

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.06.015

基于 TOF 的 UWB 可移动基站快速自定位算法

韩玉香¹, 张晓亮³, 张晓明^{1,2}, 耿煜琛¹

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051;

2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;

3. 济南金丰源电子科技有限公司, 济南 250101)

摘要:针对运动场中超宽带(UWB)可移动基站的位置获取需要人工测量、定位不方便的问题,提出了基于飞行时间(TOF)的UWB可移动基站快速自定位方法。首先根据基站布局情况确定局部坐标系,建立基于UWB基站间相互测距信息的各基站坐标方程,采用最小二乘法对各基站的坐标进行解算,进而分析其定位误差。最后通过实验验证了算法的可行性和稳定性。实验结果表明,可移动基站平均定位精度在0.05m以内。相对于传统的人工测量方式,基站自定位可有效节省基站布设时间,减少工作量。

关键词:UWB; 快速定位; TOF; 基站布设

中图分类号:TN966.4

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2021)06-0112-06

Fast Self Localization Algorithm for UWB Mobile Base Station Based on TOF

HAN Yu-xiang¹, ZHANG Xiao-liang³, ZHANG Xiao-ming^{1,2}, GENG Yu-chen¹

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measure of Ministry of Education,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Jinfengyuan Electronic Technology Limited Company, Jinan 250101, China)

Abstract: In order to solve the problem of manual measurement and inconvenient positioning for the location of UWB mobile base station in sports fields, a fast self positioning method for UWB mobile base station based on time of flight (TOF) is proposed. Firstly, the local coordinate system is determined according to the layout of the base station, and the coordinate equations of each base station are established based on the mutual ranging information between UWB base stations. The least square method is used to calculate the coordinates of each base station, and then the positioning error is analyzed. Finally, the feasibility and stability of the algorithm are verified through experiments. The experimental results show that the average positioning accuracy of the mobile base station is within 0.05m. Compared with the traditional manual measurement method, the base station self positioning method can effectively save the base station deployment time and reduce the workload.

Key words: UWB; Fast positioning; TOF; Base station layout

收稿日期:2021-01-12;修订日期:2021-01-27

基金项目:山西重点研发计划项目(201903D121169)

作者简介:韩玉香(1996-),女,硕士研究生,主要从事室内定位方面的研究。

通信作者:张晓明(1976-),男,教授,主要从事导航测试技术方面的研究。

0 引言

现如今,越来越多的高新技术被应用到各体育运动中,以更好地对运动员的运动状况进行分析^[1-2]。其中,运动场中运动员的定位精度要求为分米级,更新率大于 10Hz,可实时准确显示运动员的运动轨迹。目前常用的定位技术如超声波定位技术^[3]、蓝牙定位技术^[4]和 WiFi 定位技术^[5]等,在覆盖范围及定位精度方面均不能满足运动场高精度实时定位的要求;全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)^[6-7]定位技术适合室外大范围定位,单点定位精度低;实时动态定位(Real-Time Kinematic, RTK)技术虽可实现单点实时定位,但所需设备复杂,操作难度大。

超宽带(Ultra Wide Band, UWB)定位技术由于功耗低、系统复杂度低、多径分辨率高、系统安全性高、定位精度可达分米级^[8-9]等优点,在室内外定位领域得到了广泛应用^[10]。传统的 UWB 可移动基站定位方法借用外部设备(如高精度全站仪)进行人工测量以获取基站位置^[11],虽然人工测量基站位置较为精确,但使用不便,需利用全站仪等工具进行辅助测量,不但增加了使用成本,还导致 UWB 定位系统的基站布设工作量增加,限制了定位系统的可移动性^[12]。除人工测量之外,还可以将移动基站定位在标准运动场的场地边缘,以运动场的标准尺寸确定基站坐标^[13]。多数运动场地在建设时不能达到标准尺寸要求,并且基站在安装时可能与场地边缘不完全重合,导致基站坐标存在误差。因此,本文提出了一种可移动基站快速自定位方法。

