

# 基于超宽带技术的无线定位系统设计

陈雷

(珠海优特电力科技股份有限公司, 广东 珠海 519000)

**摘要:** 随着基于位置信息的服务越发受到重视, 无线定位技术也得到了快速的发展; 其中, 超宽带技术具有测量精度高、功耗低的特点, 越来越被广泛地应用于无线定位系统中; 但是, 由于无线信号的传播容易受到环境干扰, 导致在复杂环境下, 定位精度急剧下降, 制约了这种定位技术的应用与推广; 针对超宽带无线定位系统中的这个问题, 提出了一种基于残留误差的聚类算法, 将原始定位数据进行重组后进行计算, 并过滤掉误差过大的结果, 再利用误差值进行计算结果的聚类处理, 进而得到最终的定位结果; 使用该算法的超宽带无线定位系统已经通过了工程验收(定位频率 2 Hz, 残留误差门限值 1.5 m, 置信距离差值门限 0.5 m, 迭代上限 10 000 次), 实际测试的结果表明该算法有效提升了定位精度, 满足了工程需要, 为无线定位技术的推广提供了重要的技术保障。

**关键词:** 超宽带技术; 无线定位系统; 残留误差; 聚类算法; 定位精度

## Wireless Location System Design Based on the UWB Technique

CHEN Lei

(Zhuhai Unitech Power Technology Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** With an increasing attention to the location-based service, wireless locating technique has developed rapidly. Ultra-Wide Band (UWB) locating technique has the characteristics of high measurement accuracy and low power consumption, which is more and more widely used in wireless locating systems. However, the propagation of wireless signals is easily disturbed by electromagnetic environment, leading to the severe decline in locating accuracy in complex situations, which restricts the application and promotion of this technique. To solve the problem of the UWB locating system, an optimised cluster algorithm is proposed with the aid of residual errors. Raw data is firstly reassigned into groups, and each group of data is used to obtain the coordinates as well as the residual error. After filtering those with exceeded residual errors, the remaining coordinates are processed by the clustering algorithm with the residual errors, and then the final locating result is obtained. The wireless locating system with the introduced algorithm is approved by several engineering projects (2 Hz of locating frequency, 1.5 m of residual error threshold, 0.5 m of confidence distance error threshold, 10 000 times of iteration upper limit). Practical results show that the algorithm effectively improves the locating precision and meets the engineering demands, which provides the technical support for promoting the wireless locating technique.

**Keywords:** UWB; wireless locating system; residual error; clustering algorithm; locating precision

## 0 引言

随着“智能城市”、“工业 4.0”、“中国制造 2025”等新兴概念不断涌入人们的视野, 基于位置信息的定位服务(LBS, location-based service)也越来越引起人们的重视, 定位技术渐渐被广泛的应用于各行各业之中<sup>[1-2]</sup>。在商业领域, 定位技术可以为商家提供更为高效的广告服务, 实现商品信息的准确投递; 在交通领域, 基于定位技术的导航服务, 可以提供路线引导、躲避拥堵、路况识别等功能, 解决了人们的出行烦恼; 在公共安全领域, 定位技术提供的位置信息, 在面临紧急事故时, 为人员的快速搜救创造了条件; 在工业领域, 定位技术为安全生产管控系统提供人员和设备的位置信息, 保障了生产过程中的人员安全和设备安全<sup>[2-5]</sup>。

近年来, 无线通信技术突飞猛进, 带动了无线定位技

术的发展, 快速补充了定位技术领域内的空白, 推动了相关技术的普及与应用<sup>[2]</sup>。借助蓝牙、ZigBee、Wi-Fi、射频识别(RFID, radio frequency identification)以及超宽带(UWB, ultra wide band)等新兴无线通信技术的出现与发展, 大大提升了无线定位系统的精度和响应速度, 更好地满足了人们对定位服务的需求<sup>[6]</sup>。其中, UWB定位技术具有抗多径效应、低功耗、低复杂性等优点, 被广泛的应用于高精度定位场景中<sup>[7-9]</sup>。

无线定位系统, 基于无线信号的传播特点来解析精确的位置信息, 常用的定位手段有: 接收信号强度(RSSI, received signal strength indication)、信号传播时间(ToF, time of flight)、信号到达接收机的时间差(TDoA, time difference of arrival)、信号到达角度(AoA, angle of arrival)等<sup>[6,9]</sup>。

收稿日期: 2022-04-22; 修回日期: 2022-05-23。

作者简介: 陈雷(1977-), 男, 内蒙古赤峰市人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护和自动控制技术方向的研究。

引用格式: 陈雷. 基于超宽带技术的无线定位系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 189-194, 202.

