

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107177

基于 UWB 穿墙定位中 NLOS 误差的优化方法*

宰昶丰 郭英 叶瑾 盛方圆

(山东科技大学 测绘与空间信息学院 青岛 266590)

摘要: 针对室内定位中受非视距因素影响下的无线信号穿墙导致定位发生偏移的现象,因无线电信号传播中具有波动性强、易干扰的特点,采用抗干扰性强、穿透力高以及测距值优的超宽带技术采集测量数据。将信号穿墙推导公式与无线信号对数衰减模型融合处理采集到的距离值数据,通过衰减模型减少了穿墙时信号损失的能量,提高测距值的准确性,通过最小二乘法减少测距时的累计误差,提高定位精度。通过实际实验场景测试得出,该方法在穿墙环境下定位精度可达到 0.28 m,满足精度要求,可以为一般的位置需求提供服务。

关键词: 室内定位;超宽带;非视距影响;信号穿墙

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.1010

Optimization method of NLOS error in UWB through-wall positioning

Zai Changfeng Guo Ying Ye Jin Sheng Fangyuan

(College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon that the wireless signal penetrates the wall under the influence of non-line-of-sight factors in indoor positioning, the positioning is offset. Because the radio signal propagation has the characteristics of strong volatility and easy interference, the use of strong anti-interference, high penetrating power and ultra-wideband technology with excellent ranging value collects measurement data. The signal through-wall derivation formula is combined with the wireless signal logarithmic attenuation model to process the collected distance value data. The attenuation model reduces the energy loss of the signal when passing through the wall, improves the accuracy of the ranging value, and reduces the measurement by the least square method. Accumulated error of distance to improve positioning accuracy. Through the test of actual experimental scenes, it is concluded that the positioning accuracy of this method can reach 0.28 m in a through-wall environment, which meets the accuracy requirements and can provide services for general location requirements.

Keywords: indoor positioning; ultra-wideband; non-line-of-sight effects; signal through wall

0 引言

随着现代化的发展,人们对于定位精度与范围提出更高的要求。其中,室外定位技术以卫星导航技术为主,室内更多的是依赖于无线电定位技术如蓝牙(Blue-tooth, BT)^[1]、WiFi(wireless fidelity)、紫峰^[2]、超宽带(ultra wide band, UWB)^[3]、射频识别技术^[4]等无线电定位技术^[5]。而在室内定位研究中会出现各种各样影响定位的因素^[6],其中非视距误差尤其突出^[7],受环境影响而产生的非视距(non line of sight, NLOS)现象成为室内定位方面的主要误差源,因此高效、稳定的室内定位技术成为目前学者研究热点之一。

在基于无线电技术解决定位的方法主要包括有接收的信号强度指示(received signal strength indicator, RSSI)算法^[8]、到达时间(time of arrival, TOA)算法,利用时间差进行定位的方法 TDOA(time difference of arrival)等^[9]。但都易受环境影响,出现非视距现象导致定位精度低、结果差,例如信号穿墙、人员走动、电磁信号干扰、室内空间物体的摆放等都是产生非视距现象的主要因素^[10]。如何解决在信号传播过程中降低非视距误差的影响成为研究重点^[11]。如何通过硬件还是软件建立较好的非视距误差估计模型,是研究非视距现象的第一步。因 UWB 具有较好的抗干扰性、穿透性等特点^[12],在利用其特点来处理信号传播过程中遇到的非视距现象,但在无线信号传播过程中

收稿日期:2021-07-05

* 基金项目:山东省重点研发计划项目(2018GGX106003)资助

受复杂环境影响会发生多次折射,导致基站与标签的采集距离增大或减小,从而引起定位误差增大^[13]。其中针对信号穿墙环境下的非视距影响,曾玲等^[14]提出了一种基于非视距鉴别的信号到达时间 TOA 定位算法,定位精度达到 0.48 m。对于室内环境下信号的折射与穿透会导致定位精度降低,陈晨等^[15](下面统一称为文献遮挡算法)提出了一种减小 UWB 穿墙定位中 NLOS 误差的方法来解决该问题,降低了信号传播过程中多次传播导致距离增大的现象,提高定位精度。然而在信号穿墙中受非视距影响会发生一部分的能量的损失,造成定位结果发生偏移,影响定位精度^[16]。徐琨等^[17]提出一种室内环境下无线传感网络路径衰减模型来降低 NLOS 影响。陈磊等^[18]提出一种基于最小二乘和泰勒级数的超宽带定位算法,来提高定位算法的鲁棒性和定位精度,但主要应用在工业环境。