为满足运动场中可移动基站快速定位的需求,利用基于飞行时间(Time of Flight, TOF)^[14]的 UWB 可移动基站快速自定位方法,建立局部坐标系以获取基站坐标。根据需要在运动场中布设基站,通过各基站间互相通信即可快速定位基站的相对位置。该方法可减少定位基站的布设时间和成本,降低 UWB 移动定位基站的布设难度,提高系统的可移动性,达到快速精确确定运动场可移动基站坐标的目的。

1 定位算法

1.1 TOF 测距原理(双边双向测距)

假设运动场内有 n 个定位基站,任意 2 个基站之间均可进行通信,为减小基站的时钟误差带来的

测距误差,基站之间进行双向测距,如图 1 所示。双边双向测距分为两次测距:基站 j 主动发起第一次测距消息并记录发送时间戳 t_0 ,基站 i 记录接收时间戳 t_1 并产生应答信息,同时记录发送时间戳 t_2 ,当基站 j 收到数据之后记录时间戳 t_3 ;第二次为基站 j 返回带有时间戳 t_0 、 t_3 、 t_4 的数据,基站 i 接收并记录时间戳 t_5 。最终可以得到 4 个时间差,根据时间差计算基站 i 到基站 j 的距离^[15]。

令 4 个时间差分别为

$$t_{\text{reply1}} = t_2 - t_1 \quad t_{\text{reply2}} = t_4 - t_3$$

$$t_{\text{round1}} = t_3 - t_0 \quad t_{\text{round2}} = t_5 - t_2$$

t_{round1} 为基站 j 发送轮询信号到接收到基站 i 应答信号的时间; t_{round2} 为基站 i 发送应答信号到接收到基站 j 发送的测距信息的时间; t_{reply1} 为基站 i 接收到轮询信号到发送应答信号的时间; t_{reply2} 为基站 j 接收到应答信号到发送测距信息的时间。

则进行一次测距所需时间 t 可表示为

$$t = \frac{t_{\text{round1}} \times t_{\text{round2}} - t_{\text{reply1}} \times t_{\text{reply2}}}{t_{\text{round1}} + t_{\text{round2}} + t_{\text{reply1}} + t_{\text{reply2}}} \quad (1)$$

根据式(1)可进一步得出距离 d

$$d = ct + \Delta d \quad (2)$$

其中, c 为无线电传播速度; Δd 为 TOF 测距误差。

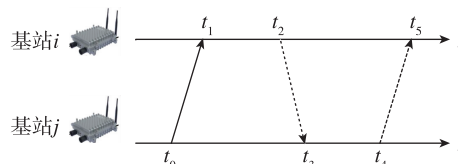


图 1 TOF 测距原理图

Fig. 1 TOF ranging schematic diagram

1.2 基站快速定位原理

由于运动场地面平坦,将地面定义为三维坐标系的 xoy 平面。运动场内任意不同的 2 个基站作为基站 1 和基站 2。基站 1 和基站 2 在地面投影点的连线定义为三维坐标系的 x 轴,将经过基站 1 的地面法线定义为三维坐标系的 z 轴,根据右手定则,得到 y 轴方向。利用测量工具测得各基站到地面的距离作为 z 轴坐标,测量误差在 0.001m 内。不失一般性,假设基站均在 xoy 平面的第一象限内,如图 2 所示。基站 1 的坐标为 $(0, 0, z_1)$,基站 2 的坐标为 $(x_2, 0, z_2)$,基站 i 的坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,基站 j 的坐标为 (x_j, y_j, z_j) ,则每 2 个基站之间的距离表

示为

$$d_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, n; i \neq j \quad (3)$$