RSSI 定位手段是通过测量信号的接收强度来求解位置信息。常用的方法有两种：

1) 指纹定位：将多个信号的接收强度与预存的数据库进行比对，找到最为匹配的数据结果对应的位置信息，即为定位结果<sup>[10-11]</sup>；

2) 基于距离值的定位方法：根据信号传播模型，利用信号强度值计算信号传播的距离，再利用三角定位等算法求解出定位结果<sup>[12-13]</sup>。

由于信号强度的衰减情况受环境影响剧烈，且对于信号的传播难以精确建模，导致 RSSI 定位手段的定位精度较低，无法满足工程应用的需要<sup>[10-14]</sup>。

ToF 定位手段是一种基于距离值的定位方法，通过记录信号的发送时刻和接收时刻，计算信号在传播过程中的时间，再利用三角定位等算法求解定位结果<sup>[15-16]</sup>。常用的测距方法有单边双向测距和双边双向测距<sup>[17]</sup>。

相比于 RSSI 定位手段，ToF 定位手段对硬件的要求更高（需要精准地标记信号的收发时刻），能够达到的定位精度也更高<sup>[16-21]</sup>。随着电子器件和移动终端的快速发展，ToF 定位手段已经展现出比 RSSI 定位手段更广阔的应用场景<sup>[21]</sup>。

TDoA 定位手段通过记录信号到达各个接收机的不同时刻的差值，利用构造双曲线方程的方式求解位置信息<sup>[22-23]</sup>。使用该手段进行定位的前提是各接收机之间实现时钟同步，时钟同步差异越小，定位精度越高<sup>[24-25]</sup>。

TDoA 定位手段的定位精度与 ToF 定位手段基本相当，虽然算法较为复杂，但是系统可靠性更强，所以也被广泛地应用于各种无线定位系统中<sup>[22-26]</sup>。

AoA 定位手段通过使用具有方向性的接收天线阵列来感知信号的入射角，再利用三角定位法等算法计算位置坐标<sup>[27]</sup>。

相比于 ToF 和 TDoA 定位手段，AoA 定位对于硬件提出了更高的要求，且更易受到环境的影响，制约了该技术手段的应用<sup>[28]</sup>。所以，多数场景下，AoA 定位作为一种补充定位手段，以提升整个定位系统的定位精度<sup>[29]</sup>。

然而，无论应用哪种定位手段，都无法完全避免环境对于信号传播的影响，进而影响定位精度；尤其是在复杂环境中，由于多径效应的影响，定位精度损失严重<sup>[30]</sup>。为了解决多径问题，文献 [30-34] 提出了一系列算法及流程，但是在面对真正的工程问题时，这些方法对于定位精度的优化效果有限，无法满足工程应用的要求。

针对这个问题，本文提出了一种基于残留误差的聚类算法，并将之应用于现有的 UWB 定位系统中。经过工程现场实测数据的检验，该算法能够有效提升定位系统的定位精度，满足工程实际对位置服务精度的要求；同时，使用该算法虽然会占用更多的内存（小于 800 MB）、且消耗更多的时间（小于 10 ms），但是不影响工程中的使用。所以，本算法的提出与应用，为无线定位技术的推广提供了重要

的技术保障。

在本文以下章节中，章节 1 介绍了 UWB 定位系统的典型架构和基本原理；章节 2 提出了基于残留误差的聚类算法；章节 3 描述了工程现场测试环境、相关参数，并展示了测试结果；最终，在章节 4 总结全文。

## 1 UWB 定位系统典型架构和基本原理

典型的 UWB 定位系统基本架构如图 1 所示，由定位标签、定位基站、以及定位服务器组成<sup>[35]</sup>。

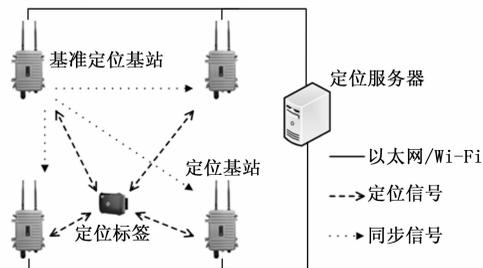


图 1 UWB 无线定位系统架构

### 1.1 定位标签

定位标签具有 UWB 通信模组，可以使用 UWB 信号与定位基站进行通信，记录通信报文的发送和接收时间，并将定位标签 ID 与这些时间信息打包放入通信报文中。

### 1.2 定位基站

定位基站具有 UWB 通信模组、以太网/Wi-Fi 通信模组和数据处理单元。定位基站能够使用 UWB 信号与定位标签通信，记录报文的收发时间，并将这些时间信息与定位标签在报文中封装的时间信息，通过以太网/Wi-Fi 通信模组传输给定位服务器。

