

基于改进 CHAN 的超宽带定位误差校正算法

金仙力,赵道明

(南京邮电大学 计算机学院,江苏 南京 210023)

摘要:短距离无线通信是构建物联网的重要技术之一,其中超宽带技术被认为是未来短距离无线通信的主流技术。如今,室内定位已经成为超宽带技术一个重要的应用领域。在基于到达时间差的定位误差校正算法中,CHAN 算法具有在 LOS 环境下精度较高和计算复杂度较低等优点。在室内环境中,由于地形复杂和遮挡物增多,非视距问题使 CHAN 算法的定位精度明显下降。为了实现高精度的实时室内定位,提出一种基于残差加权和 CHAN 算法的误差校正算法。该算法的重点是通过 CHAN 算法初步计算出移动台位置的中间估计结果,并建立残差函数来衡量中间结果的准确程度,通过残差加权的方式优化 CHAN 算法在非视距环境中的性能。在不同噪声水平下进行了对比实验,结果表明该算法与 CHAN 算法相比对超宽带定位的 NLOS 误差有显著的抑制作用,改善了定位的性能。

关键词:超宽带;误差校正;室内定位;CHAN 算法

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2018)03-0067-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2018.03.014

Error Mitigation Algorithm in UWB Positioning Based on Improved CHAN

JIN Xian-li, ZHAO Dao-ming

(School of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Short distance wireless communication is one of the important technology to build the Internet of Things. Ultra-wideband is expected to become the mainstream of short distance wireless communication technology in the future. At present, indoor positioning has become an important application field of ultra-wideband. Among positioning error mitigation algorithm based on arrival time difference, The algorithm of CHAN has high precision in LOS environment and low computational complexity. In the indoor environment, due to non line-of-sight error caused by the obstacles and complex terrain, positioning accuracy of CHAN is significantly declined. To realize real-time indoor positioning with high precision, we propose an error mitigation algorithm based on residual weighting and CHAN. Its main idea is to use CHAN to calculate the intermediate position estimates of the mobile station, and take residual to measure the accuracy of these intermediate results. In addition the performance of CHAN is optimized in non line-of-sight environment by means of residual weighting. Simulation shows that the proposed algorithm effectively restrains NLOS error compared with CHAN and improves the precision of positioning in NLOS environment.

Key words: ultra-wideband; error mitigation; indoor positioning; CHAN

0 引言

在基于物联网的服务中,物体的位置数据是位置相关服务的基本前提。人们在物联网中部署大规模的设备,来感知物联网中关于物体的方方面面的信息,深入挖掘这些信息以总结特征和规律,从而提供给用户相关的业务服务,发挥物联网的经济价值。信息感知是物联网应用的基础^[1]。在密集多径环境中实现精确的定位,对于如大型商场、室内停车场等室内环境下的

搜索和救援等紧急情况的处理至关重要^[2]。利用无线通信技术,感知室内物体的位置,构建室内 LBS^[3]。现有的短距离无线通信技术中,超宽带以其抗干扰能力强、高达几个 GHz 的带宽、功耗较小、穿透能力强和良好的保密性等优点,被许多公司用以实现室内实时定位系统(RTLS)。到目前为止,基于超宽带技术的实时定位系统主要有 Ubisens 的 Ubisense RTLS 和 Zebra Technologies 的 Dart RTLS 等^[4]。

收稿日期:2017-03-01

修回日期:2017-07-05

网络出版时间:2017-11-15

基金项目:国家自然科学基金(61373139)

作者简介:金仙力(1978-),男,博士,副教授,研究方向为形式化方法、Web 服务和信息安全等;赵道明(1992-),男,硕士生,研究方向为超宽带室内定位和物联网技术等。

网络出版地址: <http://cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20171115.1128.020.html>

