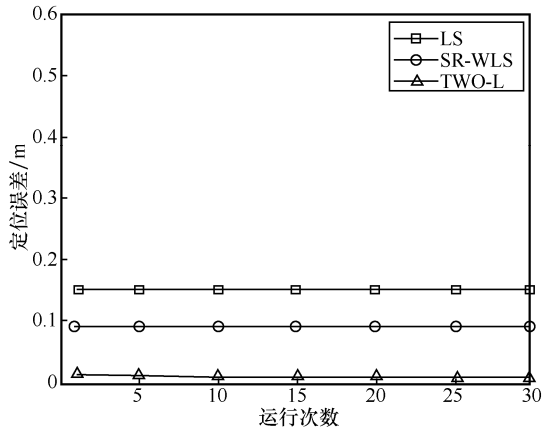


图 13 仿真场景 2(-1,11)处仿真结果

由图 11~图 14 可知，定位节点在室内典型位置的情况下，本文所搭建的模型均能在一定程度上减小信号穿墙带来的非视距误差，且修正效果优于 SR-WLS 方法。实验中，各次仿真结果中采用未考虑修正的多边测量方法计算出的坐标偏差存在不一致的现象是由锚点与定位节点的相对位置导致。

对于图 13 所示误差分布，选取的定位坐标为 (-1,11)，结合图 10 仿真场景 2 可以看出，定位坐标几乎位于 BE 垂直平分线与 CD 垂直平分线的交点处，这导致获取的各次测距信息的偏差都为同样的趋势，各数据之间的偏差相差并不大，在这种情况下，利用多边测量计算出的定位坐标与实际值的偏差也将较小。因此，坐标求解的误差与锚点和定位节点的摆放位置有一定的关系，但对本文考虑信号穿墙传播的定位模型求解定位坐标并没有太大的影响。

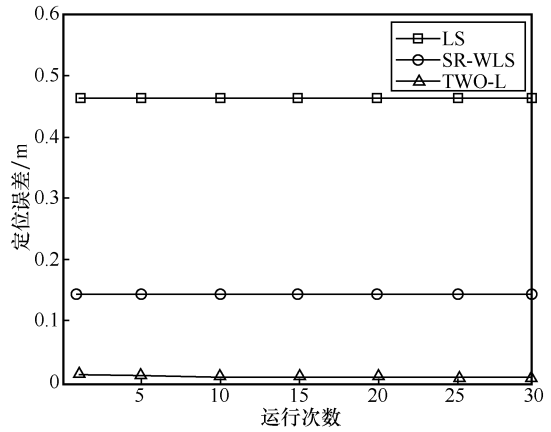


图 14 仿真场景 2(6,10)处仿真结果

为了验证在室内动态场景下本文方法的适应能力，本节设计了大小为 10 m×10 m 的仿真场景，同样选择 5 个 UWB 节点作为锚点，摆放在在墙的一侧，假设墙体厚度 $d = 30\text{cm}$ ，相对介电常数 $\epsilon = 4.43$ ，在墙的另一侧移动定位节点，进行定点定位，形成一个圆形轨迹，如图 15 所示。

