文章编号: 1671-251X(2022)06-0134-05 DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022020035

基于 UWB 的井下人员定位算法研究

贺磊[1]， 魏明生[1]， 仇欣宇[1]， 唐守锋[2]， 李文帅[1]， 张旭[1]

（1. 江苏师范大学 物理与电子工程学院，江苏 徐州 221116；
2. 中国矿业大学 信息与控制工程学院，江苏 徐州 221008）

摘要: 针对井下高实时性、高精度的人员定位需求，研究了基于超宽带(UWB)的井下人员定位算法。采用双边双向测距(DS-TWR)方式测量定位基站与定位标签的距离，该方式不需要定位基站与定位标签系统时钟同步，从源头上提高了定位精度。根据测距信息，采用加权最小二乘(WLS)算法和 CHAN 两种位置解算算法估算定位标签的坐标，通过静态实验和动态实验对 2 种算法的性能进行对比分析，并通过均方根误差和误差累计分布函数(CDF)综合评估定位精度。实验结果表明：静态实验时，CHAN 算法和 WLS 算法的均方根误差分别为 5.878 6，8.007 4 cm，CHAN 算法的均方根误差比 WLS 算法低 26.59%；动态实验时，CHAN 算法和 WLS 算法的均方根误差分别为 12.292 3，21.180 9 cm，CHAN 算法的均方根误差比 WLS 算法低 41.97%；CHAN 算法的定位精度高于 WLS 算法，更加适用于煤矿井下人员定位。

关键词: 井下人员定位；超宽带；双边双向测距；加权最小二乘算法；CHAN 算法
中图分类号: TD655.3 文献标志码: A

Research on positioning algorithm of underground personnel based on UWB

HE Lei[1], WEI Mingsheng[1], QIU Xinyu[1], TANG Shoufeng[2], LI Wenshuai[1], ZHANG Xu[1]
(1. School of Physics and Electronic Engineering , Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;
2. School of Information and Control Engineering, China University of
Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Aiming at the requirement of high real-time and high precision personnel positioning in underground mine, the positioning algorithm of underground personnel based on ultra wide band (UWB) is studied. The double-sided two-way ranging (DS-TWR) mode is adopted to measure the distance between the positioning base station and the positioning tag. This mode does not need the clock synchronization of the positioning base station and the positioning tag system. Therefore, the positioning precision is improved from the source. According to the ranging information, the weighted least squares (WLS) algorithm and CHAN algorithm are used to estimate the coordinates of the positioning tag. The performance of the two algorithms is compared and analyzed through static and dynamic experiments. The positioning precision is comprehensively evaluated through the root mean square error and the cumulative distribution function (CDF) of the error. The experimental results show that in static experiment, the root mean square errors of CHAN algorithm and WLS algorithm are 5.878 6 cm and 8.007 4 cm respectively. The root mean square error of CHAN algorithm is 26.59% lower than that of WLS algorithm. In dynamic experiment, the root mean square errors of CHAN algorithm and WLS algorithm are 12.2923 cm and 21.1809 cm respectively. The root mean square error of CHAN algorithm is 41.97% lower than that of WLS algorithm. The positioning precision of CHAN algorithm is higher than that of

收稿日期: 2022-02-20; **修回日期**: 2022-06-05; **责任编辑**: 胡娴。
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0205500)；江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX20_0908，SJCX21_1134)。
作者简介: 贺磊(1994—)，男，江苏徐州人，硕士研究生，主要研究方向为室内定位系统，E-mail:786429282@qq.com。通信作者：魏明生(1976—)，男，山东济宁人，副教授，博士，主要从事传感器检测方面的研究工作，E-mail: weims516@163.com。
引用格式: 贺磊，魏明生，仇欣宇，等. 基于 UWB 的井下人员定位算法研究[J]. 工矿自动化，2022，48(6)：134-138.
HE Lei, WEI Mingsheng, QIU Xinyu, et al. Research on positioning algorithm of underground personnel based on UWB[J]. Journal of Mine Automation，2022，48(6)：134-138.
扫码移动阅读

WLS algorithm. And CHAN algorithm is more suitable for underground personnel positioning in coal mines.

