文章编号:1671-251X(2019)08-0038-05　　DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17462

煤矿巷道多源数据融合定位算法研究

扫码移动阅读

包建军[1,2]

(1.中煤科工集团常州研究院有限公司,江苏 常州　213015;
2.天地(常州)自动化股份有限公司,江苏 常州　213015)

摘要:煤矿巷道非视距条件下单独使用飞行时间定位算法或接收信号强度算法存在方向判断不准确、定位误差较大等问题;飞行时间定位算法与接收信号强度算法联合定位,虽然在方向判断的准确率上较单独的飞行时间定位算法有所提高,但对于标签在非视距运动场景下的判断仍不够准确,定位轨迹不够平滑。针对上述问题,提出了一种基于飞行时间定位算法、接收信号强度及多项式插值方法的煤矿巷道多源数据融合定位算法。该算法首先测量标签与定位基站间的飞行时间,并计算接收信号强度,然后根据标签历史轨迹采用多项式插值方法拟合、预测当前时刻标签位置,根据预测位置、飞行时间和接收信号强度组合判定标签相对基站所在方向,最后通过加权数据融合优化定位结果,从而提高定位稳定性及准确度。实验结果表明,相比于单一飞行时间定位算法或接收信号强度算法,该算法有效提高了定位系统的精度和稳定性,可以更准确地判断标签相对基站的方向,方向判断准确率高达 99%。

关键词:煤矿井下精确定位;定位基站;方向判断;飞行时间;接收信号强度;插值预测;多源数据融合

中图分类号:TD655.3　　文献标志码:A

Research on multi-source data fusion positioning algorithm for coal mine roadway

BAO Jianjun[1,2]

(1.CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China;
2.Tiandi(Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: In the non-line-of-sight condition of coal mine roadway, the use of time of flight(TOF) positioning algorithm or received signal strength(RSS) algorithm alone has problems such as inaccurate direction judgement and large positioning errors; TOF positioning algorithm combined with RSS positioning algorithm, although accuracy of direction judgement is improved compared with the single TOF algorithm, the judgement of tags in non-line-of-sight motion scenes is still not accurate enough, and the positioning track is not smooth enough. In view of the above problems, a multi-source data fusion positioning algorithm based on TOF, RSS and polynomial interpolation prediction(PIM) was proposed. The algorithm first measures TOF between label and positioning base station and calculates RSS, then uses PIM to fit and forecast label position at the current moment combined with historical location data, and according to the combination of predicted position, TOF and RSS, the direction of the tag relative to the base station is determined. Finally, the positioning result is optimized by weighted data fusion, so as to improve positioning stability and accuracy. The experimental results show that compared with the single TOF positioning algorithm or RSS algorithm, the proposed algorithm can effectively improve accuracy and stability of the positioning system, and can more accurately determine direction of the tag relative to the base station, and direction determination accuracy is above 99%.

收稿日期:2019-06-17;**修回日期**:2019-07-25;**责任编辑**:张强。

基金项目:中国煤炭科工集团科技创新基金重点项目(2018-TD-ZD005);中国煤炭科工集团科技创新基金面上项目(2018-TD-MS013)。

作者简介:包建军(1975—),男,江苏如皋人,高级工程师,硕士,主要研究方向为煤矿通信定位与自动化,E-mail:baojj@tom.com。

引用格式:包建军.煤矿巷道多源数据融合定位算法研究[J].工矿自动化,2019,45(8):38-42.

BAO Jianjun. Research on multi-source data fusion positioning algorithm for coal mine roadway[J]. Industry and Mine Automation, 2019,45(8):38-42.

Key words: coal mine underground precise positioning; positioning base station; direction determination; time of flight; received signal strength; interpolation prediction; multi-source data fusion