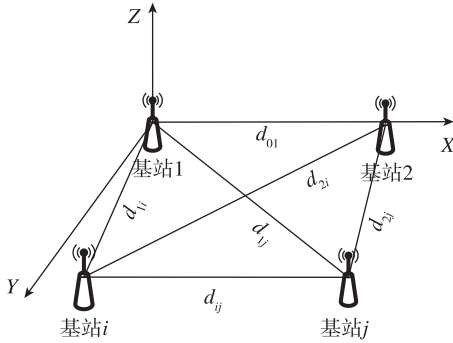


图2 基站快速定位原理图

Fig. 2 Schematic diagram of base station rapid positioning

根据式(3)可得关于距离及基站坐标的非线性方程组,本文采用牛顿迭代法求解基站坐标。假设 $\mathbf{X}_k$ 为第 k 次迭代的坐标值,则

$$\mathbf{X}_k = [x_{1k}, x_{2k}, y_{2k}, \dots, x_{ik}, y_{ik}, \dots, x_{nk}, y_{nk}]^T$$

对式(3)所得的非线性方程组进行泰勒展开得

$$f_{ij} = f_{ij}(\mathbf{X}_k, d_{ij}) + \frac{\partial f_{ij}}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{\partial f_{ij}}{\partial x_j} \Delta x_j + \frac{\partial f_{ij}}{\partial y_i} \Delta y_i + \frac{\partial f_{ij}}{\partial y_j} \Delta y_j \quad (4)$$

其中, $\Delta x_i = x_i - x_{ik}, i = 2, 3, \dots, n; \Delta y_i = y_i - y_{ik}, i = 3, 4, \dots, n$ 。

由文献[16]以及实验数据可知,距离值的测量存在误差且误差服从正态分布。由数理统计知识:当误差服从正态分布时,最小二乘是最优线性无偏估计。通过最小二乘求解,使得测距误差的平方和为最小。下文将通过上述泰勒展开式求方程的最小二乘解。

记系数矩阵 $\mathbf{H}_k$ 为

$$\mathbf{H}_k = [\mathbf{A}_{k(m \times n_1)} \quad \mathbf{B}_{k(m \times n_2)}]$$

其中

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{12}}{\partial x_2} \big|_{\mathbf{X}_k} & \frac{\partial f_{12}}{\partial x_3} \big|_{\mathbf{X}_k} & \dots & \frac{\partial f_{12}}{\partial x_n} \big|_{\mathbf{X}_k} \\ \frac{\partial f_{13}}{\partial x_2} \big|_{\mathbf{X}_k} & \frac{\partial f_{13}}{\partial x_3} \big|_{\mathbf{X}_k} & \dots & \frac{\partial f_{13}}{\partial x_n} \big|_{\mathbf{X}_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{ij}}{\partial x_2} \big|_{\mathbf{X}_k} & \frac{\partial f_{ij}}{\partial x_3} \big|_{\mathbf{X}_k} & \dots & \frac{\partial f_{ij}}{\partial x_n} \big|_{\mathbf{X}_k} \end{bmatrix}_{m \times n_1}$$

$$\mathbf{B}_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{12}}{\partial y_3} \big|_{\mathbf{X}_k} & \frac{\partial f_{12}}{\partial y_4} \big|_{\mathbf{X}_k} & \dots & \frac{\partial f_{12}}{\partial y_n} \big|_{\mathbf{X}_k} \\ \frac{\partial f_{13}}{\partial y_3} \big|_{\mathbf{X}_k} & \frac{\partial f_{13}}{\partial y_4} \big|_{\mathbf{X}_k} & \dots & \frac{\partial f_{13}}{\partial y_n} \big|_{\mathbf{X}_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{ij}}{\partial y_3} \big|_{\mathbf{X}_k} & \frac{\partial f_{ij}}{\partial y_4} \big|_{\mathbf{X}_k} & \dots & \frac{\partial f_{ij}}{\partial y_n} \big|_{\mathbf{X}_k} \end{bmatrix}_{m \times n_2}$$