Key words: underground personnel positioning; ultra wide band; double-sided two-way ranging; weighted least squares algorithm; CHAN algorithm

0　引言

瓦斯爆炸、塌方等灾难严重威胁井下人员的生命安全，因此有必要建立有效的井下人员精确定位方案，当发生矿难时，施救人员可对矿工进行精准定位并展开营救[1]。当前井下定位技术种类较多，如 RFID、ZigBee、WiFi、蓝牙等[2]。这几种定位技术基本可满足井下定位要求，但仍存在信号传输距离短、定位精度较低、功耗较高、易受外界干扰等缺陷[3-5]。超宽带（Ultra Wide Band, UWB）定位技术采用纳秒级别的脉冲信号进行通信，具有较高的时间分辨率，适用于非视距环境下的定位，且定位精度较高，与其他几种定位技术相比具有明显优势。

UWB 定位基于测距原理，常用的测距算法包括单边双向测距（Single-Sided Two-Way Ranging, SS-TWR）和双边双向测距（Double-Sided Two-Way Ranging, DS-TWR）。其中 SS-TWR 因受时钟偏移的影响，误差较大[6-7]。DS-TWR 在测距双方之间发送多条信息，获得多个时间戳，通过加长测量周期来提高测量精度[8]。井下人员定位对精度要求较高，因此适宜采用 DS-TWR 测距算法[9]。根据测距信息，通过位置解算算法可得到定位标签的坐标。本文通过静态实验和动态实验对加权最小二乘（Weighted Least Squares, WLS）算法[10]和 CHAN[11]两种位置解算算法进行对比分析，并通过均方根误差和误差累计分布函数（Cumulative Distribution Function, CDF）综合评估定位精度。

1　DS-TWR 测距模型

DS-TWR 测距模型如图 1 所示，其中 T_{prop} 为 UWB 信号在定位基站与定位标签之间的传播时间，可利用定位基站和标签的时钟系统记录的时间戳 T_1—T_3, T_1'—T_3'来计算；T_{round1} 为基站开始发送信号到基站接收到标签信号的时间；T_{reply1} 为标签接收到基站信号到标签开始回复基站的时间；T_{round2} 为标签开始回复基站到标签再次接收到基站信号的时间；T_{reply2} 为基站接收到标签的回复信号到基站再次发送信号的时间；T_{m1}, T_{m2} 分别为定位基站和标签的系统时钟。

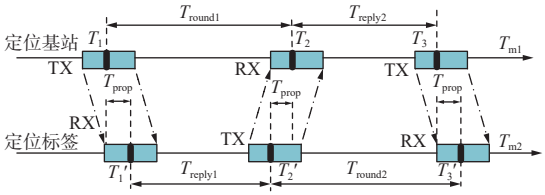

图 1　矿井 DS-TWR 测距模型

Fig. 1　Mine DS-TWR ranging model

由图 1 可得

$$T_{\text{round1}} = 2T_{\text{prop}} + T_{\text{reply1}} \tag{1}$$

$$T_{\text{round2}} = 2T_{\text{prop}} + T_{\text{reply2}} \tag{2}$$

将式（1）和式（2）相乘后移项可得

$$T_{\text{round1}}T_{\text{round2}} - T_{\text{reply1}}T_{\text{reply2}} = T_{\text{prop}}(4T_{\text{prop}} + 2T_{\text{reply1}} + 2T_{\text{reply2}}) \tag{3}$$

将式（1）和式（2）代入式（3）可得

$$T_{\text{round1}}T_{\text{round2}} - T_{\text{reply1}}T_{\text{reply2}} = T_{\text{prop}}(T_{\text{round1}} + T_{\text{round2}} + T_{\text{reply1}} + T_{\text{reply2}}) \tag{4}$$

$$T_{\text{prop}} = \frac{T_{\text{round1}}T_{\text{round2}} - T_{\text{reply1}}T_{\text{reply2}}}{(T_{\text{round1}} + T_{\text{round2}}) + (T_{\text{reply1}} + T_{\text{reply2}})} \tag{5}$$

由式（5）可计算出电磁波在定位标签与定位基站之间的传播时间，结合信号传播速度可计算出传播距离。获得定位基站与定位标签之间的距离后，再通过位置解算算法计算定位标签的坐标[12]。

