

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108001

基于超宽带的 TDOA 相邻单元协同定位技术*

韦子辉^{1,2,3} 王世昭¹ 叶兴跃¹ 马英杰¹ 李小阳¹ 方立德^{1,2,3}

(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心 保定 071002;
3. 河北省能量计量与安全检测技术重点实验室 保定 071002)

摘要: 针对目前超宽带 TDOA 分单元定位系统存在位置多解性、定位精度低等问题,提出了相邻单元协同定位方法以及基于改进樽海鞘群算法的协同定位方程解算算法。该方法通过汇总相邻单元内收到同一定位请求信号的全部测量值,使坐标解算不再局限于一个时钟同步单元内,由此也导致参与位置计算的测量值个数与基站布局不确定性增加,Taylor 算法无法满足解算要求,进而使用改进樽海鞘群算法代替 Taylor 算法进行协同定位位置计算,最终求得待测点位置坐标。6 基站相邻单元协同定位实验结果表明,各测量点的 R95 值处于 12~15 cm 之间,最大残余误差处于 16~23 cm 之间。所提方法无需进行多参量判断取舍位置信息,有效解决了位置多解性问题并提高了定位精度。

关键词: 超宽带;TDOA 定位;多解性问题;单元协同定位;改进樽海鞘群算法

中图分类号: TN919.72;TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Cooperative location technology of TDOA adjacent units based on ultra wideband

Wei Zihui^{1,2,3} Wang Shizhao¹ Ye Xingyue¹ Ma Yingjie¹ Li Xiaoyang¹ Fang Lidc^{1,2,3}

(1. School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China;
2. National & Local Joint Engineering Research Center of Metrology Instrument and System, Baoding 071002, China;
3. Hebei Provincial Key Laboratory of Energy Metering and Safety Testing Technology, Baoding 071002, China)

Abstract: Aiming at the problems of the current TDOA unit positioning system of ultra-wideband, such as multi-solution of position and low positioning accuracy. A cooperative positioning method of adjacent units and a cooperative positioning equation solving algorithm based on improved salphus swarm algorithm are proposed. In this method, by summarizing all the measured values of the same positioning request signal received in adjacent units, the coordinate solution is no longer limited to one clock synchronization unit, which also leads to an increase in the uncertainty of the number of measured values and the layout of base stations involved in the position calculation. Taylor algorithm cannot meet the solution requirements, so the improved salphus swarm algorithm is used instead of Taylor algorithm to calculate the cooperative positioning position, and finally the position coordinates of the point to be measured are obtained. The experimental results of the cooperative positioning of adjacent units of six base stations show that the R95 value of each measuring point is between 12 cm and 15 cm, and the maximum residual error is between 16 cm and 23 cm. The method proposed does not need multi-parameter judgment to choose or reject position information, which effectively solves the problem of multi-solution of position and improves the positioning accuracy.

Keywords: ultra-wideband location; TDOA location; multi-solution problem; unit cooperative location; improved salphus swarm algorithm

0 引言

超宽带(ultra wideband, UWB)系统传输一系列持续

时间为纳秒级的“高斯单周期脉冲”,在多径环境中可以提供良好的多径可分辨性,因而非常适合精确的室内测距和定位应用^[1-2]。UWB 定位中以基于时间测量的定位方法占

收稿日期:2021-10-03

* 基金项目:国家自然科学基金(61475041)、京津冀协同创新共同体建设专项(20540301D)、河北省自然科学基金重点项目(F2021201031)资助

主导地位^[3-5],主要包括到达时间(time of arrival, TOA)和到达时间差(time difference of arrival, TDOA)两种方法,其中 TDOA 定位只需要实现基站间时钟同步以及标签到基站的单向数据传输,测量标签信号到达各基站的时间差进行位置计算,因此非常利于提升定位系统的标签容量^[6]及标签低功耗设计。当定位区域面积较大时 TDOA 定位系统通常需要铺设大量基站,理想方案是实现定位区域内全部基站的时钟同步后进行 TDOA 值测量^[7]。然而 UWB 信号传输距离有限,主基站与其相距较远的从基站需要采用多跳网络实现时钟同步,但应用多跳网络必然会造成时钟同步的误差累积^[8-9],严重影响到达时间差测量的精度。