因此,为解决信号穿墙造成能量损失发生定位偏移,提高非视距影响下的定位精度,首先通过 TOA 算法获取距离信息,其次结合信号传播路径模型,利用对数-正态模型来表示传播中衰减的距离信息,两者结合对目标点进行穿墙定位,利用最小二乘法减小距离累积误差,通过三边定位求解测试点坐标。通过对穿墙信号衰减进行有效的优化,从而完成利用 UWB 进行定位,在室内定位方面为用户提供更加满意的定位服务。

1 信号穿墙优化方法

1.1 信号穿墙模型

在利用无线信号进行室内定位研究中,因各种各样的非视距因素影响,如人员走动、地磁设备的信号干扰、室内物件摆放、墙壁等都会导致定位精度低。而对于非视距现象下的信号穿墙影响相关学者研究较少,如何模拟信号穿墙的过程至为关键。因无线信号传播与电磁波传播极为相似,通过电磁波的折射反射现象即可模拟出大致的传播过程。

考虑信号穿墙场景,主要研究对象是墙壁对无线信号传播的影响,在现实生活中建筑物的墙壁材质主要为混凝土,其介电常数与 15% 水湿砂(金刚石)较为接近,部分物质介电常数如表 1 所示。

表 1 部分物质的介电常数

气/液体	介电常数	固体	介电常数
水蒸汽	1.007 85	橡胶	2~3
氧气	1.000 51	15%水湿砂	约 2~8
空气	1.000 585	花岗石	8.3
水	81.5	大理石	6.2

如图 1 所示,墙壁厚度为 D ,基站与标签分布在墙壁的两侧,标签 M_s 为所求目标,坐标为 (x, y) 与基站 BS_1 隔墙通信,基站坐标为 (x_1, y_1) 信号从标签至基站的传播路径如

图 1 所示,其中,信号穿墙传播时入射角和折射角分别用 α 和 β 表示。

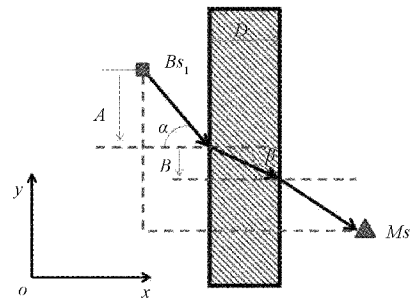


图 1 信号传播路径

如图 1 所示,信号穿过墙壁厚度为 D 墙壁,发生折射,入射角和折射角分别用 α 和 β 表示。可得如下几何关系式:

$$\frac{|y - y_1 - A - B|}{x_1 - L/2} = \frac{A}{L/2 - D - x} \quad (1)$$

式中: A 和 B 分别表示信号在室内真空和墙壁中的传播距离在 y 轴的投影。由 Snell 折射定理(光的折射定律) $\sin\alpha = \sqrt{\epsilon_r} \sin\beta$, 并根据工程中常用的折射近似方法,可得:

$$\frac{|y - y_1| - A}{x_1 - L/2 + D} \approx \sqrt{\epsilon_r} \frac{B}{D} \quad (2)$$

联立式(1)和(2),解得:

$$\begin{cases} A = \frac{|y - y_1| (L/2 - D - x)p}{x_1 - L/2 + (L/2 - D - x)p} \\ p = 1 - \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r} (x_1 - L/2 + D)} \\ \cos\alpha = \left[1 + \left(\frac{A}{L/2 - D - x} \right)^2 \right]^{-1/2} \\ \cos\beta = \sqrt{1 - \frac{A^2}{\epsilon_r [A^2 + (L/2 - D - x)^2]}} \end{cases} \quad (3)$$