2　位置解算算法

2.1　WLS 算法

设 4 个基站的坐标为(x_i, y_i), i=1, 2, 3, 4, 待测定位标签的坐标为(x, y)，定位标签到基站的真实距离为 r_i, 测量距离为r_i', $K=x^2+y^2$, $\boldsymbol{X}_{\text{ls}} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ K \end{bmatrix}$, 根据最小二乘算法可得

$$\boldsymbol{X}_{\text{ls}} = (\boldsymbol{A}^{\text{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\text{T}}\boldsymbol{b} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ -2x_3 & -2y_3 & 1 \\ -2x_4 & -2y_4 & 1 \end{bmatrix}$; $\boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} r_1'^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ r_2'^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ r_3'^2 - x_3^2 - y_3^2 \\ r_4'^2 - x_4^2 - y_4^2 \end{bmatrix}$。

求解式（6）即可得到定位标签坐标的最优估计值(x,y)。

普通最小二乘算法适用于各个误差项相等的情况，由于井下 UWB 定位环境复杂，为了提高定位标签位置解算精度，在普通最小二乘算法中引入加权矩阵 $\boldsymbol{W}$。设定位标签到第i个基站的测距误差为β_i, 则有

$$r_i' = r_i + \beta_i \tag{7}$$

用测量距离与真实距离的平方差表示误差矢量：

$$\boldsymbol{\varphi} = r_i'^2 - r_i^2 = (r_i + \beta_i)^2 - r_i^2 = 2r_i\beta_i + \beta_i^2 \tag{8}$$

在实际应用中，测量误差远小于测量的距离，因此式(8)中的β_i^2项可以忽略不计；由于不方便测量定位标签到基站的真实距离，通常利用r_i'代替真实距离 r_i 进行近似计算。误差矢量可以进一步表示为

$$\boldsymbol{\varphi} \approx 2r_i\beta_i = 2\boldsymbol{B\beta} \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_4 \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix}$。

误差矢量$\boldsymbol{\varphi}$的协方差矩阵为

$$\boldsymbol{\Psi} = E(\boldsymbol{\varphi\varphi}^{\mathrm{T}}) = 4\boldsymbol{B}E(\boldsymbol{\beta\beta}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{B} = 4\boldsymbol{BQB} \tag{10}$$

式中 E 为期望函数。

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \beta_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_4^2 \end{bmatrix} \tag{11}$$

最后对$\boldsymbol{\Psi}$求逆矩阵，得到加权矩阵 $\boldsymbol{W}$：

$$\boldsymbol{W} = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_4 \end{bmatrix} \tag{12}$$

结合式(6)得到 WLS 算法计算公式：

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{wls}} = (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{WA})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Wb} \tag{13}$$

上述推导是针对 4 个定位基站的情况，当基站数量为 4 个以上时可在此基础上类推。

2.2 CHAN 算法

在求解二维平面中的位置坐标时，若定位基站的数量大于 3，则会有冗余测距信息，可得到 2 个以上非线性方程。在 CHAN 算法求解过程中，首先使用 WLS 算法估计定位标签的初始位置坐标，然后结合已知约束条件再次应用 WLS 算法，得到最终位置坐标估计值。

仍以 4 个基站为例对 CHAN 算法进行推导，设 $\boldsymbol{z} = [x, y, r_1]^{\mathrm{T}}$，根据文献[13]可得

$$r_{i1}^2 + 2r_{i1}r_1 = K_i - K_1 - 2yy_{i1} - 2xx_{i1} \tag{14}$$

式中：r_{i1}为定位标签到第 i 个基站与到第 1 个基站之间的距离差；$K_i = x_i^2 + y_i^2$；x_{i1}，y_{i1}分别为第 i 个基站与第 1 个基站的横坐标之差和纵坐标之差。

将式(14)改写为

$$\boldsymbol{H} - \boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{z} = 0 \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{H} = -\frac{1}{2}\begin{bmatrix} r_{21}^2 - K_2 + K_1 \\ r_{31}^2 - K_3 + K_1 \\ r_{41}^2 - K_4 + K_1 \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}} = \begin{bmatrix} x_{21} & y_{21} & r_{21} \\ x_{31} & y_{31} & r_{31} \\ x_{41} & y_{41} & r_{41} \end{bmatrix}$。