此外，在定位基站中选取一个基站作为基准基站，由该基站发出 UWB 时钟同步信号，其他基站接收 UWB 时钟同步信号，并将同步信号的收发时间通过以太网/Wi-Fi 通信模组传输给定位服务器。

### 1.3 定位服务器

定位服务器主要有数据处理单元和定位计算单元。数据处理单元提取来自于定位基站的网络报文中的定位信号的收发时间与同步信号的收发时间，并经过计算得到原始定位数据。定位计算单元利用这些定位数据进行算法求解，即可得到定位标签的位置信息。

UWB 定位系统的定位过程如图 2 和图 3 所示。

1) 基准定位基站周期性发送时钟同步信号给其他定位基站，基准定位基站将同步信号发送时刻（如图 3 中基准定位基站发送同步信号的时间点为  $\{t_{S1,0}, t_{S2,0}, t_{S3,0}\}$ ）上送给定位服务器，其他定位基站将同步信号接收时刻（如图 3 中编号为  $i$  的定位基站接收同步信号的时间点为  $\{t_{S1,i}, t_{S2,i}, t_{S3,i}\}$ ）上送给定位服务器；

2) 定位标签与定位基站之间周期性使用定位信号进行通信，定位标签和定位基站都标记定位信号的收发时间，

并由定位基站将这些时间信息上送给定位服务器（图 3 为双向双向测距模式，其中，定位标签和基准定位基站的定位信号对应的的时间信息有  $\{t_{1,0}, t_{2,0}, t_{3,0}, t_{4,0}, t_5, t_{6,0}\}$ ，定位标签和编号为  $i$  的定位基站的定位信号对应的的时间信息有  $\{t_{1,i}, t_{2,i}, t_{3,i}, t_{4,i}, t_5, t_{6,i}\}$ ）；

3) 定位服务器内数据处理单元接收到定位信号收发时刻和同步信号收发时刻，利用时钟同步算法<sup>[26]</sup>，计算得到原始的定位数据（利用图 3 中的时间信息  $\{t_{S1,0}, t_{S2,0}, t_{S1,i}, t_{S2,i}, t_{2,0}, t_{2,i}\}$ ）计算得到定位标签与定位基站  $i$  的距离减去定位标签与基准基站的距离的差值信息，作为 TDoA 定位手段下的定位数据；利用图 3 中的时间信息  $\{t_1, t_{2,i}, t_{3,i}, t_{4,i}, t_5, t_{6,i}\}$  计算得到定位标签与定位基站  $i$  的距离，作为 ToF 定位手段下的定位数据），并将定位数据输入给定位计算单元；

4) 定位服务器内定位计算单元接收到定位数据，利用定位算法计算，即可得到定位标签的坐标结果。

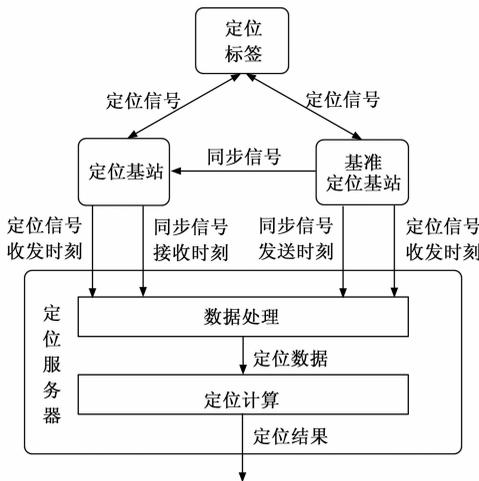


图 2 UWB 定位系统定位过程图

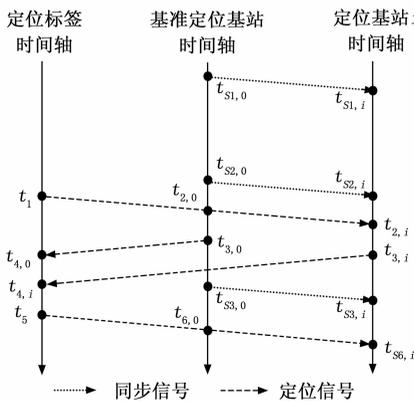


图 3 同步与定位过程中的时间信息

所以，该系统可以同时兼容 ToF 和 TDoA 定位手段。对于 ToF 定位数据，该系统默认使用<sup>[36]</sup>中的算法；对于 TDoA 定位数据，该系统默认使用<sup>[37]</sup>中的算法，也支持其他算法的扩展。