利用超宽带技术进行定位的过程无法规避定位误差的出现。这些误差会直接影响定位精度,在一些应急场景中定位误差会导致安全隐患。导致超宽带定位误差产生的主要问题是 NLOS (none-line-of-sight)。NLOS 问题是指在信号多径传播过程中,没有直射路径,只存在反射和衍射路径,或者检测不到直射路径的情况。与此相反,不经过任何障碍物直线传播到达参考节点称为 LOS 传播。针对 NLOS 问题,当前的研究主要包含两类解决方案。一种是 NLOS 识别,即通过算法判断当前信号属于 NLOS 传播还是 LOS 传播。另一种方案是不区分 NLOS 和 LOS,对这些问题采用统一的校正方法进行校正^[9-8]。

CHAN^[9] 是一种基于到达时间差的经典误差校正算法。因其不需要递归即可给出双曲线方程的闭式解,计算简便,在理想高斯噪声环境下精度高等,非常适合在实际工程中应用。相较于视距环境,CHAN 算法在非视距环境下的定位性能下降明显^[10]。

文中从阐述 TDOA 算法原理出发,剖析不同分布 NLOS 误差对 CHAN 算法性能的影响。先对非视距环境下的 TDOA 测量值进行分组,再加权平均 CHAN 算法对各 TDOA 测量结果集的估计结果以改善 CHAN 算法的性能,提出 CHAN-LCCRW 算法。文中将对 CHAN 算法在视距和非视距环境下的性能进行比较,并通过与 CHAN 算法和 Taylor 算法的对比来验证 CHAN-LCCRW 算法的性能。

1 TDOA 定位方法

1.1 TDOA 定位原理

出于对 TOA 算法的改进,TDOA 算法不是直接使用信号到达时间来定位,而是用不同基站之间接收到同一目标发来信号的时间差来估算移动台位置。因此,与 TOA 算法相比,不需要在发送的信号中加入专门的时间戳,定位精度相对较高。信号的到达时间差的获取,实际应用中最常用的方式是利用相关性运算的方法^[11]。这种算法可以在基站和移动台不同步时,估算出 TDOA 的值。由于做到基站与移动台的同步十分复杂,所以借助相关估计产生 TDOA 测量值,而后利用定位算法得出估计坐标的方法的应用最为广泛。

对于任意一个 TDOA 值,实际上表示的是来自移动台的脉冲信号到达两个基站的时间的差值。由于信号在空气中传输的速率接近光速,故用 TDOA 值与光速的乘积可以表示移动台到两个基站之间的距离差为定值,满足双曲线方程的形式。两组双曲线方程联立即可得到两基站数据

1.2 TDOA 定位模型

如果在一个二维空间内采用 TDOA 定位,那么为了得到空间中位置为 $[x, y]^T$ 的移动台的坐标,至少需要三台定位基站参与定位。空间内共有 N ($N \geq 3$) 个基站参与了移动台的定位,假设每个基站的坐标分别为 $P_i = [x_i, y_i]^T, i = 1, 2, \dots, N$ 。为了方便应用,通常以一个基站的信号为基准,将其余基站的信号与之进行相关运算来产生 TDOA 值,假设为基站 1。用 $t_{i,1}$ 表示基站 i 与基站 1 之间的信号到达时间差, d_i 表示基站 i 到移动台的距离, $d_{i,1}$ 表示基站 i 与基站 1 到移动台的距离之差,则有以下式:

$$d_{i,1} = ct_{i,1} = d_i - d_1, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

另根据二维空间的欧氏距离公式有:

$$d_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = K_i - 2x_ix - 2y_iy + x^2 + y^2, i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中, $K_i = x_i^2 + y_i^2$ 。

将式(1)带入式(2)得:

$$d_{i,1}^2 + 2d_{i,1}d_1 + d_1^2 = K_i - 2x_ix - 2y_iy + x^2 + y^2 \quad (3)$$

式(3)等式两边同时减去 d_1^2 得:

$$d_{i,1}^2 + 2d_{i,1}d_1 = K_i - K_1 - 2x_{i,1}x - 2y_{i,1}y \quad (4)$$

其中, $x_{i,1} = x_i - x_1$ 表示基站 i 与基站 1 横坐标的差值; $y_{i,1} = y_i - y_1$ 表示基站 i 与基站 1 纵坐标的差值。显然,式(4)是关于未知数 x, y 和 d_1 的线性方程。