因此在大面积定位中常根据时钟同步单元(时钟同步单元包括 1 个主基站以及多个与主基站进行单跳网络时钟同步的从基站)的分布将定位区域划分成多个定位单元,形成 TDOA 分单元定位。分单元定位系统采用各定位单元接收到定位请求信号后独立完成定位计算的方式^[10],但是同一标签发射的定位请求信号通常会被相邻的定位单元同时接收到,导致在噪声环境中存在相邻定位单元将同一标签定位在不同位置的问题,造成定位系统稳定性下降。针对此问题,Xue 等^[11]提出在 TDOA 分单元独立定位中通过标签信号到达各主基站的信号强度(received signal strength indication, RSSI)来判定距离标签最近的主基站,并由此主基站所在的定位单元负责位置定位。然而 RSSI 受遮挡物、天线方向影响容易造成误判导致不能从根本上解决“位置多解性”问题^[12]。

针对 TDOA 分单元独立定位造成的多解性问题,本文提出了一种相邻单元协同定位方法。此方法仍在各定位单元内独立测量到达时间差,但解算目标位置时汇总针对同一标签信号测量的 TDOA 值并全部代入到计算方程组中,从而得到唯一有效值。同时单元协同导致 TDOA 方程组的多变性和复杂性增加,为此提出改进樽海鞘群算法(improved salp swarm algorithm, ISSA)用于求解,通过实验验证 ISSA 算法的计算精度优于 Taylor 算法、LM 算法(levenberg-marquardt)^[13],十分接近穷举法,并且计算速度优于同类群体智能算法。搭建 6 基站相邻单元定位系统进行现场测试,实验结果表明单元协同定位方法在室内环境中最大定位误差处于 16~23 cm 之间,R95 处于 12~15 cm 之间,能够有效解决 TDOA 分单元独立定位的多解性问题,提高了定位稳定性和精度。

1 TDOA 相邻单元协同定位方法

1.1 TDOA 分单元定位多解性问题

本文通过仿真实验说明多解性问题,TDOA 分单元独立定位仿真实验设置 2 个相邻的定位单元,其中 1 单元内主基站位于 (200, 200),从基站位于 (200, 600)、(600, 200)、(600, 600);2 单元内主基站位于 (600, 200),从基站位于

(600, 600)、(1 000, 200)、(1 000, 600);其中基站 (600, 200)即为 2 单元主基站也为 1 单元从基站,基站 (600, 600)为两个单元的共用从基站。分别针对 4 个标签位置 (400, 200)、(400, 400)、(600, 200)、(600, 600)定位,其中 (400, 200)、(400, 400)位于 1 单元中心线,与各单元主基站距离相同,(600, 200)、(600, 600)位于 1、2 单元交界。TDOA 测量值中加入 $N \sim (0, 5^2)$ 的高斯干扰噪声,两个单元分别独立通过定位方程式(1)对 4 个待测标签进行 100 次定位,实验结果如图 1 所示。图像表明在噪声环境中相邻的定位单元对于同一标签的定位结果偏差较大,且位于中心线的标签无法根据 RSSI 准确选取定位结果,造成定位系统稳定性降低。

$$T_{1i} = (\| \mathbf{X}_i - \mathbf{a}_1 \| - \| \mathbf{X}_i - \mathbf{a}_i \|) / c \quad (1)$$

式中: T_{1i} 为标签信号到达主、从基站的 TDOA 测量值; \mathbf{X}_i 为待测标签位置; \mathbf{a}_1 为单元内主基站位置; \mathbf{a}_i 为单元内第 i 个从基站位置, $(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_i, \mathbf{X}_i) \in \mathbb{R}^D$, D 在二维定位中设置为 2; c 为标签信号传输速度,取值 299 792 458 m/s。

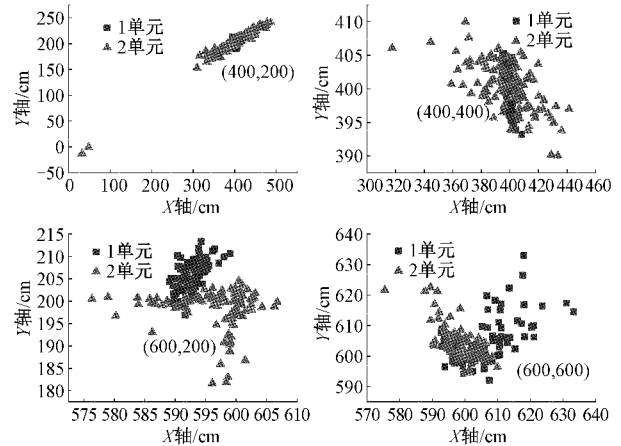


图 1 TDOA 分单元独立定位结果

1.2 TDOA 相邻单元协同定位方程组

TDOA 相邻单元协同定位仍采用分单元单跳时钟网络实现各单元内的主、从基站间的时钟同步,不同的是当相邻时钟同步单元接收到同一标签的定位请求信号后,汇总不同定位单元针对这一信号的全部 TDOA 测量值进行定位计算。然而各单元间的测量值因时钟基准不同引入一定量的测量误差,因此通过相邻单元的时钟基准频率比值将各单元的测量值调整为同一时钟基准,从而构建相邻单元协同定位模型,如式(2)所示。