为了提升该定位系统的定位精度，满足复杂工程环境下的定位性能需求，在定位服务器的定位计算单元内部、进行定位计算的原有过程中（如图 4 中灰色部分），引入“定位数据的重新组合”与“利用残留误差对定位结果进行聚类”两个算法流程（如图 4 中白色部分，具体的算法流程在下一个章节进行详述），其中：

1) 定位数据的重新组合。引入这个算法流程，一方面可以提升定位数据的利用率，另一方面，还可以将测量精度较高的定位数据形成数据组合，使用这种数据组合计算得到的定位结果，其精度较高，从源头上过滤掉那些受环境影响较大的定位数据。

2) 利用残留误差对定位结果进行聚类。引入这个算法流程，降低残留误差较大的计算结果对最终定位结果的影响，并利用聚类算法处理不同组合得到的坐标结果，提升了定位计算的精度。

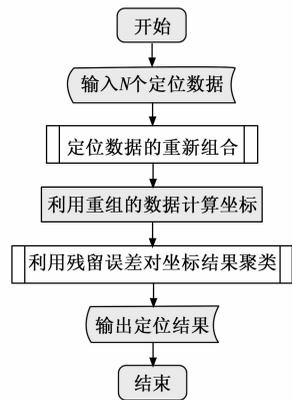


图 4 定位计算单元内算法流程示意图  
(白色部分为新引入算法流程)

## 2 算法及流程设计

在定位区域内，部署了  $N$  个定位基站 ( $N > 4$ )，每个定位基站的坐标为  $(X_i, Y_i, Z_i)$ ，基站编号  $i = 1 \sim N$ 。每个定位基站都对应一个定位数据，记为  $l_i$ ；当使用 ToF 定位手段时，定位数据  $l_i$  为定位标签与基站  $i$  之间的距离；当使用 TDoA 定位手段时，定位数据  $l_i$  为定位标签到基站  $i$  的距离减去定位标签到基准基站的距离的差值，基准基站的坐标为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ 。

在三维空间内，需要不少于 4 个基站就能完成定位计算。为了最大化的利用这  $N$  个定位数据，如图 5 所示，将这些定位数据进行组合，分别使用  $4 \sim N$  个定位数据进行定位计算，则一共有  $M$  组定位数据的组合， $M$  的值为：

$$M = \sum_{n=4}^N C_N^n = \sum_{n=4}^N \frac{N!}{n!(N-n)!} \quad (1)$$

其中： $C_N^n$  表示组合数， $n!$  表示  $n$  的阶乘。

设第  $m$  组数据组合的表达式为：

$$l^{(m)} = \{l_1^{(m)}, l_2^{(m)}, \dots, l_n^{(m)}, n = 4 \sim N\} \quad (2)$$

其中： $m = 1 \sim M$ ，利用该数据组合  $l^{(m)}$ ，根据<sup>[36-37]</sup>中的算法，可以计算得到坐标结果为  $P^{(m)} = (x^{(m)}, y^{(m)}, z^{(m)})$ ，进

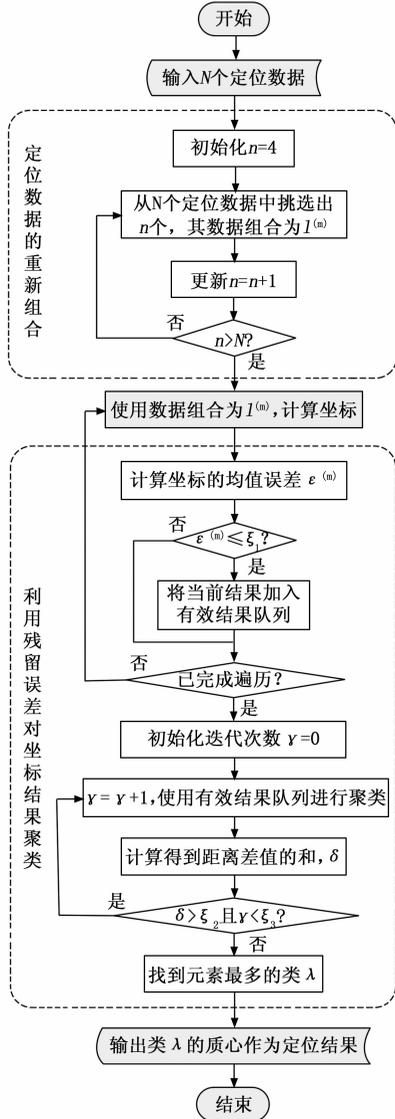


图 5 定位结果解算流程图

而反推出对应于数据组合的估算数据:

$$\hat{l}^{(m)} = \{\hat{l}_1^{(m)}, \hat{l}_2^{(m)}, \dots, \hat{l}_n^{(m)}, n = 4 \sim N\} \quad (3)$$