$$m = n(n-1)/2; n_1 = n-1; n_2 = n-2$$

$\mathbf{X}_k$ 迭代初始值由非线性方程组解得

$$x_{20} = \sqrt{d_{12}^2 - z_{12}^2}$$

$$x_{i0} = \frac{M}{2\sqrt{d_{12}^2 - z_{12}^2}}$$

$$y_{i0} = \frac{\sqrt{4(d_{12}^2 - z_{12}^2)(d_{1i}^2 - z_{12}^2) - M^2}}{2\sqrt{d_{12}^2 - z_{12}^2}} \quad (5)$$

其中

$$M = d_{1i}^2 - z_{1i}^2 - d_{2i}^2 + z_{2i}^2 + z_{2i}^2 + \sqrt{d_{12}^2 - z_{12}^2} \quad (6)$$

令各个基站到地面的距离差为 Δz , 则 Δz 可表示为

$$\Delta z = \{\Delta z_{ij} | 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n, i \neq j\}$$

令

$$\Delta \mathbf{X}_k = [\Delta x_{2k}, \Delta x_{ik}, \dots, \Delta x_{nk}, \Delta y_{2k}, \Delta y_{ik}, \dots, \Delta y_{nk}]^T$$

令

$$\Delta \mathbf{R}_k = \mathbf{f} - \mathbf{f}_k \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{f} = [f_{12}, f_{1i}, \dots, f_{ij}]^T$$

$$\mathbf{X}_k = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n]^T$$

$$\mathbf{f}_k = [f_{12} |_{\mathbf{X}_k}, d_{1i} |_{\mathbf{X}_k}, \dots, f_{ij} |_{\mathbf{X}_k}]^T$$

则

$$\Delta \mathbf{R}_k = \mathbf{H}_k \Delta \mathbf{X}_k \quad (8)$$

运用最小二乘法解算 $\Delta \mathbf{X}_k$, 得

$$\Delta \mathbf{X}_k = (\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{H}_k^T \Delta \mathbf{R}_k \quad (9)$$

第一次迭代的 $\mathbf{X}_1$ 为

$$\mathbf{X}_1 = \Delta \mathbf{X} + \mathbf{X}_0 \quad (10)$$

通过牛顿迭代法对 $\Delta \mathbf{X}_k$ 进行解算, 当 $\Delta \mathbf{X}_k$ 小于误差阈值时停止迭代, 此时的 $\mathbf{X}_{k+1}$ 为

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \Delta \mathbf{X}_k \quad (11)$$

最终基站 x 、 y 轴坐标值为 $\mathbf{X}_{k+1}$, z 轴坐标值为基站和地面之间的距离, 实现了基于 TOF 测距的 UWB 基站快速定位方式。

在设定的局部坐标系内求得基站坐标后, 在运动场自身坐标系 $x'o'y'$ 以及建立的局部坐标系 xoy

内选取典型位置点,求得坐标转换关系,将坐标进行平移旋转即可得到基站在运动场内的坐标。

2 定位误差传播规律

假设测距误差服从均值为 μ_D 、标准差为 σ_D 的正态分布,则 $\Delta \mathbf{R}_k$ 服从均值为 0、标准差为 $\sqrt{2}\sigma_D$ 的正态分布。

基站坐标 $\Delta \mathbf{X}_k$ 的期望为

$$\mathbf{E}(\Delta \mathbf{X}_k) = (\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{E}(\Delta \mathbf{R}_k) = 0 \quad (12)$$

基站坐标 $\Delta \mathbf{X}_k$ 的方差为

$$\mathbf{D}(\Delta \mathbf{X}_k) = \mathbf{E}(\Delta \mathbf{X}_k \Delta \mathbf{X}_k^T) = 2(\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k)^{-1} \sigma_D^2 \quad (13)$$