$$\begin{cases} T_{1i}^1 = (\| \mathbf{X}_i - \mathbf{a}_1^1 \| - \| \mathbf{X}_i - \mathbf{a}_i^1 \|) / c \\ T_{1i}^2 \times k_{12} = (\| \mathbf{X}_i - \mathbf{a}_1^2 \| - \| \mathbf{X}_i - \mathbf{a}_i^2 \|) / c \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_{1i}^1 为 1 单元测量值; T_{1i}^2 为 2 单元测量值; $\mathbf{a}_1^1, \mathbf{a}_i^1$ 分别为 1、2 单元内主基站位置; $\mathbf{a}_i^1, \mathbf{a}_i^2$ 分别为 1、2 单元内第 i 个从基站位置; k_{12} 为 1 单元与 2 单元的时钟基准频率比值,即为 1、2 单元内主基站的时钟频率比值,计算公式如式(3)所示。

$$k_{12} = \frac{f_M^1}{f_M^2} = \frac{\Delta T_M^1}{\Delta T_M^2} \quad (3)$$

式中: f_M^1 为 1 单元主基站的时钟频率; f_M^2 为 2 单元主基站的时钟频率。由时钟同步架构可知, 2 单元的主基站也是 1 单元的从基站, 1 单元主基站定时 ΔT_M^1 周期发送对时信号, 2 单元主基站接收到对时信号的时间间隔为 ΔT_M^2 , 由发送、接收时间间隔推导时钟频率。

2 TDOA 相邻单元协同定位解算算法

相邻单元协同定位通过增加参与定位计算的测量值个数来提高定位精度及稳定性, 但也直接导致基站位置布局更加多样化, TDOA 方程组更为复杂, Taylor 算法无法满足位置解算要求。群体智能算法只需要分析数据内部的规律和内在联系, 即可自组织、自适应地完成优化问题的求解, 并且展现了良好的计算精度以及稳定性。其中 SSA 算法 (salp swarm algorithm) 寻优结构简明, 并且在 TDOA 定位应用中稳定性较强^[14]。但是 SSA 算法前期迭代速度较慢且相较于 Taylor 算法计算时间较长, 因此本文提出 ISSA 算法减少计算时长, 进一步满足 TDOA 相邻单元协同定位计算的精确性与实时性。

群体智能算法寻求最优解的关键在于适应度函数。在相邻单元协同定位系统中已知参量只有各基站位置及相应的 TDOA 测量值, 本文设计的适应度函数 $Fit(\mathbf{X})$ 根据求解值 \mathbf{X} 计算得到的各个距离差与实际测量所得距离差的一致性判断最优解, 如式(4)所示。由式(4)可知适应度函数模型为单谷函数, 适应度值越小意味着求解精度越准确, 因此不需要采用莱维飞行^[15]、种群变异^[16]等策略提升 SSA 算法跳出局部最优解的能力。

$$Fit(\mathbf{X}) = \sum_{m=1}^2 \sum_{i=1}^I [(\|\mathbf{X} - \mathbf{a}_i^m\| - \|\mathbf{X} - \mathbf{a}_i^m\|) - cT_{i1}^m]^2 \quad (4)$$

式中: \mathbf{X} 为求解坐标值; m 为参与定位计算的定位单元编号; I 为 m 单元内参与定位计算的从基站总个数; \mathbf{a}_i^m 为 m 单元内主基站的坐标值; \mathbf{a}_i^m 为 m 单元内第 i 个从基站的坐标值; T_{i1}^m 为 m 单元内标签信号到达主基站与第 i 个从基站的 TDOA 测量值。

2.1 改进樽海鞘群算法

ISSA 算法具体执行步骤如下:

1) 种群初始化。采用数论中的佳点集原理^[17] 提供均匀的初始种群位置分布, 以保证樽海鞘种群的初始多样性, 提升前期的全局搜索能力, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} p = 2n \times \cos(2\pi d/7) \\ x_d^n = lb_d + (ub_d - lb_d) \times \text{mod}(p, 1) \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_d^n 为第 n 个樽海鞘的第 d 维位置值; n 为 $[1, N]$ 之间的整数, N 为樽海鞘种群数量; d 为 $[1, D]$ 之间的整数, D 为樽海鞘个体维度, 二维定位取值为 2; ub_d 和 lb_d 为搜索空间的第 d 维上、下界; $\text{mod}()$ 为取模运算。