其中: 对于 ToF 定位手段, 式 (3) 中的  $\hat{l}_i^{(m)}$  为定位标签与定位基站  $i$  的距离信息, 其表达式可以写作:

$$\hat{l}_i^{(m)} = \sqrt{(x^{(m)} - X_i^{(m)})^2 + (y^{(m)} - Y_i^{(m)})^2 + (z^{(m)} - Z_i^{(m)})^2} \quad (4)$$

对于 TDoA 定位手段, 式 (3) 中的  $\hat{l}_i^{(m)}$  为定位标签与定位基站  $i$  的距离减去定位标签与基准定位基站的距离的差值信息, 其表达式可以写作:

$$\hat{l}_i^{(m)} = \sqrt{(x^{(m)} - X_i^{(m)})^2 + (y^{(m)} - Y_i^{(m)})^2 + (z^{(m)} - Z_i^{(m)})^2} - \sqrt{(x^{(m)} - X_0)^2 + (y^{(m)} - Y_0)^2 + (z^{(m)} - Z_0)^2} \quad (5)$$

其中:  $i = 1 \sim n$ 。

计算估算数据  $\hat{l}^{(m)}$  与定位数据  $l^{(m)}$  的残留误差  $\epsilon^{(m)}$ , 单位为米:

$$\epsilon^{(m)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{l}_i^{(m)} - l_i^{(m)})^2}{n}} \quad (6)$$

当残留误差  $\epsilon^{(m)}$  大于门限  $\xi_1$  时, 认为该坐标结果  $P^{(m)} = (x^{(m)}, y^{(m)}, z^{(m)})$  无效, 丢弃该结果; 否则, 认为该结果有效, 进入聚类计算。门限  $\xi_1$  的取值与定位精度有关: 当定位精度越高时,  $\xi_1$  的取值越小; 默认值为 0.5 米。

从有效的坐标结果中, 利用 K-Means 聚类法<sup>[38-39]</sup>, 随机选取  $K$  个解初始质心, 记为:

$$\Omega_{(1)}^k = (x^k, y^k, z^k), k = 1 \sim K \quad (7)$$

式中, 下标“(1)”表示第一次聚类迭代。

遍历所有有效坐标结果, 分别计算每个坐标结果  $P^{(m)} = (x^{(m)}, y^{(m)}, z^{(m)})$  与这  $K$  个质心的欧式距离:

$$r_k^{(m)} = \sqrt{(x^{(m)} - x^k)^2 + (y^{(m)} - y^k)^2 + (z^{(m)} - z^k)^2} \quad (8)$$

找到  $\{r_k^{(m)}, k = 1 \sim K\}$  中的最小值  $r_{k_{\min}}^{(m)}$  对应的质心  $\Omega_{(1)}^{k_{\min}}$ , 并把该坐标结果归到这一类。其中  $k_{\min}$  可以表示为:

$$k_{\min} = \operatorname{argmin}\{r_k^{(m)}, k = 1 \sim K\} \quad (9)$$

遍历完成后, 对应于第  $k (k = 1 \sim K)$  类中所有的元素  $P^{(m)}$ , 利用元素到质心  $\Omega_{(1)}^k$  的距离  $r_k^{(m)}$  以及对应的残留误差  $\epsilon^{(m)}$ , 计算该类每个元素对应的权重值  $\omega_k^{(m)}$ :

$$\omega_k^{(m)} = \alpha \frac{1/r_k^{(m)}}{\sum 1/r_k^{(m)}} + (1 - \alpha) \frac{1/\epsilon^{(m)}}{\sum 1/\epsilon^{(m)}} \quad (10)$$

其中:  $\alpha$  为权重参数, 取值范围为  $0 \leq \alpha \leq 1$ 。在使用时,  $\alpha$  的取值与定位精度有关: 当定位精度越高时,  $\alpha$  的取值越大; 默认值为 0.5。