因此,标签至基站 BS_1, BS_2, BS_3 的距离可表示为:

$$\begin{cases} r_i = \frac{x_i - x - D}{\cos\alpha} + \sqrt{\epsilon_r} \frac{D}{\cos\beta} = \\ \sqrt{1 + A_i^2} \left[x_i - x - D + \frac{\epsilon_r D}{\sqrt{(\epsilon_r - 1)A_i^2 + \epsilon_r}} \right] \\ A_i = \frac{|y - y_i| p_i}{x_i - L/2 + (L/2 - D - x)p_i} \\ p_i = 1 - \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r} (x_i - L/2 + D)} \\ i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (4)$$

通过对标签的传播路径的推导,可以得到相应基站到标签的距离表达式。实际定位过程中,各基站对接收信号的距离进行估计,结合有效的位置估计方法,实现对标签的定位。

1.2 基于信号穿墙的优化方法

然而在现实生活中,尤其是在室内定位方面,环境复杂

多变,只是通过信号穿墙发生折射来定位,会损失一部分的能量,从而导致定位会发生偏移。主要原因在于无线信号传播过程中,受非视距现象的影响会发生路径衰减,从而发生多次折射,导致基站与标签的距离增大或减小。因此采用一种模拟无线信号传输过程中所发生的路径衰减的数学模型是非常必要的。其中对数-正态模型来表示室内环境中无线信号的路径衰减,其表示形式为:

$$PL(d) = PL_0 + 10\eta \log(d) + X_{noise} \quad (5)$$

式中: $PL(d)$ 是距离为 d 的节点间的衰减损失距离; PL_0 是参考距离 d_0 处的衰减损失距离,为事先给定的,通常取值为 1 m ; η 为路径损耗指数,用于表达衰减速率; X_{noise} 是方差为 σ^2 的高斯白噪声; η 和 σ^2 与环境密切相关,不同的路径损耗指数如表 2 所示。

表 2 不同环境下的路径损耗指数

环境类型	路径损耗指数 η
小型便利店内	2.2
普通办公室	2.4
摆放桌椅的教室	2.5
室内走廊	3~4

因为在 UWB 信号在穿墙过程中,会发生折射、反射等各种各样的现象,通过穿墙模型得到基站与标签的距离公式,解算得到基站与标签之间的折射距离。再结合无线信号传输中会发生路径衰减的对数-正态模型,得到修正后的距离信息,再利用最小二乘法减小测距累积误差,从而解算标签定位坐标。通过结合信号衰减模型与穿墙模型进行研究,将其优化距离模型简化为数学公式,即具体表达式为:

$$GZ = r + PL(d) \quad (6)$$

在本文应用当中可以改为:

$$GZ_M(d_i) = r_i + PL_M(d_i) \quad (7)$$

式中: $M=A, B, C, D, E, i=1, 2, 3, \dots, N$, $GZ_M(d_i)$ 为修正后的距离, r_i 为信号穿墙的距离, $PL_M(d_i)$ 代表信号传播中损失的距离值, M 代表基站个数, i 代表采样个数。即通过优化方法得到每个相应基站的改正距离后,即可进一步利用三边定位原理求解标签坐标,三边定位原理如图 2 所示。

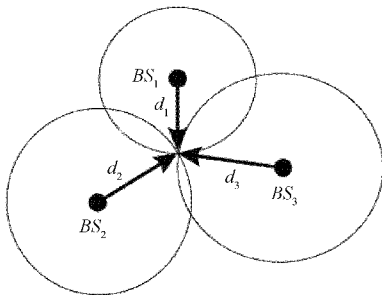


图 2 三边定位原理

图 2 中的 d_i 即为改正后的距离,假设标签的坐标为 (x, y) ,第 i 个定位基站的坐标为 (x_i, y_i) ,根据其几何意义,则它们之间满足关系:

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = d_i^2 \quad (8)$$

将式(8)进行扩展,用方程组的前 $n-1$ 个等式,分别减去第 n 个等式后,获得线性化的方程式:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B} \quad (9)$$

其中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_N) & 2(y_1 - y_N) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{N-1} - x_N) & 2(y_{N-1} - y_N) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_N^2 + y_1^2 - y_N^2 + d_1^2 - d_N^2 \\ \vdots \\ x_{N-1}^2 - x_N^2 + y_{N-1}^2 - y_N^2 + d_{N-1}^2 - d_N^2 \end{bmatrix}$$