当矩阵$\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}$可逆时$\boldsymbol{z}$的最大似然估计值$\boldsymbol{z}_{\mathrm{a}}$为

$$\boldsymbol{z}_{\mathrm{a}} = \arg\min[(\boldsymbol{H} - \boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{z}_{\mathrm{a}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}^{-1}(\boldsymbol{H} - \boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{z}_{\mathrm{a}})] = (\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}^{-1}\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}})^{-1}\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}^{-1}\boldsymbol{H} \tag{16}$$

式中$\boldsymbol{\psi} = c^2\boldsymbol{BQB}$，$c$ 为信号传播速度。

在实际应用中通常用$\boldsymbol{Q}$代替$\boldsymbol{\psi}$，则式(16)可改写为

$$\boldsymbol{z}_{\mathrm{a}} = (\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}})^{-1}\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{H} \tag{17}$$

根据定位基站与定位标签之间的距离约束关系得到误差矢量：

$$\boldsymbol{\varphi}_1 = \boldsymbol{h} - \boldsymbol{g}\boldsymbol{z}_{\mathrm{b}} \tag{18}$$

式中：$\boldsymbol{z}_{\mathrm{b}} = \begin{bmatrix} x^2 \\ y^2 \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{g} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{h} = \begin{bmatrix} z_{\mathrm{a}}^2(1) \\ z_{\mathrm{a}}^2(2) \\ z_{\mathrm{a}}^2(3) \end{bmatrix}$。

$\boldsymbol{\varphi}_1$的协方差矩阵为

$$\boldsymbol{Y}' = 4\boldsymbol{B}'\mathrm{cov}(\boldsymbol{z}_{\mathrm{a}})\boldsymbol{B}' \tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{B}' = \mathrm{diag}(x, y, r_1)$；$\mathrm{cov}(\boldsymbol{z}_{\mathrm{a}}) = (\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}^{-1}\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}})^{-1}$。

采用 WLS 算法对式(18)进行求解，得

$$\boldsymbol{z}_{\mathrm{b}} = (\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}^{-1}\boldsymbol{g})^{-1}\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}^{-1}\boldsymbol{h} \tag{20}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \pm\begin{bmatrix} \sqrt{z_{\mathrm{b}}(1)} \\ \sqrt{z_{\mathrm{b}}(2)} \end{bmatrix} \tag{21}$$

最后根据先验条件可以求得定位标签坐标估计值。

3 实验分析

为了对比分析 WLS 算法和 CHAN 算法的效果，在实验室模拟井下环境，采用 4 个定位基站进行实验，如图 2 所示。设 4 个定位基站 BS1—BS4 的坐标分别为(0, 0)，(560 cm, 0)，(560 cm, 800 cm)，(0, 720 cm)，实验设备数据更新频率为 1 Hz。

(a) 实验环境　　(b) 自制定位设备

图 2 实验环境与自制定位设备

Fig. 2 Experimental environment and self-made positioning equipment

3.1 静态实验分析

实验开始时，将定位标签放置在坐标(320 cm, 400 cm)处，采集测距信息，并利用 2 种算法进行定位，结果如图 3 所示。

计算定位标签估算位置与真实位置的欧氏距离，并绘制误差曲线，如图 4 所示。可看出，定位标签为静态时，CHAN 算法的定位误差小于 WLS 算

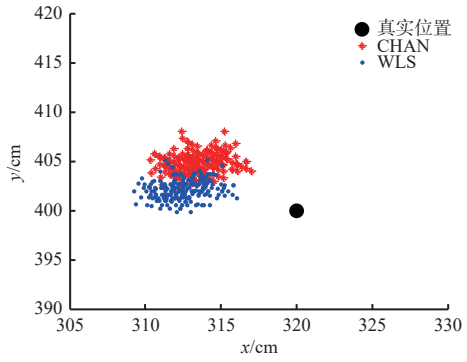

图 3　CHAN 与 WLS 算法定位结果(静态实验)

Fig. 3　Positioning results of CHAN and WLS algorithms (static experiment)

法。经计算，CHAN 算法和 WLS 算法的均方根误差分别为 5.878 6, 8.007 4 cm, CHAN 算法的均方根误差比 WLS 算法低 26.59%。