然后利用每一类中的全部元素  $P^{(m)} = (x^{(m)}, y^{(m)}, z^{(m)})$  和对应的权重值  $\omega_k^{(m)}$ , 更新该类的质心  $\Omega_{(2)}^k, k = 1 \sim K$ :

$$\Omega_{(2)}^k = (x^k, y^k, z^k) = \sum \omega_k^{(m)} \cdot (x^{(m)}, y^{(m)}, z^{(m)}) \quad (11)$$

式中, 下标“(2)”表示第二次聚类迭代。

计算所有质心在更新前后的距离的差值的和, 记为  $\delta_{(2)}$ :

$$\delta_{(2)} = \sum_{k=1}^K \|\Omega_{(2)}^k - \Omega_{(1)}^k\| \quad (12)$$

当满足下式条件时, 继续以  $\{\Omega_{(2)}^k, k = 1 \sim K\}$  作为质心继续聚类,

$$\delta_{(2)} > \xi_2 \text{ 且 } \gamma < \xi_3 \quad (13)$$

其中:  $\xi_2$  为质心距离差值门限,  $\gamma$  为迭代次数,  $\xi_3$  为迭代次数上限。系统要求达到的定位精度越高,  $\xi_2$  的取值越小,  $\xi_3$  的取值越大。此外, 设计这两个门限值时, 也要考虑系统内的内存资源和定位响应时间,  $\xi_2$  的取值越小,  $\xi_3$  的取值越大时, 计算所占用的内存资源越大, 耗时越久。

否则, 找到含有元素最多的一类 (记为类  $\lambda$ ), 输出其质心作为最终的定位结果  $\Omega_{(2)}^\lambda$ , 其中  $\lambda$  为:

$$\lambda = \operatorname{argmax}\{\Omega_{(2)}^k \text{ 中的元素个数}, k = 1 \sim K\} \quad (14)$$

### 3 实验结果与分析

为了验证本文提出的算法流程对原有定位系统定位性能的优化效果, 在浙江省某变电站内部署了 35 个定位基站, 覆盖了约 60 米  $\times$  70 米大小的室外区域。如图 6 所示,

区域内存在两座大型变压器（主变 1 和主变 2）、一座主控楼（在主控楼内不做定位要求）以及一些龙门架、电抗器、机器人坞等建筑，图中“×”标识的位置部署了定位基站。

在定位场地内，分别进行静态测试和动态测试：静态测试是指在场地内选择若干位置点（如图 6 中的“⊙”所标识的 6 个静态测试点位），测绘位置点坐标；然后将定位标签依次放置于这些位置上保持不动，分别测试 5~10 分钟，观察定位坐标与测绘坐标的偏差，并计算定位坐标与测绘坐标的欧式距离  $d_j$  作为定位系统的偏差值（ $j$  表示第  $j$  次定位，偏差值  $d_j$  如图 7 静态测试所示：定位坐标  $P_j$  到测绘坐标  $p_1$  的距离，即为  $d_j$ ）。

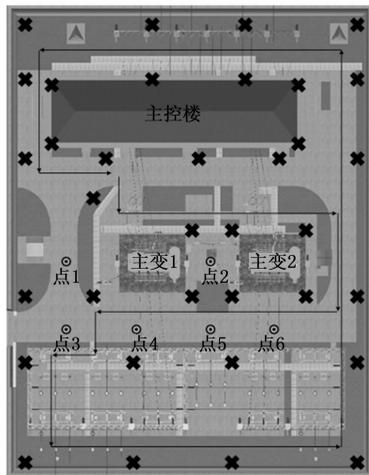


图 6 变电站室外定位区域及基站部署图

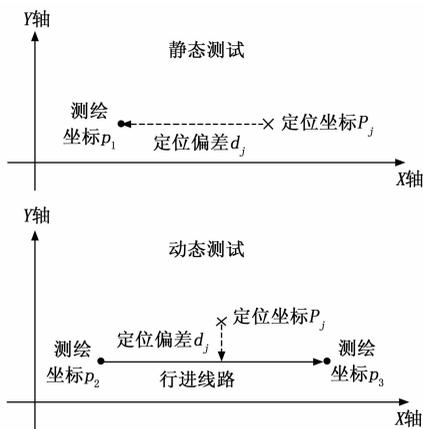


图 7 定位偏差示意图

动态测试是指在场地内选择固定的运动路线（如图 6 中箭头“→”标识的路径为动态测试路径），测绘出路线的坐标；再令人员佩戴定位标签沿着路线运动，观察定位结果与测绘路线的偏差，并计算定位结果到路线的垂线距离  $d_j$  作为定位结果的偏差值（ $j$  表示第  $j$  次定位，偏差值  $d_j$  如图 7 动态测试所示：测绘行进路线的起点坐标  $p_2$  和终点坐标  $p_3$ ，计算定位坐标  $P_j$  到线段的垂线距离，即为  $d_j$ ）。