2) 计算初始适应度值。利用式(4)计算并按照适应度值从小到大排序, 选取最小适应度值的樽海鞘位置作为食物位置 F_d , 且按照排序的前 50% 樽海鞘作为领导者, 剩余樽海鞘作为追随者。

3) 领导者位置更新。SSA 领导者以食物为中心呈放射性向搜索空间无目的移动, 导致局部搜索能力弱, 造成收敛速度缓慢^[18]。然而 ISSA 领导者按照位置更新公式(6)进行移动, 增强领导者移动的目的性, 使领导者逐渐向食物靠拢, 增强局部搜索能力。

L_d^n 设置为领导者的周期移动距离与方向参量, 根据牛顿运动定律可以表示为 $v_0 t + at^2/2$ 。在迭代过程中时间 t 即为迭代次数的增量, 值为 1; v_0 领导者初始速度, 在每次迭代开始时采用上一迭代周期的移动速度, 即 L_d^n/t ; a 为领导者加速度, 计算公式为 $(v - v_0)/t$, 由于领导者向食物移动, 因此 $v = (F_d - x_d^n)/t$ 。其中 $t=1$, 则 $L_d^n = L_d^n/2 + (F_d - x_d^n)/2$, 但是领导者的职能是围绕食物探索最优解, 因此将公式中的常数换为变量, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} L_d^n = \omega L_d^n + 2r_1(F_d - x_d^n) \\ x_d^n = x_d^n + L_d^n \end{cases} \quad (6)$$

式中: L_d^n 数值限制在搜索空间大小的 10%; ω 为线性惯性权重, 计算公式如式(7)所示; r_1 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min})l/L \quad (7)$$

式中: ω_{\max} 为初始权重, 取值 1.0; ω_{\min} 为最小权重, 取值 0.1; l 为当前迭代次数; L 为最大迭代次数。

4) 追随者位置更新。ISSA 追随者按照位置更新公式(8)进行移动。

$$x_d^n = (x_d^n + x_d^{n-1})/2 \quad (8)$$

5) 食物位置更新。首先通过式(9)将樽海鞘位置修正至搜索空间内, 然后利用式(4)计算移动后的樽海鞘适应度值。如果最优樽海鞘适应度值小于当前食物适应度值, 则以此樽海鞘位置作为新的食物的位置。

$$\begin{cases} x_d^n = ub_d, & x_d^n > ub_d \\ x_d^n = lb_d, & x_d^n < lb_d \end{cases} \quad (9)$$

6) 种群数量变化。随着迭代次数增加, 搜索空间逐渐缩小, 仍使用初始种群数量会造成计算浪费。因此在迭代过程中采用种群数量变化公式, 缩减算法的运算量, 如式(10)所示。

$$N = N_{\max} - (N_{\max} - N_{\min})l/L \quad (10)$$

式中: N_{\max} 为初始种群数量, N_{\min} 为最小种群数量。

7) 重复步骤 3)~6), 当满足迭代终止条件时输出食物位置作为待测点的计算位置。

2.2 ISSA 算法性能分析

通过 MATLAB 仿真验证 ISSA 在相邻单元协同定位中的算法性能, 实验环境中设定 X 轴 1 200 cm, Y 轴 800 cm 的定位区域, 共设定 4 种典型的六基站相邻单元布局, 如图 2 所示。对比算法包括穷举法、Taylor、LM、IHHO^[19] 以及

SSA 等算法,其中各算法参数设置如下:穷举法采用 0.1 cm 步距搜索;Taylor 算法、LM 算法的迭代初始值为定位区域中心点;各群体智能算法初始种群数量为 50,最大迭代次数 L 为 100,迭代终止条件为到达最大迭代次数。仿真主机硬件配置为: Intel i7-8700 CPU, GT 710 显卡。

在不同布局中标签均由位置 (0, 0) 出发, X 方向移动步距为 20 cm, Y 方向移动步距为 10 cm, 移动至位置 (1 200, 800) 停止, 共经过 4 941 个不同位置。定位误差由求解坐标值 \hat{X} 与真实坐标值 X 间的欧式距离表示, 如式(11)所示, 所有计算结果保留 4 位有效数字。为保证实现结果不失一般性, 穷举法计算 50 次, 其余算法计算 1 000 次。