2 CHAN-LCCRW 定位误差校正算法

2.1 CHAN 算法

CHAN 算法对于移动台的估计位置的解法分为两种情况:

(1) 只有三个基站接收到目标信号。

当系统中只有三个基站接收到移动台的脉冲信号,即 $i = 2$ 和 $i = 3$ 时,将式(4)组成矩阵方程然后求解可得:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} d_{2,1} \\ d_{3,1} \end{bmatrix} d_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ d_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (5)$$

将式(5)带入式(2)可以得到关于 d_1 的两个候选解,根据可行域限制排除掉一个解后,可以得到 d_1 的解,带入式(5)得到估计坐标。

(2) 存在四个或更多基站接收到目标信号。

当存在四个及以上基站接收到移动台的脉冲信号时,令 $\mathbf{z}_a = [x, y, d_1]^T$ 。首先假设 \mathbf{z}_a 的各元素之间相互独立,那么其最大似然估计为:

$$\mathbf{z}_a = \operatorname{argmin} \{ (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a)^T \Psi^{-1} (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a) \} =$$

$$(\Psi^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \Psi^{-1} \mathbf{h} \quad (6)$$

其中,

$$\mathbf{h} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ d_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \\ \vdots \\ d_{N,1}^2 - K_N + K_1 \end{bmatrix}, \mathbf{G}_a = - \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} & d_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} & d_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N,1} & y_{N,1} & d_{N,1} \end{bmatrix},$$

$\Psi = c^2 \mathbf{B} \mathbf{Q} \mathbf{B}$, \mathbf{Q} 为 TDOA 协方差矩阵, $\mathbf{B} = \text{diag}\{d_2, d_3, \dots, d_N\}$ 。

式(6)可以近似表示为:

$$\mathbf{z}_a' \approx (\mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{h} \quad (7)$$

当采用超宽带进行室内定位时,一个基站的覆盖范围半径普遍设置在 50 m 以内,故 CHAN 算法在处理较近距离的信号源定位时先采用式(7)计算出初步估计位置,之后就可以计算出待测标签到各个基站的距离初步估计值,从而得到 \mathbf{B} 和 Ψ 的近似值,然后再用式(6)得到第一次最大似然估计的估计结果 $\tilde{\mathbf{z}}_a$ 。

令 $\tilde{\mathbf{z}}_a$ 的三个分量分别为 $\tilde{z}_{a,1}$, $\tilde{z}_{a,2}$ 和 $\tilde{z}_{a,3}$ 。 $\mathbf{z}_a' =$

$\begin{bmatrix} (x - x_1)^2 \\ (y - y_1)^2 \end{bmatrix}$, 那么其最大似然估计为:

$$\mathbf{z}_a' = (\mathbf{G}_a^T \Psi^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \Psi^{-1} \mathbf{h}' \quad (8)$$

$$\text{其中, } \mathbf{h}' = \begin{bmatrix} (\tilde{z}_{a,1} - x_1)^2 \\ (\tilde{z}_{a,2} - y_1)^2 \\ \tilde{z}_{a,3}^2 \end{bmatrix}, \mathbf{G}_a' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \Psi' = 4\mathbf{B}'$$

$(\mathbf{G}_a^T \Psi^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{B}'$, $\mathbf{B}' = \text{diag}\{\tilde{z}_{a,1} - x_1, \tilde{z}_{a,2} - y_1, \tilde{z}_{a,3}\}$ 。

根据第二次最大似然估计的结果 \mathbf{z}_a' , 最终得到的移动台估计坐标为:

$$\mathbf{z} = \pm \sqrt{\mathbf{z}_a'} + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.2 CHAN-LCCRW 算法的主要思想

文中提出的 CHAN-LCCRW 误差校正算法,根据超宽带定位系统产生的多组 TDOA 测量值,通过 CHAN 算法得到校正过系统误差的初步估计坐标,再采用残差加权的方式来抑制 NLOS 误差对定位结果的影响。