利用最小二乘法解方程式(9),可得:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (10)$$

式中: \mathbf{X} 即为标签 (x, y) 的坐标。

2 实验与分析

2.1 实验条件

在山东科技大学 J6 教学楼 5 楼走廊采集数据,采用基于 DecaWave 公司开发的 DW1000 模块作为采集测距信息的设备,该模块集成了天线及所有的射频电路、电源管理和时钟电路,如图 3 所示。

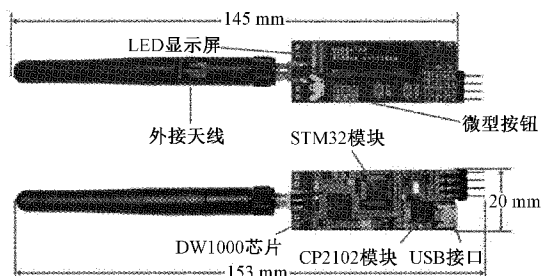


图 3 DWM100-PG2.5 示意图

这款模块可利用 TOA 进行定位,其测距精度 10 cm ,定位精度 30 cm 。且其对称双边双向测距 (symmetric double-sided two way ranging, SDS-TWR) 方法可以减少时钟漂移带来的测距精度误差,弱化非视距影响,提高定位精度。通过在楼道里面布设基站,里面的若干锚节点形成网格分布,主机站连接电脑,移动标签与基站不通视,处于教室走廊外面,可以较好地模拟信号在遇到混凝土墙体等遮挡物时的传播路径,信号传播过程如图 4 所示,基站布设示意图如图 5 所示。

如图 4 所示,基站与标签的传播示意图,基站与标签只有一墙之隔,墙内有 3 个基站,墙外有 2 个基站,实际布设

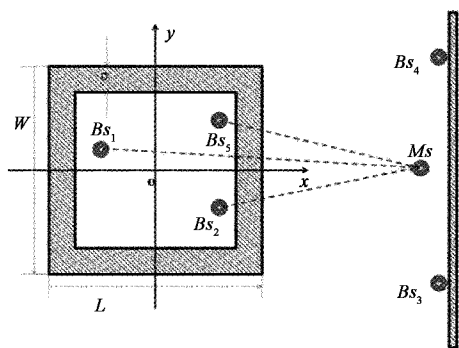


图4 信号穿墙传播

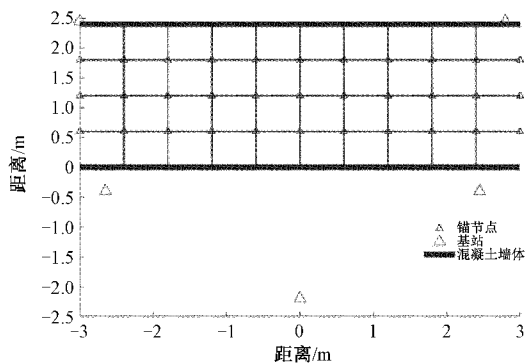


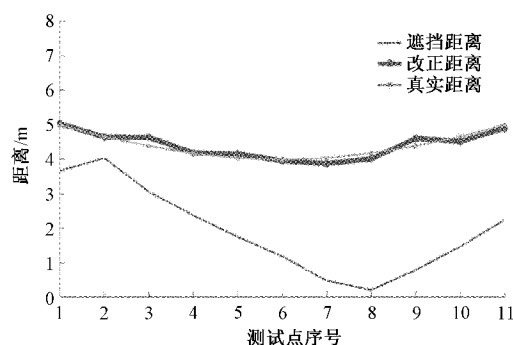
图5 基站布设图

基站情况如图5所示,单位m,大三角形代表基站,走廊之间可划分为若干 $0.60\text{ m}\times 0.60\text{ m}$ 的网格,选择随机网格点作为测试点,采集测距信息的方式为静态模式,分别在选择好的锚节点的位置放置标签,随机选择11个点,一个测试点采集500次,且基站 $Bs_i, i = 1, 2, 3, 4, 5$,坐标为 $(0, -2.2), (2.45, -0.4), (2.8, 2.45), (-3, 2.45), (-2.65, -0.4)$,单位为m。