0　引言

煤矿巷道、地铁隧道等复杂地下环境中的精确定位系统是实现人员安全和灾时施救的重要技术基础，也是未来实现机器协同作业、高效无人智能生产的关键技术支撑[1-4]。基于飞行时间（Time of Flight，TOF）的精确定位技术因具有精度高、部署方便[5]、定位精度不受信号发送功率、接收灵敏度和信号传输衰减影响[6]的特点被广泛应用于各类地下巷道精确定位系统中。考虑到精确定位的性能与部署成本，现有的煤矿巷道精确定位系统通常采用如图 1 所示的单定位基站双背向天线的部署方式，即定位基站中包含 2 个定位模块，每个定位模块连接 1 根定向天线，每根天线覆盖定位基站的一边，这种布置无需基站交叉覆盖就可实现巷道定位，具有简洁高效、方便部署的优势。但是该定位系统架构需要解决由于在矿井巷道中标签间相互遮挡、多径效应和非视距传播（Non-Line-of-Sight，NLOS）干扰等造成标签测量定位稳定性不高的问题。TOF 定位算法通过测量图 1 中标签与天线 A 和天线 B 的距离差来判断方向，在非视距及运动过程中这种方向判断方法会存在误判，同时，TOF 测距值会受到多径效应等干扰，使得测算位置的误差与波动较大。现有 RSS（Received Signal Strength，接收信号强度）定位算法大多只考虑了静态场景，而没有考虑结合标签运动信息对定位进行优化，在巷道定位中标签方位判断不准确。而 TOF 定位算法与 RSS 联合定位，虽然在方向判断的准确率上较单 TOF 定位算法有所提高，但对于标签在非视距运动场景下的判断仍不够准确，定位轨迹不够平滑。基于标签历史轨迹的多项式插值方法（Polynomial Interpolation Method，PIM）可以很好地平滑标签运动轨迹，同时能够预测标签下一时刻的位置坐标。鉴此，本文提出了一种基于 TOF、RSS 及 PIM 的煤矿巷道多源数据融合定位算法，该算法首先使用 TOF 测距获得标签与定位基站的距离，并计算 RSS 信息，然后结合历史数据使用 PIM 预测当前位置，最后将 TOF 测距值、RSS 以及预测位置进行融合，以提高定位稳定性及准确判断标签所在定位基站的方向。通过基于超宽带（Ultra Wide Band，UWB）与 2.4 G 啁啾扩频（Chirp Spread Spectrum，CSS）测距实验验证了该算法的可行性和有效性。

1　融合数据获取

煤矿巷道多源数据融合定位算法是将 TOF 测距及 RSS 测量值等静态位置测量数据与标签运动过程的 PIM 预测值相融合，实现更精确、更稳定的标签位置计算，以准确判断标签相对基站的方向及提高定位精度与稳定性。

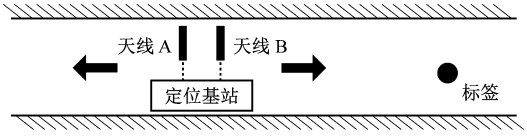


图 1　巷道精确定位部署方式

Fig. 1　Deployment way of roadway precision positioning

1.1　TOF 测距方法

对称双向双边测距（Symmetrical-Double-Sided Two-Way-Range，SDS-TWR）[8-9]方法通过 2 次消息交互消除定位基站与标签之间的频偏，具有测距精度高、距离计算简单等特点，在基于 UWB 及基于窄带 CSS 的 TOF 井下精确定位系统中都有着广泛的应用。对称双向双边测距过程如图 2 所示。

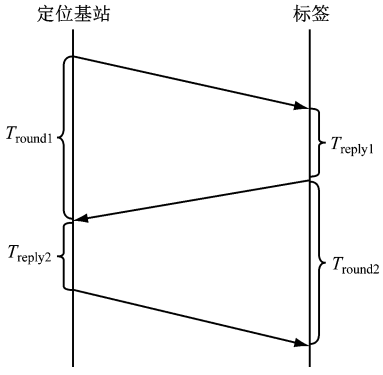


图 2　对称双向双边测距过程

Fig. 2　Symmetrical-double-sided two-way-range process

T_{round1} 与 T_{round2} 分别为定位基站与标签发送测距信号到接收到应答信号的时间，T_{reply1} 与 T_{reply2} 分别为标签与定位基站从接收到测距信号到回复应答信号的时间，则定位基站与标签间的测量距离 d_{MA} 为[9]

$$d_{MA} = \frac{1}{4}c_0\left(T_{round1} - T_{reply1} + T_{round2} - T_{reply2}\right) \tag{1}$$

式中 c_0 为光在真空中的传播速度。

TOF 测距过程与信号强度无关，因此，当标签靠近定位基站时不能区别自身位置。如图 1 所示，在标签靠近定位基站时可同时与定位基站的天线 A 与天线 B 进行 TOF 测距，标签很难根据 TOF 的测距结果判断自身处于天线 A 或天线 B 的覆盖范围，这就需要使用 RSS 进行辅助判断。

1.2　RSS 计算

在信号传输过程中，移动节点接收到的信号强

度会随着距离的变化而变化[10]。采用 Log-normal Shadowing 模型时[11]，传输损耗与节点间距离的关系为

$$P_r(d)=P_r(d_0)+10\alpha\times\lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \tag{2}$$

式中：$P_r(d)$为固定节点接收到的信号强度，d 为固定节点到移动节点的距离；$P_r(d_0)$为移动节点在参考距离为 d_0 时所接收到的信号强度；α 为取决于环境类型的路径损失指数。

在实际使用中，定位芯片常常不能直接给出 RSS 值，需要通过计算得到。如使用 UWB 定位芯片时，RSS 值(dB·m)为

$$\mathrm{RSS}=10\lg\left(\frac{C\times 2^{17}}{N^2}\right)-A \tag{3}$$

式中：C 为信道脉冲响应功率，可由芯片寄存器直接给出；N 为导频累积计数，也可由芯片寄存器直接给出；A 为与脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency，PRF)有关的常数，当 PRF 为 16 MHz 时，$A=113.77$，当 PRF 为 64 MHz 时，$A=121.74$。