残差是用来描述一个定位估计结果与一组 TDOA 测量之间的接近程度,通常在 NLOS 误差是系统的主要误差来源时,一组 TDOA 测量中受到 NLOS 影响越大,其计算出的残差值越大^[12]。残差值还受到一组测量元素个数的影响,因此文中采用标准化残差来衡量一组 TDOA 测量受到 NLOS 的影响。标准化残差是指残差的平方和除以该组的元素个数,定义如下:

$$\tilde{R}(\hat{x}, \hat{y}, T) = \left[\sum_{i \in T} [d_{i,1} - \sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2} + \sqrt{(\hat{x} - x_1)^2 + (\hat{y} - y_1)^2}]^2 \right] / \text{size}(T) \quad (10)$$

CHAN-LCCRW 算法的主要思想如下:首先对包含 n 个 TDOA 测量结果的结果集应用 CHAN 算法,按照式(10)计算出标准化残差。然后依次将整个测量结果集中的第 i 个 TDOA 测量结果移出结果集,得到 n 组测量结果集,分别对 n 组测量结果集应用 CHAN 算法进行计算,按式(10)计算出相应的标准化残差值。将上一步中标准化残差最小的测量结果集作为新的候选集,执行上步,至当前候选集中元素个数等于两个为止。至此按式(11)对获取的所有中间坐标做残差加权得到最终的估计坐标 $\hat{\mathbf{z}}$ 。

$$[\hat{x}, \hat{y}]^T = \frac{\sum_{k=1}^N [\hat{x}_k, \hat{y}_k]^T (\tilde{R}(\hat{x}_k, \hat{y}_k, T_k))^{-1}}{\sum_{k=1}^N (\tilde{R}(\hat{x}_k, \hat{y}_k, T_k))^{-1}} \quad (11)$$

为了减小计算量以提高系统的实时性,对残差加权算法进行了改进,采取一种低计算量的残差加权方法^[13]。当系统中有很多基站接收到来自移动台的信号时,能够大幅减少计算数。其与传统残差加权的计算估计坐标次数对比如表 1 所示。

表 1 两种算法估计坐标的计算次数对比

收信基站数	改进残差加权法	残差加权法
3	1	1
4	4	4
5	8	12
6	13	26
7	19	57
8	26	120

以在二维空间为例,假设共有 M 个基站接收到来自移动台的信号。CHAN-LCCRW 算法的步骤描述如下:

Step1: 处理 M 个基站检测到的待测目标信号。以某一基站为参考站,通过相关运算产生了 $M - 1$ 个 TDOA 测量值。

Step2: 如果 $M = 3$, 跳转到 Step8; 如果 $M > 3$, 跳转到 Step3; 否则测量不足, 结束。

Step3: 通过 CHAN 算法根据 $M - 1$ 个 TDOA 测量值计算出估计坐标 $\hat{\mathbf{z}}$, 对该坐标按照式(10)计算出标准化残差值 \tilde{R}_{es} , 令该 $M - 1$ 个 TDOA 测量值的集合为 S_{\min} , 并将坐标加入候选集 S_c 。

Step4: 假设 S_{\min} 中共有 P 个元素, 分别将第 i 个元素从 S_{\min} 中移除, 共产生 P 个包含 $P - 1$ 个元素的测量值的组合, 记作 $C_{\text{temp}} = \{S_1, S_2, \dots, S_P\}$ 。

Step5: 如果 P 大于 3, 跳转到 Step6; 否则, 跳转到 Step7。

Step6: 对 C_{temp} 中每一种组合应用 CHAN 算法计算

出估计坐标 \hat{x} 。对每一组坐标按照式 (10) 计算出标准化残差值 \tilde{R}_{es} ，并将标准化残差值最低的一组为 S_{min} ，并将坐标加入候选集 S_c 。跳转到 Step4。