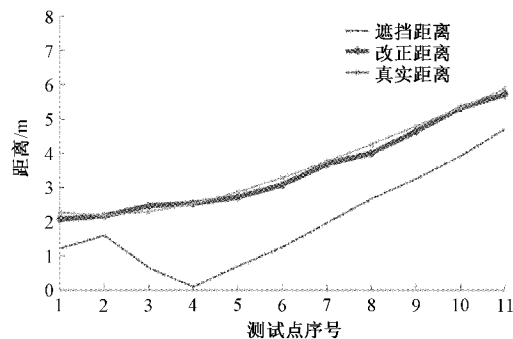
2.2 测距分析

在无线电定位过程中,通过将信号转变为距离来进一步解算标签坐标,那么对距离进行有效的分析即是至为关键的,通过距离的变化情况,可以进一步得出该点当时受外界影响的信息,如与真实值相比较差值过大,则受到噪声干扰较为明显。通过UWB模块采集到的距离信息,用本优化方法与文献遮挡算法处理采集到的距离信息一起相比较,如图6(a)~(e)所示。

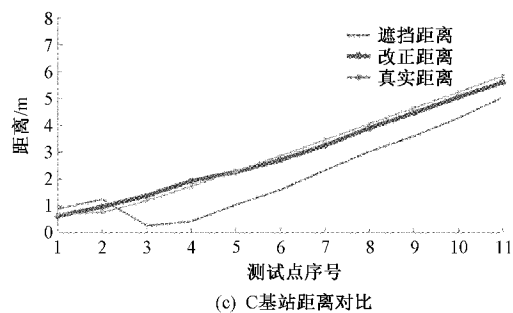
通过图6可知,图(a)~(e)分别为11个测试点的对应基站距离变化图,横坐标为测试点序号,纵坐标轴表示距离值,单位m,本文的优化方法与文献遮挡算法在距离上相比较,有较好地提高,由图可得本文的优化方法较为接近真实距离,而文献遮挡算法与真实距离相差有一定的距离差,恰恰说明在无线信号穿墙过程中,有一定的能量发生损失,导致定位出现偏差,通过本文优化方法明显提高标签与基站的距离信息,对定位精度有明显的提高。通过提高距离信息来增加定位结果的准确性,利用最小二乘方法再次减小