对各定位节点进行仿真测试，分别采用经典最小

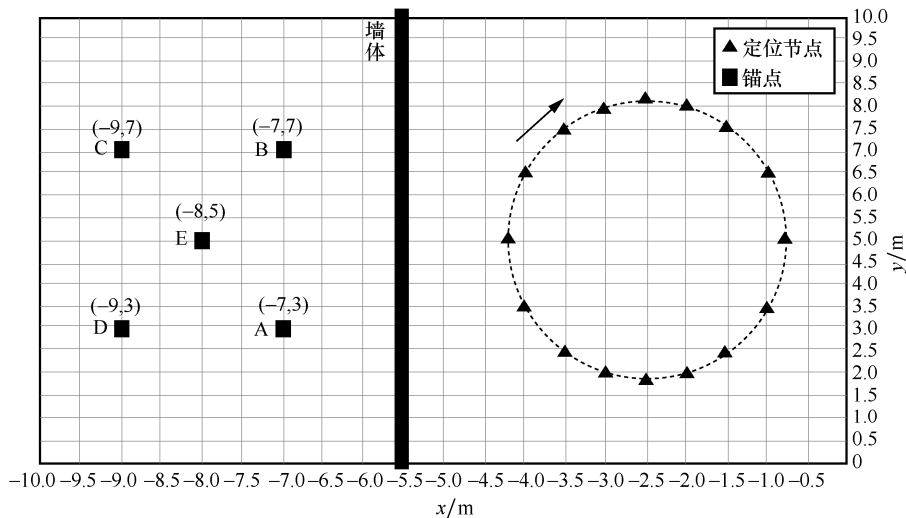


图 15 室内动态仿真场景

二乘法、SR-WLS 方法、本文提出的 TWO-L 方法计算各定位节点坐标。将各方法计算所得定位节点坐标以及理论坐标绘制成定位节点坐标轨迹，如图 16 所示。

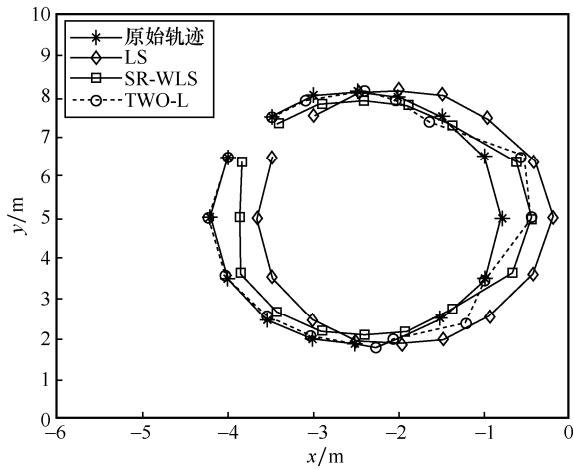


图 16 定位节点坐标轨迹

由图 16 不难发现，TWO-L 方法与理论坐标拟合得最好，表明了本文模型的有效性。

依据各次仿真实验结果，虽然本文方法对信号穿墙入射角进行了近似，对墙体厚度与介电常数等参数进行了近似处理，但是与未考虑信号穿墙传播模型的最小二乘法以及 SR-WLS 方法相比，采用本文方法求解定位坐标仍对定位精度有较大改善。

本文仿真使用的硬件配置为 Intel(R) Core(TM) i5-8265U CPU @ 1.60 GHz 1.80 GHz，MATLAB 版本为 R2021a，算法开销对比如表 2 所示。

表 2 算法开销对比

算法	开销/s
LS	0.000 544
SR-WLS	0.003 568
TWO-L	0.017 334

由表 2 可知，本文模型虽然较为复杂，但定位算法的开销仍可保证一定的实时性。

4.2 UWB 实测实验

为验证穿墙定位优化模型与实际测量的吻合程度，本文使用如图 17 所示的 UWB 节点，并在如图 18 所示的空心砖墙体隔断的实际室内环境中进行了实测。UWB 节点采用 DWM1000 模块 DSTWR 方式进行测距，经过校准并采用 Kalman 滤波算法^[25]对多次测量获得的数据进行处理，以减小测距时由多径误差带来的影响。



图 17 实验中使用的 UWB 节点

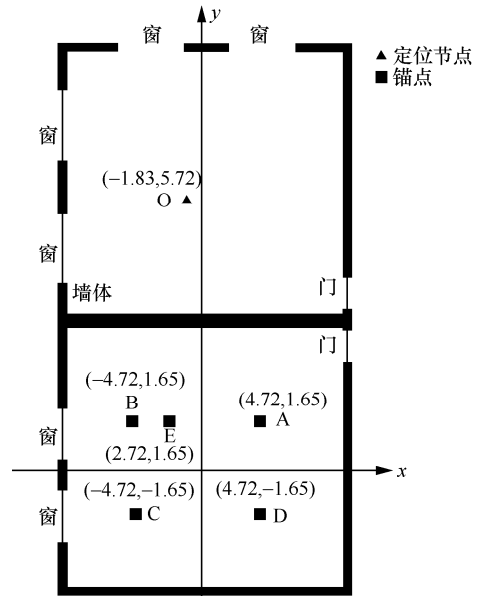


图 18 实际室内环境

为与仿真实验相对应，实测实验中，本文利用支架使各节点摆放至同一水平面。

将定位节点置于坐标(-1.83,5.72)处进行测距实验，通过 UWB 获取 90 次连续测距数据，分别用本文模型计算各次定位所得坐标值，定位误差分布如图 19 所示。