$$\Delta = \| \hat{X}_s - X \| \quad (11)$$

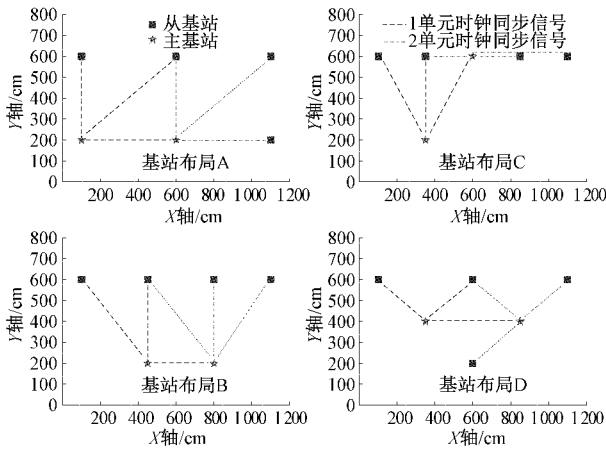


图 2 TDOA 相邻单元定位典型基站布局

1) 验证 ISSA 定位精度及计算速度

实验 1: 环境干扰噪声设定为 $N \sim (0, 10^2)$ 的高斯噪声, 记录在不同布局下各算法的定位平均误差以及平均耗时。表 1 为在不同布局情况下各定位算法的定位精度与计算时长性能对比, 其中定位精度的单位为 cm, 计算耗时单位为 ms。由数据可知, 针对相邻单元协同定位系统的基站多变性和数据复杂性, ISSA 算法在保证 SSA 算法高精度与稳定性的情况下有效缩减了计算时长, 使计算耗时接近 Taylor 算法, 并且定位精度与穷举法基本一致。

表 1 不同布局下各算法定位性能对比

算法	布局 A	布局 B	布局 C	布局 D	耗时
穷举法	10.34	13.33	14.83	16.26	8 625
Taylor	16.87	28.94	21.78	29.69	0.408 5
LM	13.51	17.60	19.43	23.28	0.432 8
IHHO	11.75	14.56	15.15	18.47	245.9
SSA	10.44	13.37	14.89	16.50	1.094
ISSA	10.41	13.27	14.82	16.37	0.611 2

2) 验证 ISSA 稳定性

实验 2: 在布局 A 中分别加入不同标准偏差的高斯噪

声作为干扰噪声, 记录各解算算法的计算精度随噪声增强的变化曲线, 如图 3 所示。随干扰噪声的增强, ISSA 的计算精度逐渐下降, 但是在不同噪声干扰下仍与穷举法计算精度十分接近, 并且误差增长幅度明显低于 Taylor 算法、LM 算法。由图 3 可知, ISSA 在相邻单元协同定位系统中定位精度较高, 稳定性较强, 不同噪声情况下误差波动较小, 与经典 SSA 算法及穷举法的性能曲线几乎重合。

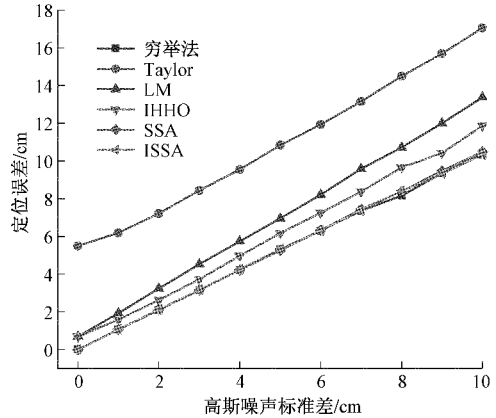


图 3 基站布局 A 中各算法精度随噪声增强变化曲线

综合两次实验结果可知, ISSA 算法相较于 Taylor 算法、LM 算法不再受迭代初始值约束, 在相邻单元协同定位中均展现了较高的定位精度和较强的稳定性, 更适合应用于更为复杂多变的 TDOA 协同方程求解。

3 系统性能测试及分析

搭建 6 基站两单元定位系统, 系统结构如图 4 所示。分别通过分单元独立定位方法与相邻单元协同定位方法进行静态实验以及动态实验验证系统性能。

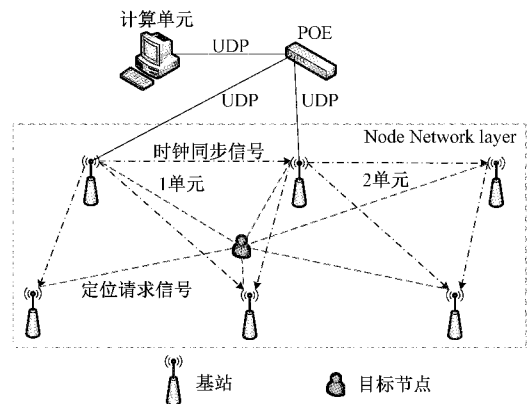


图 4 TDOA 定位系统现场搭建示意图

分单元独立定位方法: 当只有一个单元接收到定位请求信号则通过此单元进行位置计算, 当两个或多个相邻单元同时接收到同一个定位请求信号时, 通过目标历史位置以及通过多个单元同时进行独立位置计算来判定目标节点位于哪个单元内, 最终选取判定单元的计算值作为目标节