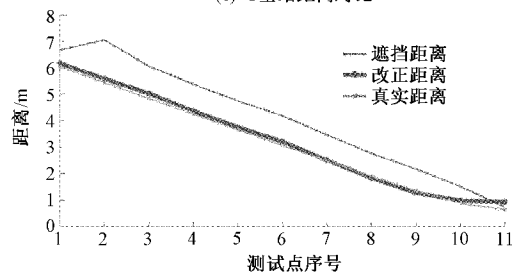
(a) A基站距离对比



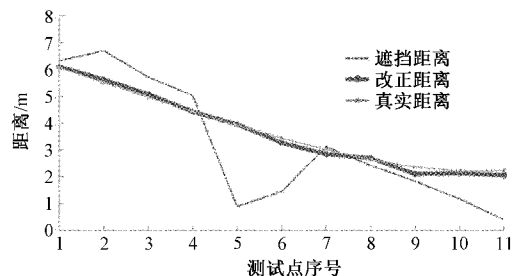
(b) B基站距离对比



(c) C基站距离对比



(d) D基站距离对比



(e) E基站距离对比

图6 测试点距离优化

测距采集的距离误差,进一步提高定位精度,定位结果如图 7 和 8 所示。

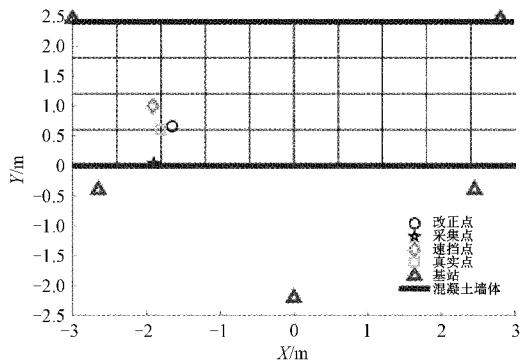


图 7 单点对比图

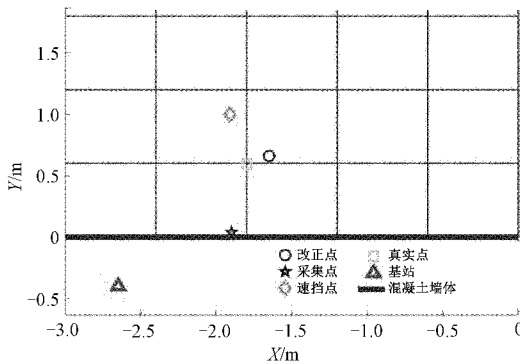


图 8 单点放大图

正如图 7 和 8 所示,三角形为基站,正方形为真实点,五角星为采集点,菱形为文献遮挡算法解算点,圆为改正点,即本文提出的优化方法解算点,通过上图可知经过优化距离信息,提高基站与标签之间的距离的准确性,在通过三边定位原理与最小二乘算法结合解算测试点坐标,对于提高定位精度有较好的帮助。如表 3 所示,即为具体测试点坐标结果。根据表 3 所示,发现与文献遮挡算法比较,本算法精度有很大提高,具体表现在 X,Y 坐标的平均差值,以及测试点的均方根误差,其中本方法 X,Y 坐标误差分别达到 0.22 与 0.14,整体测试点的精度提高 56.26%。通过本文提出的优化算法解算出的测试点,与其比较,直观地发现通过优化方法求解距离,然后通过最小二乘法求解最优解,得到的改正点的定位效果明显优于文献遮挡算法解算出的定位结果。通过概率累计函数图像可以得到累计误差的分布情况,如图 9 所示。

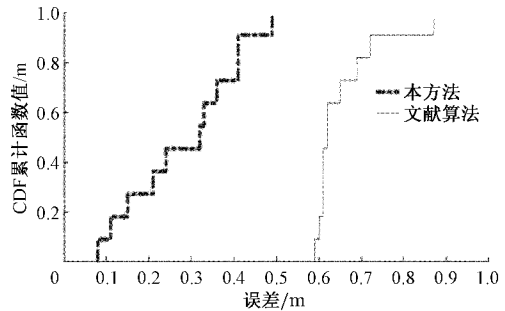


图 9 累积分布函数 CDF

表 3 走廊定位误差分析

序号	改正后坐标/m		遮挡算法坐标/m		真实坐标/m		误差/m		提高率/%
	X	Y	X	Y	X	Y	改正	遮挡	
1	-2.50	0.50	3	0	-3.0	0.6	0.49	0.60	18.33
2	-2.25	0.48	-2.52	0.07	-2.4	0.6	0.41	0.61	32.79
3	-1.65	0.66	-1.90	0.04	-1.8	0.6	0.15	0.62	75.81
4	-1.33	0.37	-1.19	0.01	-1.2	0.6	0.24	0.59	59.32
5	-0.98	0.42	0.47	0.02	-0.6	0.6	0.41	0.61	32.79
6	0.25	0.79	0.18	0.02	0	0.6	0.32	0.62	48.39
7	0.66	0.40	0.88	0.01	0.6	0.6	0.21	0.65	67.69
8	1.26	0.55	1.47	0.05	1.2	0.6	0.08	0.61	86.89
9	2.13	0.47	2.51	0.09	1.8	0.6	0.36	0.87	58.62
10	2.31	0.56	2.77	0.09	2.4	0.6	0.11	0.69	84.06
11	2.73	0.80	3.42	0.10	3.0	0.6	0.33	0.72	54.17
平均	0.22	0.14	0.87	0.55	0	0	0.28	0.65	56.26

通过对图 9 和表 3 整理可知:1)通过本文提出的方法与文献遮挡算法在距离上的对比可知,通过本方法可以很好地减小距离的 NLOS 误差;2)通过测试点的定位结果分布图上可知,经过本方法得到提高后的距离值,通过三边定位与最小二乘法结合减小测距时累计的误差,提高定位精度;3)通过表格数据中的提高率,即每个测试点与对应文献遮挡算法解算点的定位误差相比较,使用本方法可以