Step7: 利用三基站 CHAN 算法计算出估计坐标 \hat{x} ，计算标准化残差值 \tilde{R}_{es} ，并加入候选集 S_c 。

Step8: 将候选集 S_c 中所有的坐标和对应的标准化残差值的倒数按式 (11) 相乘再求和后除以标准化残差的倒数和，最后得到移动台的估计坐标。

2.3 CHAN-LCCRW 算法的流程图

根据 CHAN-LCCRW 算法的步骤，绘制该算法的流程图，如图 1 所示。

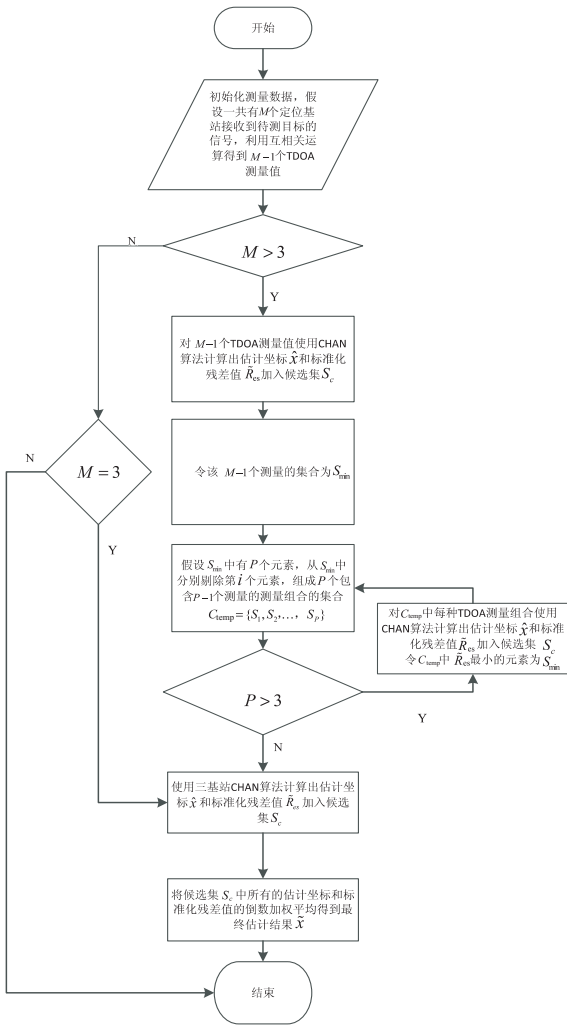


图 1 CHAN-LCCRW 算法流程图

3 仿真与分析

3.1 实验设置

目标区域为边长为 50 m 的正六边形，以正六边形的中心为坐标原点，七个基站分别分布在坐标原点和六个顶点处。基站坐标分别是 $(50\sqrt{3}, 0)$ ， $(-50\sqrt{3}, 0)$ ， $(50\sqrt{3}/2, 75)$ ， $(-50\sqrt{3}/2, 75)$ ， $(-50\sqrt{3}/2, -75)$ ， $(50\sqrt{3}/2, -75)$ ， $(0, 0)$ 。在视距环境下，测

量噪声服从标准的高斯分布。而在非视距环境下，许多文献采用正均值高斯分布、指数分布和瑞利分布等^[14-17]来描述 NLOS 误差的分布情况。本节将分别在视距和非视距环境下对 CHAN 算法和提出的 CHAN-LCCRW 算法进行仿真对比分析。

寻找合适的评价指标来表示出定位的精度对于定位误差校正算法的性能分析至关重要。在现有的研究中，广泛采用误差累积分布函数和均方根误差来衡量一个定位方法的定位精度和一种误差校正算法的性能。均方根误差 (root mean square error, RMSE) 是指在有限次的测量中，将每次测量值与对应的真实值误差的平方值求和后，再取平均值，最后求平方根后的结果。累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 给出与某个分布相关联的累积概率。累计分布函数可以给出误差低于特定值的概率，所以其在实际工程应用中常用于描述定位系统的精度范围。