将 $(\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k)^{-1}$ 作为 TOF 测距误差对可移动基站自定位精度影响系数矩阵。系数矩阵可由式 (14) 得出

$$(\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k)^{-1} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdots & Q_{1(2n-3)} \\ Q_{21} & Q_{22} & \cdots & Q_{2(2n-3)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{(2n-3)1} & Q_{(2n-3)2} & \cdots & Q_{(2n-3)(2n-3)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

每个基站坐标处的误差系数可表示为

$$P_{x(i+1)} = \sqrt{Q_{ii}}; 1 \leq i \leq n-1$$

$$P_{y(i-n+3)} = \sqrt{Q_{ii}}; n \leq i \leq 2n-3 \quad (15)$$

通过误差系数及测距标准差,可进一步得到基站 x 坐标和 y 坐标的标准差

$$\sigma_{xi} = \sqrt{2} P_{xi} \sigma_D, \sigma_{yi} = \sqrt{2} P_{yi} \sigma_D$$

误差系数反映了测距误差和定位误差的关系。根据文献[17],误差系数与基站个数及基站布设方式有关。

3 仿真实验

假设 UWB 可移动基站的测距误差服从均值为 0、标准差为 0.1m 的正态分布。通过上述定位算法解算基站坐标,并进行误差系数及标准差计算,分析布设数目分别为 4、6、8 时,对 UWB 可移动基站自定位精度的影响。

每个基站的位置测量 1000 次,记录测得坐标的均值及坐标标准差 $\sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}$,仿真结果如表 1~表 3 所示。UWB 的基站个数为 4 时,最大坐标标准差为 0.10m;基站个数为 6 时,最大坐标标准差为 0.05m;基站个数为 8 时,最大坐标标准差为 0.04m。

表 1 基站坐标仿真数据(4 个基站)

Tab. 1 Base station coordinate simulation data (4 base stations)

真实坐标/m	均值/m	标准差/m	$\sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)} / \text{m}$
(100,0)	(99.9,0)	(0.02,0)	0.02
(0,50)	(-0.01,49.98)	(0.01,0.02)	0.02
(100,50)	(100.01,50.00)	(0.01,0.02)	0.02

表 2 基站坐标仿真数据(6 个基站)

Tab. 2 Base station coordinate simulation data (6 base stations)

真实坐标/m	均值/m	标准差/m	$\sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)} / \text{m}$
(100,0)	(100.00,0)	(0.01,0)	0.01
(0,50)	(0.01,49.99)	(0.00,0.01)	0.01
(100,50)	(99.98,50.00)	(0.01,0.01)	0.01
(50,0)	(49.99,0.00)	(0.01,0.00)	0.01
(50,50)	(49.99,49.99)	(0.01,0.01)	0.01

表 3 基站坐标仿真数据(8 个基站)

Tab. 3 Base station coordinate simulation data (8 base stations)

真实坐标/m	均值/m	标准差/m	$\sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)} / \text{m}$
(100,0)	(100.00,0)	(0.01,0)	0.01
(0,50)	(-0.01,49.99)	(0.00,0.01)	0.01
(100,50)	(99.99,50.00)	(0.01,0.00)	0.01
(50,0)	(49.99,0.00)	(0.00,0.00)	0.01
(50,50)	(49.99,49.99)	(0.00,0.01)	0.01
(0,25)	(-0.01,24.99)	(0.00,0.01)	0.01
(100,25)	(99.99,25.00)	(0.01,0.01)	0.01

3 组仿真实验结果表明,基站数目多的一组相较于基站数目少的一组,测量误差及标准差均减小。在 100m×50m 区域内,布设 6 个 UWB 可移动基站时,误差均值及标准差均在误差可接受范围内。布设 8 个 UWB 可移动基站时,相对于 6 个基站布设情况,误差标准差有所减少,但是减小效果不明显。在 100m×50m 区域内,布设 6 个基站即可达到理想定位精度,继续增加基站数目,定位精度的提高效果并不明显,同时提高了系统复杂度,使得定位速度变慢。因此,在长为 100m、宽为 50m 的运动场内,布设 6 个 UWB 基站即可达到精确定位的目的。