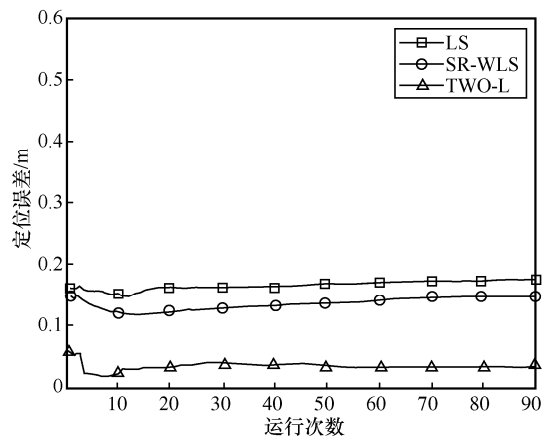


图 19 定位节点置于坐标(-1.83,5.72)处的定位误差分布

由图 19 可知, 实验结果与仿真结果相近, 说明考虑信号穿墙传播的定位模型能较好地减小信号穿墙非视距误差。未考虑穿墙的定位误差为 16 cm 左右, SR-WLS 方法的定位误差为 13 cm 左右, 本文模型下的定位误差为 5 cm 左右。与 SR-WLS 方法相比, TWO-L 方法定位精度提高了 61.53%。为直观地表示 x 与 y 的坐标偏差, 图 20 进行了相关的误差 CDF 分析, x 与 y 的偏差均为 3 cm 左右, 表明定位结果较准确。

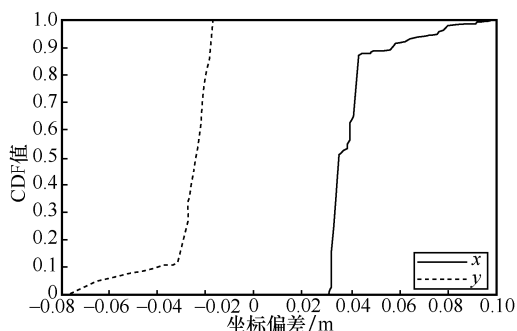


图 20 定位节点置于坐标(-1.83,5.72)处的坐标偏差 CDF 曲线

在上述实验的基础上, 改变节点位置如图 21 所示, 将其中一个锚点移至(1.65,-1.5), 与定位节点保持视距测量。

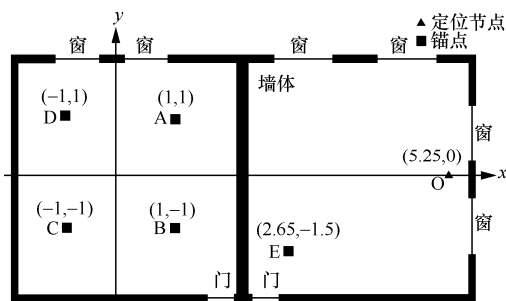


图 21 实验场景示意 (改变一个锚点)