3.2 仿真结果分析

图 2 中给出了在视距以及非视距环境下 CHAN 算法定位性能与参与定位的基站数的关系。结果表明，随着接收到目标信号的基站数的增加，CHAN 算法的 RMSE 不断降低。这是由于基站数的增加可以提供更多的冗余 TDOA 测量值，使得 CHAN 算法的结果更加准确。在 NLOS 误差分别服从高斯分布、瑞利分布和指数分布时，CHAN 算法定位的 RMSE 值均远大于 LOS 环境下的 RMSE 值，在参与定位的基站数较少时，定位误差由厘米级增加到米级。

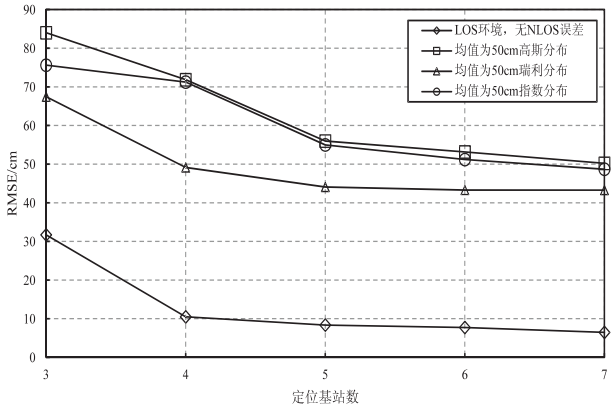


图 2 不同环境下 CHAN 算法的定位性能

克拉美罗下界 (Cramér-Rao low bound, CRLB) 是对于参数估计问题提出的，为所有无偏估计量的方差提供了一个下限。图 3 为 NLOS 误差满足不同均值的指数分布时，对 CHAN 算法、Taylor 算法和 CHAN-LCCRW 算法的均方根误差情况进行仿真的结果，并与克拉美罗下界进行比较。在 NLOS 误差较小时，三种算法的定位性能相当。随着 NLOS 误差的增大，CHAN-LCCRW 算法的定位性能与 CHAN 算法相比优势较大，体现了对 NLOS 误差较好的抑制作用。文

中算法具有与 Taylor 算法较为接近的均方根误差值,但较 Taylor 算法解决了初值难以选取和需要迭代计算的问题。

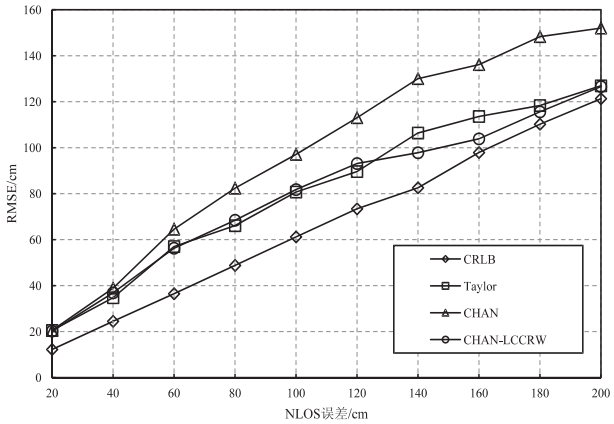


图3 不同 NLOS 误差下各算法的定位性能

图4展示了在 NLOS 误差服从均值为 2 m 的指数分布时,各算法的定位误差的累积分布函数。CHAN-LCCRW 算法有约 50% 的概率将定位误差控制在 1 m 以内,而对于 Taylor 算法和 CHAN 算法,其概率分别为 40% 和 30%。定位误差小于 2 m 时,表明 NLOS 误差受到了抑制。CHAN-LCCRW 算法有效抑制 NLOS 误差的概率为 97% 左右,超过 Taylor 算法和 CHAN 算法 10% 以上。综上所述,CHAN-LCCRW 算法具有较高的定位精度,适合应用到实际工程。