以 6 个基站布局仿真图中(50,0)为例,测量坐标的误差情况如图 3 所示。

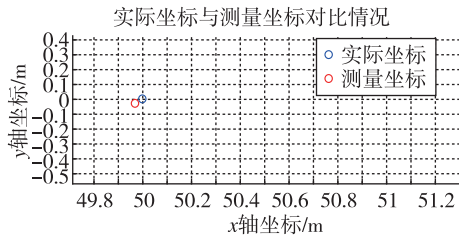


图 3 仿真结果与实际位置对比效果

Fig. 3 Comparison between simulation results and actual position

4 运动场实验

仿真结果表明,100m×50m 的运动场内 6 个 UWB 基站及 8 个 UWB 基站均可达到精确定位的目的。考虑到运动场定位精度的要求,采用仿真实验中 6 个 UWB 基站的布局方式验证算法的可行性。在足球场布设基站,用全站仪进行测量,全站仪测量精度为 0.001m,如图 4 所示。基站 1 坐标为 (0,0,1),测得其余 5 个基站坐标情况如表 4 所示。6 个 UWB 基站完成一次定位用时小于 1s,可达到快速定位的目的。



图 4 基站布设环境

Fig. 4 Layout environment of base station

表 4 运动场基站坐标数据

Tab. 4 Base station coordinate data of sports field

基站	基站自定位均值/m	全站仪测量值/m
2	(100.03,0)	(100,0)
3	(0.05,50.04)	(0,50)
4	(99.96,50.03)	(100,50)
5	(49.96,0.04)	(50,0)
6	(50.03,49.98)	(50,50)

实验结果表明,基于该算法的 UWB 移动基站自定位结果与全站仪的标定结果相比,坐标相对误差最大为 0.05m,因此基站的自定位结果准确。

5 结论

本文提出了一种基于 TOF 的 UWB 可移动基站快速自定位方法。

1)通过最小二乘法及牛顿迭代法对算法进行了误差传播规律的推导;通过室外运动场定位实验进行算法的可行性验证,定位结果表明,可移动基站的定位精度在 0.05m 以内。

2)相对于人工测量基站的位置,本文算法不需要借助高精度仪器辅助测量,大大节省了基站布设时间,解决了传统的 UWB 可移动基站布设复杂、成本高等方面的问题。

3)本文算法利用所有可移动基站互相通信的方式,采用最小二乘法求解,可实现误差补偿。通过对误差传递系数的分析,该算法在误差传递过程中,可减小测距误差对测量结果的影响,提高了定位结果的准确度。该算法可实现运动场内运动员的三维定位,适用于 UWB 定位等无线定位技术中局部定位系统的组建,具有很强的指导意义和使用价值。

参考文献

- [1] 闫佳晖,张晓明,刘俊,等.基于 UWB 的运动场定位系统设计[J].导航定位与授时,2020,7(1):98-103.
Yan Jiahui, Zhang Xiaoming, Liu Jun, et al. Design of stadium positioning system based on UWB[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(1): 98-103(in Chinese).
- [2] 邓世燕,郭承军.智慧城市建设中的室内定位现状与发展趋势分析[C]//第十一届中国卫星导航年会,2020.
Deng Shiyan, Guo Chengjun. Analysis on the status quo and development trend of indoor positioning in smart city construction [C]//Proceedings of 11th China Satellite Navigation Annual Conference, 2020 (in Chinese).
- [3] 唐伟,钟伟,段国艳.基于双超声波的二维全向定位算法研究[J].电子测试,2020(17):53-54+76.
Tang Wei, Zhong Wei, Duan Guoyan. Two dimensional omnidirectional localization algorithm based on dual ultrasonic[J]. Electronic Test, 2020(17): 53-54+76(in Chinese).
- [4] 郭苏,邱继芸,余江涛,等.变电站室内导航系统蓝牙定位技术与算法研究[J].信息技术,2020,44(8):141-145+156.