将定位节点置于坐标(5.25,0)处进行实验, 定位误差分布如图 22 所示。

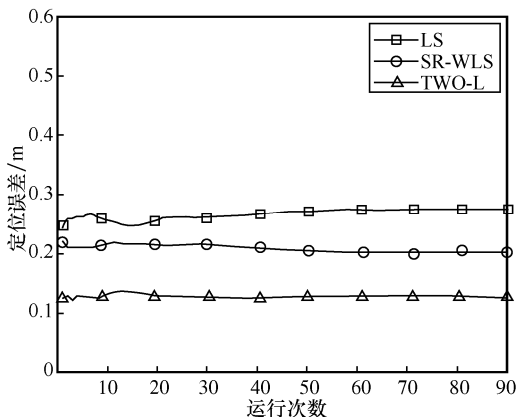


图 22 定位节点置于坐标(5.25,0)处的定位误差分布

图 22 的实验结果进一步印证了考虑信号穿墙传播的定位模型能较好地减小信号穿墙非视距误差。未考虑穿墙的定位误差为 29 cm 左右, SR-WLS 方法的定位误差为 21 cm 左右, 本文模型下的定位误差为 13 cm 左右。与 SR-WLS 方法相比, TWO-L 方法定位精度提高了 38.10%。在该实验基础上进行坐标误差累积分析, 得到相关的误差 CDF 曲线, 如图 23 所示。

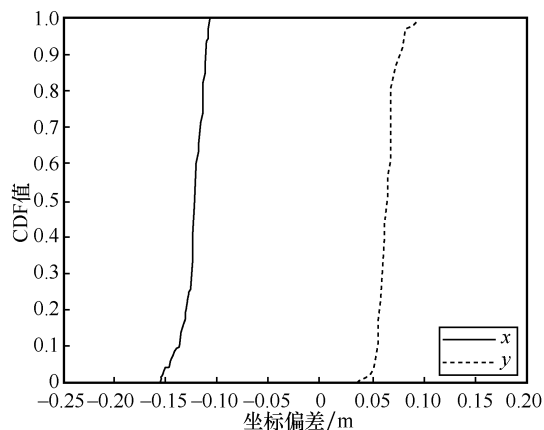


图 23 定位节点置于坐标(5.25,0)处的 CDF 曲线

图 23 所示结果也表明了定位结果的准确性, x 坐标偏差约为 12 cm, y 坐标偏差约为 5 cm。

为验证少数锚点与定位节点同时处于非视距测量, 而其他锚点为视距测量情形, 本文在图 21 的基础上, 改变节点位置, 将其中锚点 A、B 分别移至(-1.65,0)和(1.65,1), 与定位节点保持视距测量, 仅保留 2 个锚点与定位节点呈隔墙状态, 如图 24 所示。

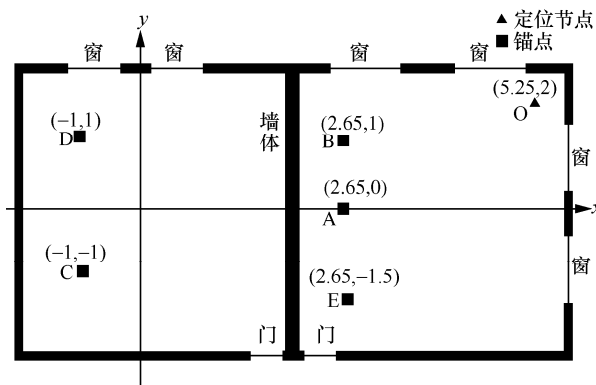


图 24 实验场景示意 (改变 2 个锚点)

将定位节点置于坐标(5.25,2)处进行实验, 定位误差分布如图 25 所示。

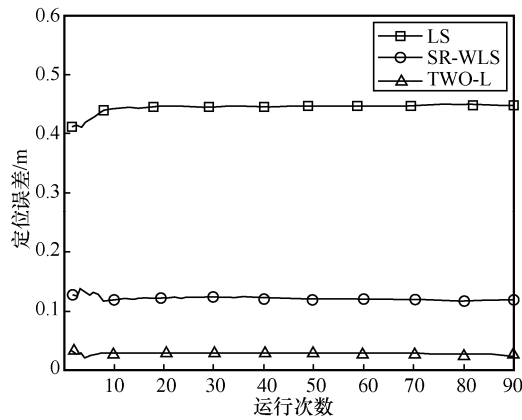


图 25 定位节点置于坐标(5.25,2)处的定位误差分布

由图 25 可知,在仅有 2 个锚点与定位节点呈隔墙状态下,考虑信号穿墙传播的定位模型也能较好地减小信号穿墙非视距误差。未考虑穿墙的定位误差为 45 cm 左右,SR-WLS 方法的定位误差为 12 cm 左右,本文模型下的定位误差为 4 cm 左右。与 SR-WLS 方法相比,TWO-L 方法定位精度提高了 66.67%。在该实验基础上进行坐标偏差累积分析,得到相关的 CDF 曲线如图 26 所示。