点位置,然而仍无法判定定位单元时则通过测量标签到达各单元主基站的 RSSI 选择定位单元并完成位置计算。

相邻单元协同定位方法:当只有一个单元接收到定位请求信号则通过此单元进行位置计算,当两个或多个相邻单元同时接收到同一个定位请求信号时则按照式(2)整合各单元测量的到达时间差并完成位置计算。

其中位置方程求解均采用 ISSA 算法。

3.1 静态实验

在实验场地铺设 6 个基站分为 2 个定位单元,1 单元主基站 A (0, 0),从基站 B (402, 0),C (0, 402),D (402, 402); 2 单元主基站 B (402, 0),从基站 D (402, 402),E (804, 0), F (804, 402),场地布局如图 5 所示。

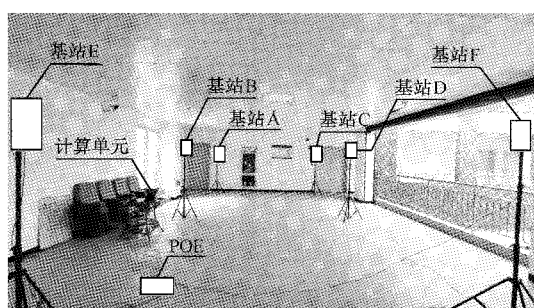
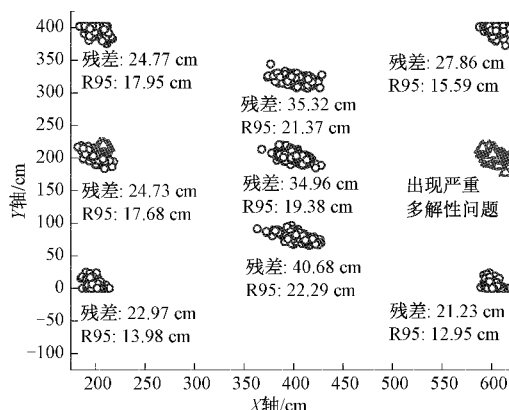


图 5 静态定位实验场地

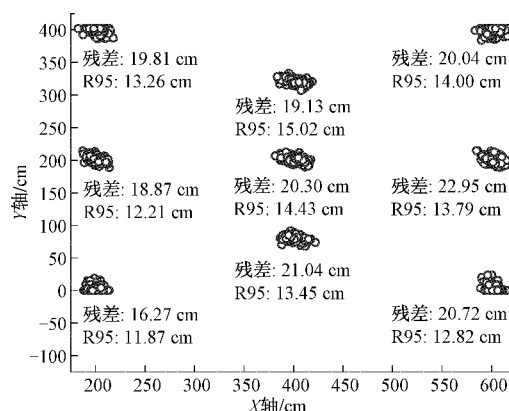
测试人员携带定位标签站立于 (201, 0)、(201, 201)、(201, 402)、(402, 80)、(402, 201)、(402, 320)、(603, 0)、(603, 201)、(603, 402) 等 9 个待测点分别进行 200 次定位计算。因为系统基站以及人员携带标签所在位置具有不确定性,所以采用残余误差以及 R95 评估系统性能,测量结果的最大残余误差以及 R95 误差值依次标记在实验结果图的测量点下方,结果均保留 4 位有效数字。

分单元独立定位方法的静态实验结果如图 6(a) 所示,在单元间交界区域位置计算因多解性影响误差波动较大,如对于 (402, 80)、(402, 201)、(402, 320) 等测量点的定位计算。而且对于 2 单元中心区域点 (600, 200) 的测量时出现了误差颇大的多解性问题,将目标节点位置多次定位在位置 (210, 210) 左右,因此在图中由“三角形”标注对于点 (600, 200) 的所有测量值,通过实验数据分析发现原因是 1 单元将目标节点定位在 2 单元区域内,然而 2 单元将目标节点定位在 1 单元内,利用 RSSI 判定选取了 2 单元的定位结果。分单元独立定位方法在 LOS 环境中最大残余误差处于 20~40 cm 之间,R95 处于 13~23 cm 之间。