- Guo Su, Qiu Jiyun, Yu Jiangtao, et al. Research on bluetooth positioning technology and algorithm of substation indoor navigation system[J]. Information Technology, 2020, 44(8): 141-145+156(in Chinese).
- [5] 朱正伟, 蒋威, 张贵玲, 等. 基于 RSSI 的室内 WiFi 定位算法[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(10): 2958-2962.
- Zhu Zhengwei, Jiang Wei, Zhang Guiling, et al. Indoor WiFi location algorithm based on RSSI[J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(10): 2958-2962(in Chinese).
- [6] Xu J W, He G W. Research on a positioning application by RTK technique and with goGPS[J]. Advanced Materials Research, 2013, 798-799: 549-552.
- [7] Ik A, Jk A, Gl B, et al. High-rate GPS positioning for tracing anthropogenic seismic activity: the 29 January 2019 mining tremor in Legnica-Gogów Copper District, Poland[J]. Measurement, 2020, 168: 108396.
- [8] Cheng Y, Zhou T. UWB indoor positioning algorithm based on TDOA technology[C]//Proceedings of 2019 10th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME), 2019.
- [9] Kietlinski-Zaleski J, Yamazato T, Katayama M. Experimental validation of TOA UWB positioning with two receivers using known indoor features[C]// Proceedings of Position Location and Navigation Symposium. IEEE, 2010.
- [10] Zou X, Wang A, Li S, et al. Research and analysis on UWB indoor positioning system[J]. International Journal of Social Science and Education Research, 2020, 3(11): 202-207
- [11] Martinelli A, Dolfi M, Morosi S, et al. Ultra-wide band positioning in sport: how the relative height between the transmitting and the receiving antenna affects the system performance[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2020, 27(1): 18-29.
- [12] 张美燕, 蔡文郁, 杨启尧. 一种 UWB 基站迭代自定位与校准方法[P]. 浙江: CN111641919A, 2020-09-08.
- Zhang Meiyun, Cai Wenyu, Yang Qiyao. An iterative self localization and calibration method for UWB base stations[P]. Zhejiang: CN111641919A, 2020-09-08 (in Chinese).
- [13] 杨晓飞, 王俊, 叶辉, 等. 一种 UWB 室内定位基站的自动配置方法[P]. 江苏: CN110022574A, 2019-07-16.
- Yang Xiaofei, Wang Jun, Ye Hui, et al. An automatic configuration method of UWB indoor positioning base station[P]. Jiangsu: CN110022574A, 2019-07-16 (in Chinese).
- [14] Baba A I, Wu F, Ahmed T. A naive time of flight ranging scheme for wireless sensor networks[J]. International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, 2020, 25(4): 35957-35967.
- [15] 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 Sheng, Hu Zhigang, Zhao Qile, et al. Principle and accuracy verification of UWB positioning based on TOF model[J]. Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(3): 247-251(in Chinese).
- [16] 付继飞. 测距误差服从广义正态分布研究[J]. 科技创新与生产力, 2011(8): 76-78.
- Fu Jifei. Research on ranging error obeying generalized normal distribution[J]. Science and Technology Innovation and Productivity, 2011(8): 76-78(in Chinese).
- [17] 钱镔, 陆明泉, 冯振明. 基于 TDOA 原理的地面定位系统中 HDOP 的研究[J]. 电讯技术, 2005(3): 135-138.
- Qian Yi, Lu Mingquan, Feng Zhenming. Research on HDOP in ground positioning system based on TDOA principle[J]. Telecommunication Technology, 2005(3): 135-138(in Chinese).

(编辑: 孟彬)