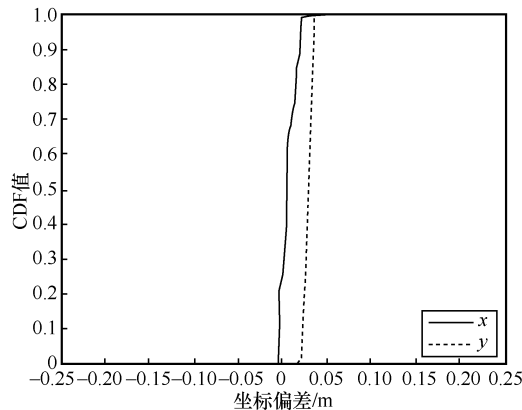


图 26 定位节点置于坐标(5.25,2)处的 CDF 曲线

图 26 所示结果进一步证明了定位结果的准确性, x 坐标偏差接近 0, y 坐标偏差也仅约为 3 cm。总体来说,本文搭建的模型能够较好地修正信号穿墙传播误差,减小非视距影响,提高定位精确度。

5 结束语

针对室内定位中信号穿墙的非视距传播带来的误差问题,本文提出了一种考虑信号穿墙传播结合室内地图推演的定位优化方法。该方法的定位坐标求解不需要已知墙体厚度以及相对介电常数等参数;对于墙体参数不一致的定位环境,在参数间差距较小的情况下,对墙体参数近似一致进行计算

对定位结果不会产生显著影响;同时,室内地图推演模型的应用弱化了求解条件,提升了模型对不同测距环境的适应能力。仿真结果表明,与未考虑信号穿墙定位模型相比,本文模型求解得到的定位坐标标准度有较大的提升。基于 UWB 的实测实验进一步验证了穿墙定位优化模型的合理性,与仿真实验具有较高的吻合度。本文实验场景下定位精度可显著提高。

参考文献:

- [1] 王慧强,高凯旋,吕宏武.高精度室内定位研究评述及未来演进展望[J].通信学报,2021,42(7):198-210.
WANG H Q, GAO K X, LYU H W. Survey of high-precision localization and the prospect of future evolution[J]. Journal on Communications, 2021, 42(7): 198-210.
- [2] PASCACIO P, CASTELEYN S, TORRES-SOSPEDRA J, et al. Collaborative indoor positioning systems: a systematic review[J]. Sensors, 2021, 21(3): 1002.
- [3] KIANFAR A E, UTH F, BALTES R, et al. Development of a robust ultra-wideband module for underground positioning and collision avoidance[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2020, 37(6): 1821-1825.
- [4] 王春琦,冯大权,何春龙,等.基于UWB的增强非对称双边双向测距算法研究[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2019,33(1):66-73.
WANG C Q, FENG D Q, HE C L, et al. Enhanced asymmetric double side two-way ranging algorithm for UWB ranging system[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2019, 33(1): 66-73.
- [5] 仰胜,胡志刚,赵齐乐,等.基于ToF模式的UWB定位原理与精度验证[J].大地测量与地球动力学,2020,40(3):247-251.
YANG S, HU Z G, ZHAO Q L, et al. Principle and precision verification of UWB positioning based on ToF[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(3): 247-251.
- [6] 孙大洋,王雪莹,韩双雪,等.虚拟锚点高维坐标的非视距识别及定位优化[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(6):2207-2215.
SUN D Y, WANG X Y, HAN S X, et al. Non-line-of-sight identification and optimization based on virtual coordinates of anchors[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(6): 2207-2215.
- [7] 肖竹,于全,易克初,等.适用于NLoS环境的UWB定位方案研究[J].通信学报,2008,29(4):1-7.
XIAO Z, YU Q, YI K C, et al. Research on localization scheme of UWB in NLoS environment[J]. Journal on Communications, 2008, 29(4): 1-7.
- [8] XIE L, LI S, TIAN Z, et al. Indoor NLoS localization based on collaboration of multiple base stations[C]//Proceedings of 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2020). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [9] LIU M Y, LOU X Z, JIN X P, et al. NLoS identification for localization based on the application of UWB[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 119(4): 3651-3670.
- [10] 谢良波,李升,周牧,等.基于散射体信息的室内NLoS多站协作