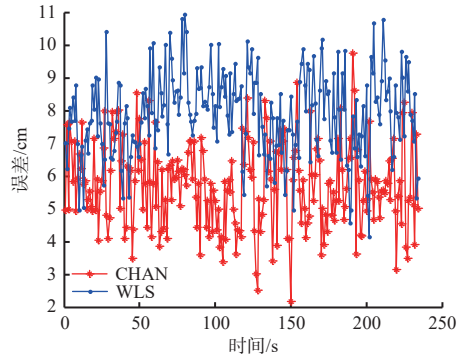

图 4　CHAN 与 WLS 算法误差对比(静态实验)

Fig. 4　Comparison of errors between CHAN and WLS algorithms(static experiment)

CHAN 算法和 WLS 算法的误差 CDF 曲线如图 5 所示。可看出，CHAN 算法的误差 CDF 曲线在 WLS 算法的左上方，在设置同一误差门限值的条件下，CHAN 算法的误差在门限值以内的概率较高。例如，当误差门限值取 7 cm 时，CHAN 算法的误差在 7 cm 以内的概率约为 80%, WLS 算法的误差在 7 cm 以内的概率约为 25%。

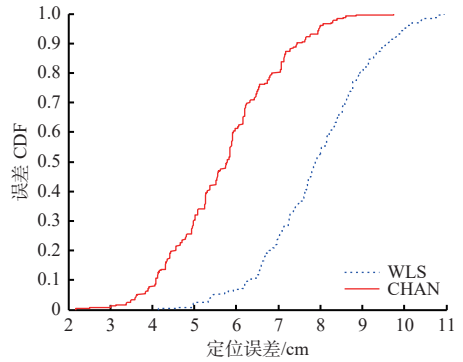

图 5　CHAN 与 WLS 算法的误差 CDF 曲线(静态实验)

Fig. 5　Error CDF curves of CHAN and WLS algorithms (static experiment)

3.2　动态实验分析

利用移动小车搭载定位标签，模拟井下携带定位标签的作业人员。定位标签起始点坐标为(160 cm, 400 cm)，结束点坐标为(480 cm, 400 cm)，小车匀速行驶。利用 CHAN 和 WLS 算法得到的定位结果如图 6 所示。可看出，用 CHAN 算法得到的轨迹更加接近真实轨迹。

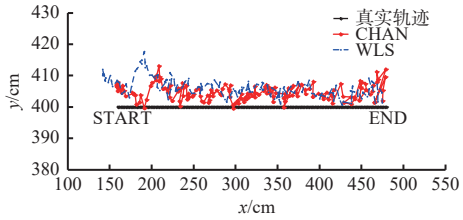

图 6　CHAN 与 WLS 算法定位结果(动态实验)

Fig. 6　Positioning results of CHAN and WLS algorithms (dynamic experiment)

计算不同时刻定位标签估算位置与真实位置的欧氏距离，并绘制误差曲线，如图 7 所示。可看出，定位标签为动态时，CHAN 算法的定位误差小于 WLS 算法。经计算，CHAN 算法和 WLS 算法的均方根误差分别为 12.292 3, 21.180 9 cm, CHAN 算法的均方根误差比 WLS 算法低 41.97%。

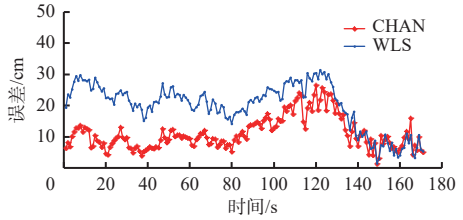

图 7　CHAN 与 WLS 算法误差对比(动态实验)

Fig. 7　Comparison of errors between CHAN and WLS algorithms(dynamic experiment)

CHAN 算法和 WLS 算法的误差 CDF 曲线如图 8 所示。

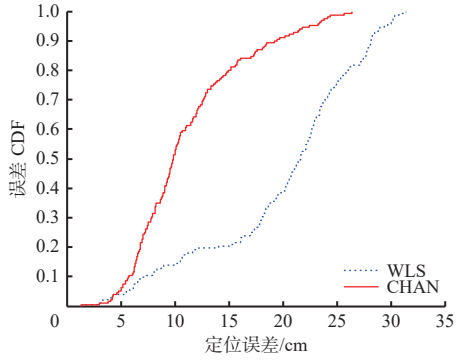

图 8　CHAN 与 WLS 算法的误差 CDF 曲线(动态实验)