较好地提高定位精度,整体提高幅度平均达到 56.26%;4)通过本方法与文献遮挡方法的累计误差分布函数图像可得,本方法累积误差最大可得 0.5 m。

3 结 论

为解决在无线信号穿墙环境下导致定位不准确,能量传播损失严重的现象,本文通过将穿墙模型与对数衰减模

型相融合的方法,利用最小二乘算法消除传播过程中累计的噪声误差,通过三边定位方法求解标签坐标,实验数据表明本方法平均误差在0.28 m,即提出的定位方法更适合用于非视距环境下的无线信号穿墙定位方面,且定位精度较高,但没有考虑到其他不同材料的墙体的实验,还需进一步研究。

参考文献

- [1] 郭英,冯茗杨,孙玉曦,等.一种基于蓝牙室内指纹定位的贝叶斯改进算法[J].测绘通报,2019(5):1-6.
- [2] 何宽,郁滨. ZigBee网络按需干扰攻击检测方案[J].电子测量与仪器学报,2019,33(1):128-134.
- [3] 刘怡佳.非视距环境下的UWB室内定位技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [4] 王思睿,薛严冰,宋智,等.无芯片RFID湿度传感器[J].仪器仪表学报,2019,40(1):125-131.
- [5] 郭英,刘清华,姬现磊,等.基于手机加速度计的行人步态分析[J].中国惯性技术学报,2017,25(6):708-712.
- [6] 李昂,付敬奇,沈华明,等.基于模糊聚类和猫群算法的室内定位算法[J].仪器仪表学报,2020,41(1):185-194.
- [7] LI X, WANG Y. Research on a factor graph-based robust UWB positioning algorithm in NLOS environments[J]. Telecommunication Systems, 2020, DOI:10.1007/s11235-020-00709-2.
- [8] 李竞,卢建洲.一种基于图优化的室内定位指纹数据库建立方法[J].电子测量与仪器学报,2020,34(2):29-35.
- [9] 潘忠祥,江剑.基于UWB的三边优化算法研究[J].国外电子测量技术,2019,38(2):25-29.
- [10] BARRAL V, ESCUDERO C J, GARCÍA-NAYA JOSÉ A, et al. NLOS identification and mitigation using low-cost UWB devices [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, DOI: 10.3390/s19163464.
- [11] SANG C L, STEINHAGEN B, HOMBURG J D, et al. Identification of NLOS and multi-path conditions in UWB localization using machine learning methods[J]. Applied Sciences, 2020, DOI: 10.3390/app10113980.
- [12] 马瑞霞.超宽带混沌穿墙雷达的成像研究和抗干扰性分析[D].太原:太原理工大学,2016.
- [13] LI SH X, LYU F, WANG CH R, et al. UWB positioning enhancement using Markov chain in indoor NLOS environment [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2020, 27(4): 54-58,98.
- [14] 曾玲,彭程,刘恒,等.基于非视距鉴别的超宽带室内定位算法[J].计算机应用,2018,38(S1):131-134,139.
- [15] 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.
- [16] MUSA A, NUGRAHA G D, HAN H, et al. A decision tree-based NLOS detection method for the UWB indoor location tracking accuracy improvement[J]. International Journal of Communication Systems, 2019, 32(13):e3997.
- [17] 徐琨,刘宏立.室内环境下无线传感网络路径衰减特性[J].传感器与微系统,2016,35(12):11-13,16.
- [18] 陈磊,王菲菲,焦良葆,等.基于最小二乘和泰勒级数的超宽带定位算法[J].信息化研究,2020,46(2):30-35.

作者简介

宰昶丰,硕士研究生,主要研究方向为基于超宽带的室内定位。

E-mail: 1678398278@qq.com

郭英(通信作者),副教授,硕士生导师,主要研究方向为基于手机信息的室内外高精度定位。

E-mail: skdgy@163.com

叶瑾,硕士,主要研究方向为基于手机信息的室内外高精度定位。

E-mail: 1433533868@qq.com

盛方园,硕士,主要研究方向为基于地磁的室内定位。

E-mail: 1535493739@qq.com