使用统计量  $\sigma_{95}$  表征定位精度，其含义是指 95% 的定位结果的偏差值都小于或者等于  $\sigma_{95}$ 。即，如果使用  $\{d_j\}$  表征定位结果偏差值  $d_j$  的集合（ $j$  表示第  $j$  次定位），则  $\sigma_{95}$  是大于或者等于  $\{d_j\}$  中 95% 的元素值的最小值，可以表示为：

$$\sigma_{95} = \operatorname{argmin}\{d \geq \{d_j\} \text{ 中 } 95\% \text{ 的元素值}\} \quad (15)$$

可以看出  $\sigma_{95}$  值越大，则表示定位结果距离测绘值越远，即定位精度越低。

测试过程中的参数如表 1 中给出。在测试过程中，为了便于说明描述，将图 4 中灰色部分的原算法流程记为“原算法”，图 4 中引入的白色部分后的算法流程记为“新算法”。

表 1 定位测试参数表格

参数名称	取值
定位频率	2 Hz
权重参数 $\alpha$	0.8
残留误差门限值 $\xi_1$	1.5 m
质心距离差值门限 $\xi_2$	0.5 m
迭代次数上限 $\xi_3$	10 000 次

点位 1 的静态测试结果如图 8 所示，图中横轴为 X 坐标，纵轴为 Y 坐标，单位为米，格子粒度为 0.1 米；图中“◇”表示测绘点坐标，“×”表示“原算法”定位结果，“·”表示“新算法”定位结果；虚线表示使用“原算法”得到的  $\sigma$  的值覆盖的范围，实线表示使用“新算法”得到的  $\sigma_{95}$  的值覆盖的范围。

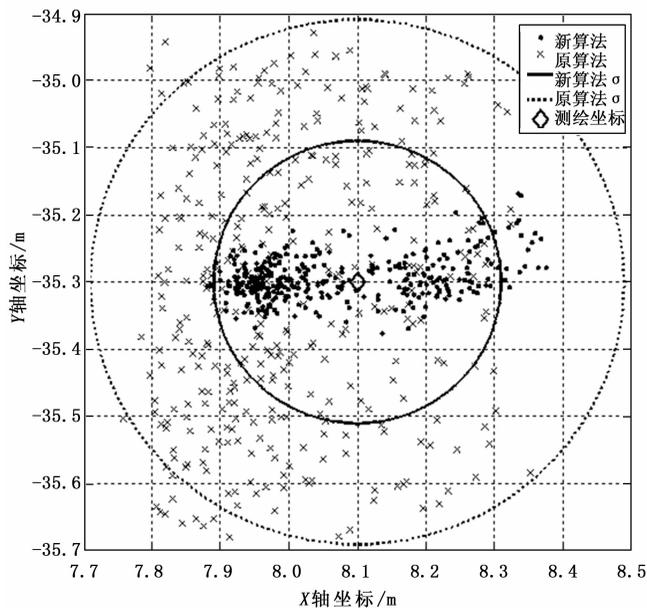


图 8 点位 1 定位结果分布图

通过对比可以发现，使用“新算法”得到的坐标点分布的聚合性更强，且更贴近于该点的测绘值。通过统计，得到“原算法”与“新算法”的  $\sigma_{95}$  值分别为 0.39 米和 0.21 米。所以，可以得出结论：使用“新算法”可以有效

提高无线定位系统的定位精度。

使用相同的统计手段，处理其他定位点的测试结果，得到定位精度的统计结果如表 2 所示。可以看出，使用“新算法”进行定位计算得到的数值更小，意味着该算法的结果的定位精度更高，尤其是在遮挡较为严重的区域（如点位 2），该算法的优势更为明显。

表 2 静态测试各点的统计结果 m

点位编号	统计结果 $\sigma_{95}$	
	原算法	新算法
1	0.39	0.21
2	1.51	0.62
3	0.39	0.21
4	0.21	0.17
5	0.28	0.13
6	0.53	0.23
7	0.18	0.08