Fig. 8　Error CDF curves of CHAN and WLS algorithms (dynamic experiment)

从图 8 可看出，CHAN 算法的误差 CDF 曲线基

本在 WLS 算法的上方，说明在动态实验中 CHAN 算法的定位精度高于 WLS 算法。

4　结语

研究了基于 UWB 的井下人员定位算法。采用 DS-TWR 方式测量定位基站与定位标签的距离，利用 WLS 算法和 CHAN 算法对静态测距信息和动态测距信息进行解算，最后通过均方根误差和误差 CDF 综合评估 2 种算法的定位性能。实验结果表明：静态实验时，CHAN 算法和 WLS 算法的均方根误差分别为 5.878 6, 8.007 4 cm, CHAN 算法的均方根误差比 WLS 算法低 26.59%；动态实验时，CHAN 算法和 WLS 算法的均方根误差分别为 12.292 3, 21.180 9 cm, CHAN 算法的均方根误差比 WLS 算法低 41.97%；CHAN 算法的定位精度高于 WLS 算法，更加适用于煤矿井下人员定位。

参考文献（References）：

[1] 王龙康，李祥春，李安金，等. 我国煤矿安全生产现状分析及改善措施[J]. 中国煤炭，2016，42(9)：96-100.
WANG Longkang，LI Xiangchun，LI Anjin，et al. Analysis and improvement measures on current situation of coal mine safety production in China[J]. China Coal，2016，42(9)：96-100.

[2] 汪义庭. 基于UWB的无线室内定位系统设计与实现[D]. 淮南：安徽理工大学，2019.
WANG Yiting. Design and implementation of wireless indoor positioning system based on UWB[D]. Huainan：Anhui University of Science and Technology，2019.

[3] BIANCHI V，CIAMPOLINI P，MUNARI I D. RSSI-based indoor localization and identification for ZigBee wireless sensor networks in smart homes[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2019，68(2)：566-575.

[4] VU-HOANG L，NGUYEN-MANH H，PHAN-DUY C，et al. A new technique to enhance accuracy of WLAN fingerprinting based indoor positioning system[C]//IEEE Fifth International Conference on Communications and Electronics，Danang，2014.

[5] CHEN X，WANG Z J. Reliable indoor location sensing technique using active RFID[C]//The 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation，Wuhan，2010.

[6] 刘鹏媛. 基于UWB的高速弹丸定距关键技术研究及实现[D]. 太原：中北大学，2020.
LIU Pengyuan. Research and implementation of the key technology of high speed projectile distance determination based on UWB[D]. Taiyuan：North University of China，2020.

[7] 严嘉祺. 基于UWB的室内定位系统的算法与误差分析[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
YAN Jiaqi. Algorithm and error analysis of indoor positioning system based on UWB[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2020.

[8] 陈思远，尹栋，牛轶峰. 基于UWB的SS-TWR改进方法研究与实现[J]. 计算机应用研究，2021，38(11)：3398-3402.
CHEN Siyuan，YIN Dong，NIU Yifeng. Research and implementation of improved SS-TWR method based on UWB[J]. Application Research of Computers，2021，38(11)：3398-3402.

[9] SHULE W，ALMANSA C M，QUERALTA J P，et al. UWB-based localization for multi-UAV systems and collaborative heterogeneous multi-robot systems[J]. Procedia Computer Science，2020，175：357-364.

[10] WANG Gang，CAI Shu，LI Youming，et al. A bias-reduced nonlinear WLS method for TDOA/FDOA-based source localization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology，2016，65(10)：8603-8615.

[11] LI Aiguo，LUAN Fuzeng. An improved localization algorithm based on CHAN with high positioning accuracy in NLOS-WGN environment[C]//The 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics，Hangzhou，2018：332-335.

[12] 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.
LIU Yijia. Research on UWB indoor positioning technology in non-line-of-sight environment[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2020.

[13] 顾慧东. 基于UWB的室内测距与定位系统[D]. 南京：南京邮电大学，2020.
GU Huidong. Indoor ranging and positioning system based on UWB[D]. Nanjing：Nanjing University of Posts and Telecommunications，2020.