相邻单元协同定位方法的静态实验结果如图 6(b) 所示,系统在视距(line of sight, LOS)环境中最大残余误差处于 16~23 cm 之间,R95 处于 12~15 cm 之间,相较于分单元独立定位方法不仅提升了定位精度,而且定位结果的分散性下降,系统性能更加稳定,尤其针对相邻单元连接区域的定位性能改善最为明显。



(a) 分单元独立定位静态实验结果



(b) 相邻单元协同定位静态实验结果

图 6 定位系统静态实验对比

3.2 动态实验

1 单元主基站 A (0, 0),从基站 B (724, 0), C (0, 724),D (724, 724); 2 单元主基站 B (724, 0),从基站 D (724, 724),E (1529, 0),F (1529, 724),场地布局如图 7 所示。

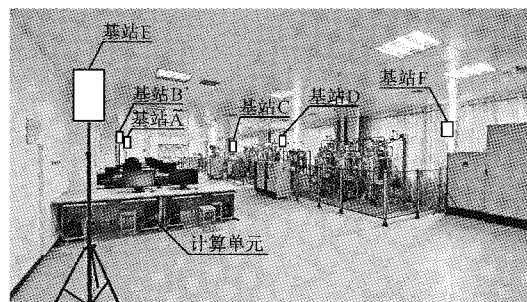
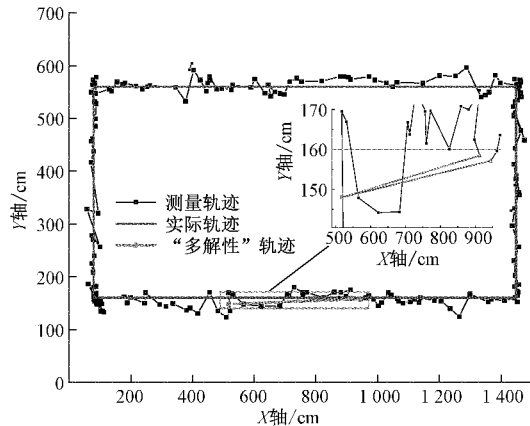


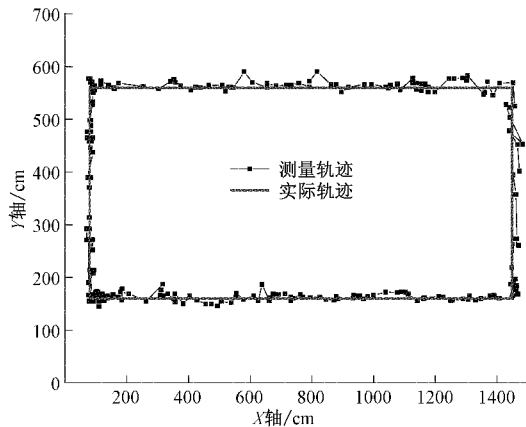
图 7 动态定位实验场地

测试人员首先使用米尺丈量轨迹,随后手持携带定位标签的支架严格按照轨迹行走进行动态实验,从测量点 (80, 160) 出发,经过 (1 449, 160)、(1 449, 560)、(80, 560),最终返回测量点 (80, 160),动态测量轨迹不加滤波处理。动态定位误差除去因硬件设备造成的系统误差外,也包含因人体行走过程中的身体摆动而引入的随机误差,因此不做定量分析。

在分单元独立定位方法中,虽然通过定位请求信号的 RSSI 判断目标节点所属的定位单元或者利用目标节点历史位置选择定位单元,从而对定位结果进行选择可以解决部分问题,但是在部分定位区域以及非视距(non line of sight, NLOS)环境中仍不能完全有效地解决多解性问题。如图 8(a)所示,动态定位出现了因多解性问题造成的折返轨迹,使测量轨迹出现严重偏差。相邻单元协同定位方法的动态实验轨迹如图 8(b)所示,相较于分单元独立定位方法的动态测量轨迹更为贴合测量人员实际行走轨迹。



(a) 分单元独立定位动态实验结果



(b) 相邻单元协同定位动态实验结果

图 8 定位系统动态实验对比

4 结 论

针对 TDOA 分单元定位的位置多解性问题,本文提出相邻单元协同定位方法,采用分单元测量、相邻单元测量数据融合的 TDOA 数据处理方式,使位置计算不再局限于单个定位单元,原理上解决了位置多解性问题,能够有效提升大规模 TDOA 定位系统的精确性和稳定性。并且在 TDOA 相邻单元协同定位方程求解方面,提出改进的 ISSA 算法代替 Taylor 算法,通过仿真实验验证 ISSA 算法的计算精度优于 Taylor 算法、LM 算法,并且在保证 SSA 算法的计算精度前提下有效提升了计算速度,将代码执行时间缩减 45%。本文进行现场 6 基站两单元定位实验,验