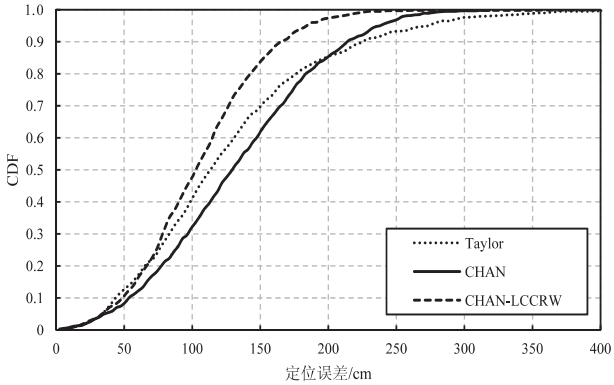


图4 各算法的累积分布函数

4 结束语

定位精度一直是基于超宽带的室内定位系统的关键性能属性,提高定位精度的主要手段就是对定位误差进行校正。为了进一步提高非视距环境下 CHAN 算法的精度,分析了不同分布的 NLOS 误差使 CHAN 算法精度衰退的程度。利用残差加权的思想对 CHAN 算法进行改进,提出了 CHAN-LCCRW 算法,对误差实施了校正,最后应用 Matlab 完成该算法的仿真实验。结果表明,CHAN-LCCRW 算法有效抑制了 NLOS 误差,提高了 CHAN 算法在非视距环境下的定位精度。万方数据

参考文献:

[1] 胡永利,孙艳丰,尹宝才. 物联网信息感知与交互技术[J]. 计算机学报,2012,35(6):1147-1163.

[2] GEZICI S,TIAN Z, GIANNAKIS G B,et al. Localization via ultra-wideband radios:a look at positioning aspects for future sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine,2005,22(4):70-84.

[3] 周傲英,杨 彬,金澈清,等. 基于位置的服务:架构与进展[J]. 计算机学报, 2011,34(7):1155-1171.

[4] 班 贺. 基于 RFID 技术的仓储管理系统研究与应用[D]. 南京:南京理工大学,2015.

[5] KHODJAEV J,PARK Y,MALIK A S. Survey of NLOS identification and error mitigation problems in UWB-based positioning algorithms for dense environments[J]. Annals of Telecommunications,2010,65(5):301-311.

[6] 贺远华,黎洪生. 无线传感器网络节点的非视距定位方案研究[J]. 计算机工程与应用,2010,46(25):82-84.

[7] BARTOLETTI S,GIORGETTI A,WIN M Z,et al. Blind selection of representative observations for sensor radar networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015,64(4):1388-1400.

[8] 吴绍华, 张钦宇,张乃通. 密集多径环境下 UWB 测距的 NLOS 误差减小方法[J]. 电子学报,2008,36(1):39-45.

[9] CHAN Y T,HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,1994,42(8):1905-1915.

[10] 陆 音,王宝全,丘鹏玮. CHAN 算法在 LOS 和 NLOS 环境下的定位研究[J]. 计算机技术与发展,2015,25(9):61-65.

[11] CARTER G C. Coherence and time delay estimation[J]. Proceedings of IEEE,1987,75(2):236-255.

[12] CHEN P C. A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation[C]//Wireless communications and networking conference. [s. l.]:[s. n.],1999:316-320.

[13] JIAO L,XING J,ZHANG X,et al. LCC-Rwgh:a NLOS error mitigation algorithm for localization in wireless sensor network[C]//International conference on control and automation. [s. l.]:IEEE,2007:1354-1359.

[14] BING L,WEI C,BIN W. A robust wireless sensor network localization algorithm in mixed LOS/NLOS scenario[J]. Sensors,2015,15(9):23536-23553.

[15] 郑 飞,郑继禹. 基于 TDOA 的 CHAN 算法在 UWB 系统 LOS 和 NLOS 环境中的应用研究[J]. 电子技术应用, 2007,33(11):110-113.

[16] 王建辉,崔维嘉,胡捍英. 基于神经网络的鲁棒 NLOS 误差抑制算法[J]. 计算机工程,2011,37(24):7-9.

[17] 肖 竹,谭光华,李仁发,等. 无线传感器网络中基于超宽带的 TOA/AOA 联合定位研究[J]. 计算机研究与发展, 2013,50(3):453-460.