动态测试的定位轨迹以及实际路线如图 9 所示，统计结果如表 3 所示。在图 9 中，实线表示测绘的运动路径，“×”表示“原算法”结果，“·”表示“新算法”结果。

表 3 动态测试各点的统计结果 m

使用算法	统计结果 $\sigma_{95}$
原算法	0.45
新算法	0.23

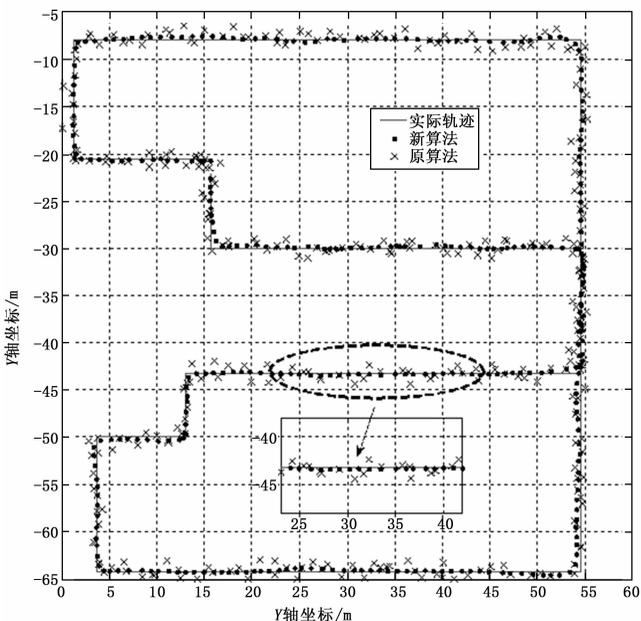


图 9 动态测试定位轨迹图

从图 9 中可以看出，使用“新算法”的定位结果在进行动态测试时，定位轨迹更为平滑，且与实际运动路径最为接近；尤其是在主变附近、主控楼附近这种存在明显遮挡的区域，使用“新算法”对无线定位系统的定位轨迹提升效果更为明显。此外，从表 3 的数据统计值也可以看出，

在运动过程中，使用“新算法”的定位结果精度更高。

综合考虑图 8 和图 9 以及表 2 和表 3 的结果，可以发现：无论是静态测试还是动态测试，“新算法”的定位精度都能保持在 0.5 m 以内，在一些较为空旷的区域，定位精度甚至可达 10 cm。而且，相比于“原算法”，“新算法”在定位精度方面有了进一步的提升，尤其是在遮挡较为严重的区域，定位精度的提升更为明显。

此外，为了验证该无线定位系统的工程实施可行性，在定位测试过程中，记录了定位过程中的平均内存开销，并统计每次定位解算的运算耗时（定位服务器基于 WIN7 系统、I5 处理器、8 G 内存），统计结果如表 4 所示。

表 4 定位过程中的资源占用统计

统计类型	统计结果	
	原算法	新算法
平均运算耗时/ms	1.7	9.3
平均内存使用量/MB	378.3	743.9

通过对比可以发现，引入“定位数据的重新组合”与“利用残留误差对定位结果进行聚类”两个算法流程的“新算法”，其计算过程会占用更多的内存、且消耗更多的时间，但是其性能依然满足工程应用的需求。

#### 4 结束语

当前基于超宽带技术的无线定位系统，很容易受到定位场地中的环境干扰，在定位数据源头上引入了较大的误差，导致定位精度的降低，限制了无线定位系统在工程应用中的推广。本文针对这种存在于基于超宽带技术的无线定位系统的问题，提出了一种基于残留误差的聚类算法，在提高了原始数据利用率的同时，降低了计算结果中残留误差的影响，进而实现了定位精度的提升。本文还提供了使用该算法的无线定位系统进行工程实测的数据结果，证明了该算法对于无线定位系统性能提升有较好的效果。

#### 参考文献:

- [1] 张 曙. 工业 4.0 和智能制造 [J]. 机械设计与制造工程, 2014 (8): 1-5.
- [2] 党存禄, 胥莎莎. 面向智慧农业的无线传感器路由协议和节点定位算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (3): 293-297.
- [3] 胡明伟. 无线定位技术应用于实时交通信息采集研究 [J]. 深圳大学学报 (理工版), 2007, 24 (3): 246-251.
- [4] 赵 军, 李先华. 基于移动通信网络无线定位技术的原理及应用 [J]. 测绘科学, 2002, 27 (3): 48-51.
- [5] 夏博光, 王卫东, 王登阳. 无线射频 (RFID) 技术在高速检测列车精确定位中的应用 [J]. 铁道建筑, 2011 (12): 102-106.
- [6] 张 婷, 郑建生, 王 皓. 无线定位新技术及发展趋势 [J]. 电讯技术, 2006, 46 (2): 21-24.
- [7] 李育红, 周 正. 超宽带无线通信技术的新进展 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27 (1): 20-24, 99.

(下转第 202 页)