证了相邻单元协同定位方法在计算精度和稳定性方面的优势,提升定位误差 R95 至 12~15 cm 之间。

目前在 UWB 定位精度最大干扰因素是多径干扰,由于 TDOA 相邻单元协同定位容易造成测量数据冗余,为基站优选创造了条件,今后的研究中如果能够通过多径识别剔除受多径干扰的测量值数据,将有效提高大规模 TDOA 定位系统的精确度。

参考文献

- [1] YUAN S H, WANG H, XIE L H. Survey on localization systems and algorithms for unmanned systems [J]. *Unmanned Systems*, 2021, 9 (2): 129-163.
- [2] 李荣冰,王念曾,刘建业,等. 面向相对导航的 UWB 测距误差估计与补偿方法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(5): 28-35.
- [3] 卜伟雄,朱蕴璞,何子路. 基于交互式多模型的 UWB 定位算法及实验研究[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(4): 22-26.
- [4] FU S C, LI Y M, ZONG K, et al. Ultra-wideband pose detection method based on TDOA positioning model for boom-type roadheader[J]. *Aeu-International Journal of electronics and communications*, 2019, 99: 70-80.
- [5] ZAFARI F, GKELIAS A, LEUNG K K. A survey of indoor localization systems and technologies[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2019, 21(3): 2568-2599.
- [6] PEREZ-SOLANO J J, EZPELETA S, CLAVER J M. Indoor localization using time difference of arrival with UWB signals and unsynchronized devices[J]. *Ad Hoc Networks*, 2020, DOI: 10.1016/j.adhoc.2019.102067.
- [7] 陈浩,李起伟,王子龙. 基于改进 TDOA 在煤矿井下超宽带定位算法的研究[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(6): 96-102.
- [8] XUE B, LI Z T, LEI P Y, et al. Wicsync: A wireless multi-node clock synchronization solution based on optimized UWB two-way clock synchronization protocol[J]. *Measurement*, 2021, DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109760.
- [9] 邓学群,刘争红,郑霖,等. 无线传感网络低累积误差多跳时钟同步[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(7): 2177-2179.
- [10] GAO Q, SHEN C, ZHANG K. Network scalability for ultra-wideband real-time location systems based on vMISO [J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2018, DOI: 10.1155/2018/1563704.
- [11] XUE Y, SU W, YANG D, et al. RMLNet-A reliable wireless network for a multiarea TDOA-based

- localization system[J]. SENSORS, 2019, 19(20): 4374-4394.
- [12] 刘雨, 肖本贤, 尹柏强. 基于修正 RSSI 值的四边形加权质心定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 107-114.
- [13] GARCIA-FERNANDEZ J A, JURADO-NAVAS A, FERNANDEZ-NAVARRO M, et al. A comparative study between iterative algorithms for TDOA based geolocation techniques in real UMTS networks[J]. Mobile Networks & Applications, 2020, 25(4): 1290-1298.
- [14] 陈涛, 王梦馨, 黄湘松. 基于樽海鞘群算法的无源时差定位[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(7): 1591-1597.
- [15] LI Y, ZHU X Y, LIU J S. An improved moth-flame optimization algorithm for engineering problems[J]. Symmetry-Basel, 2020, 12(8): 1234-1264.
- [16] 陈连兴, 牟永敏. 一种改进的樽海鞘群算法[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(6): 1648-1652.
- [17] REN L F, LIU T, ZHAO Q J, et al. Method for measurement uncertainty evaluation of cylindricity error based on good point set[J]. Procedia CIRP, 2018, 75: 373-378.
- [18] REN H, LI J, CHEN H L, et al. Stability of salp swarm algorithm with random replacement and double adaptive weighting [J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 95: 503-523.
- [19] 马一鸣, 石志东, 赵康, 等. 基于改进哈里斯鹰优化算法的 TDOA 定位[J]. 计算机工程, 2020, 46(12): 179-184.

作者简介

韦子辉, 副教授, 博士, 主要研究方向为超宽带射频定位技术。

E-mail: zihui-wei@163.com

王世昭, 硕士研究生, 主要研究方向为定位算法、超宽带射频定位。

E-mail: wang_shizhao@163.com

叶兴跃, 硕士研究生, 主要研究方向为定位算法、NLOS 识别。

E-mail: hbu_xingyue@sina.com

马英杰, 硕士研究生, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: hbuyingjie@163.com

李小阳, 硕士研究生, 主要研究方向为定位算法、超宽带射频定位。

E-mail: 2829389169@qq.com

方立德(通信作者), 教授, 博士, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: fanglide@sina.com