- 定位算法[J]. 通信学报, 2021, 42(5): 63-74.
- XIE L B, LI S, ZHOU M, et al. Scatterer information based indoor NLoS multiple base station cooperative localization algorithm[J]. Journal on Communications, 2021, 42(5): 63-74.
- [11] JIANG C H, CHEN S, CHEN Y W, et al. An UWB channel impulse response de-noising method for NLoS/LoS classification boosting[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(11): 2513-2517.
- [12] CHEN C, DING H, HUANG X T, et al. Through-wall localization with UWB sensor network[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Piscataway: IEEE Press, 2012: 284-287.
- [13] 陈晨, 李欣, 丁宏, 等. 减小超宽带穿墙定位中 NLoS 误差的方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(5): 451-457.
- CHEN C, LI X, DING H, et al. NLoS error mitigation for ultra-wideband through-wall localization[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(5): 451-457.
- [14] 蒙静, 张钦宇, 张乃通, 等. IR-UWB 定位系统距离误差建模及性能研究[J]. 通信学报, 2011, 32(6): 10-16.
- MENG J, ZHANG Q Y, ZHANG N T, et al. Modeling the distance error and performance analysis in IR-UWB positioning system[J]. Journal on Communications, 2011, 32(6): 10-16.
- [15] GIBSON T B, JENN D C. Prediction and measurement of wall insertion loss[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(1): 55-57.
- [16] COPPENS D, DE POORTER E, SHAHID A, et al. An overview of ultra-wideband (UWB) standards (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): interoperability aspects and future research directions[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2202.02190, 2022.
- [17] DOMUTA I, PALADE T P. Two-way ranging algorithms for clock error compensation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(8): 8237-8250.
- [18] BUŠA J. Target localization by UWB signals[C]//International Conference on Numerical Methods and Applications. Berlin: Springer, 2014: 254-261.
- [19] JOHANSSON E M, MAST J E. Three-dimensional ground-penetrating radar imaging using synthetic aperture time-domain focusing[J]. Advanced Microwave and Millimeter-Wave Detectors, 1994, 2275: 205-214.
- [20] AMINI K, ROSTAMI F, CARISTI G. An efficient Levenberg-Marquardt method with a new LM parameter for systems of nonlinear equations[J]. Optimization, 2018, 67(5): 637-650.
- [21] ZHANG C J, XIE T, YANG K, et al. Positioning optimisation based on particle quality prediction in wireless sensor networks[J]. IET Networks, 2019, 8(2): 107-113.
- [22] JIANG C H, SHEN J C, CHEN S, et al. UWB NLoS/LoS classification using deep learning method[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(10): 2226-2230.
- [23] CAFFERY J J. A new approach to the geometry of TOA location[C]//Proceedings of Vehicular Technology Conference Fall 2000. IEEE VTS Fall VTC2000.52nd Vehicular Technology Conference (Cat. No.00CH37152). Piscataway: IEEE Press, 2000: 1943-1949.
- [24] TOMIC S, BEKO M. A bisection-based approach for exact target localization in NLoS environments[J]. Signal Processing, 2018, 143: 328-335.
- [25] RAITOHARJU M, NURMINEN H, CILDEN-GULER D, et al. Kalman filtering with empirical noise models[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.

[作者简介]



孙大洋 (1979-), 男, 吉林农安人, 博士, 吉林大学副教授, 主要研究方向为室内定位、无线网络定位、卫星拒止下的高精度定位等。



石文孝 (1960-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线网络资源分配、光无线通信技术。



张定国 (1977-), 男, 吉林辉南人, 博士, 英国巴斯大学教授, 主要研究方向为机器人与人机交互。