在使用基于 CSS 的 2.4 G 窄带定位芯片时[12-14]，RSS 值也不能直接给出，但芯片在接收到信号后给出了自动增益控制(Auto Gain Control，AGC)值，RSS 值可以由 AGC 值间接推导得出。RSS 值(dB·m)表达式为

$$\mathrm{RSS}=g_{\mathrm{base}}-2\lg(\mathrm{AGC}) \tag{4}$$

式中 g_{base} 为变换常数，可通过实验测试得到。

1.3 多项式插值方法

人员或移动设备的运动轨迹通常是连续、平滑的，可以通过多项式函数曲线来拟合。使用基于多项式插值预测的方法可以在有效提高轨迹平滑度的前提下减小平滑带来的定位延时，在实际使用中可以通过融合定位及插值预测结果的方法来提高运动轨迹的稳定性。插值预测[15]的基本思想：① 记录标签运动过程中若干历史位置信息，并以时间为横坐标，位置为纵坐标，使用最小二乘法进行多项式曲线拟合，得到多项式方程。② 将当前时刻代入多项式方程得到当前的预测位置坐标。为了兼顾计算效率与轨迹平滑度，使用二次多项式曲线进行插值预测。

设待拟合的二次多项式为 $f(t)=at^2+bt+c$，其中 $f(t)$为位置坐标，t 为时间；a,b,c 分别表示二次多项式的二次项系数、一次项系数及常数项。选取标签运动过程中当前时刻之前 5 个点(t_0,p_0)、(t_1,p_1)、(t_2,p_2)、(t_3,p_3)、(t_4,p_4)为曲线拟合数据，其中 t_i 与 p_i 分别为第 i 次计算得到的时间与位置，其矩阵形式为

$$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{TX} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{P}$ 为预测位置，$\boldsymbol{P}=[p_0\quad p_1\quad p_2\quad p_3\quad p_4]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{T}$ 为预测时间，$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} t_0^2 & t_0 & 1\\ t_1^2 & t_1 & 1\\ t_2^2 & t_2 & 1\\ t_3^2 & t_3 & 1\\ t_4^2 & t_4 & 1\end{bmatrix}$；$\boldsymbol{X}$ 为待求多项式系数，$\boldsymbol{X}=[a\quad b\quad c]^{\mathrm{T}}$。

通过最小二乘法可以求得多项式系数 $\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T})^{-1}\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}$。求得二次多项式后代入当前时刻 t'，则可求得预测插值位置 $p=at'^2+bt'+c$。

2 数据融合过程

数据融合步骤：首先利用正向天线信号较背向天线信号强的特点，对位置的二次插值曲线预测值与实际测量值进行比较，并对标签所处基站的方位进行判断，然后将上一步求得的标签位置与二次多项式预测值进行加权融合[16]，最后得到更平滑的标签运动轨迹。方向判断与轨迹平滑流程如图 3 所示。

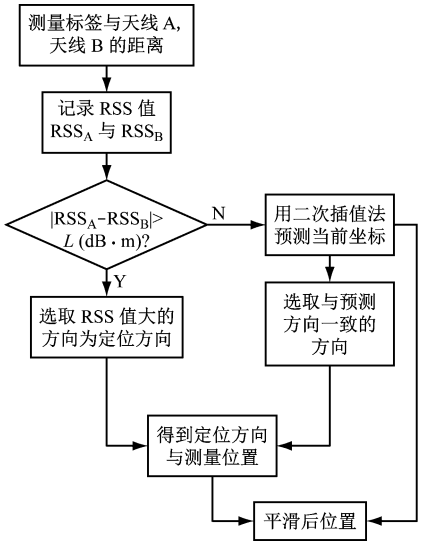


图 3 方向判断与轨迹平滑流程

Fig. 3 Flow of directional determination and trajectory smooth

在方向判断过程中，首先比较测距时天线 2 个方向的 RSS 值，当 RSS 差值大于正反天线接收到的信号差值 L(dB·m)时，选择 RSS 值大的方向为定位方向；RSS 差值小于 L 时，定位方向与二次插值曲线的预测值保持一致。当 2 根天线测距的 RSS 值之差 L 越大时，RSS 在方向判断上的正确率越高，但在离定位基站近时 RSS 判断将失效；反之若 L 取值过小，则会使标签在靠近定位基站时定位方向因受到干扰而抖动。同时 L 的选取还与天线正反方向的隔离度有关，当天线背瓣辐射较小时，L 可适当减小，反之 L 应适当放大。

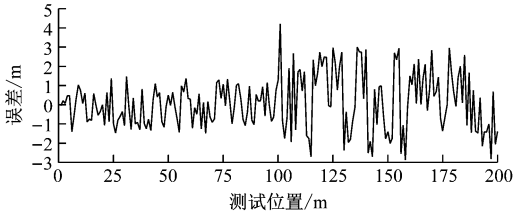
在位置平滑过程中，将修正定位方向后的距离测量值与二次插值曲线中的预测值加权相加。设

ω_1 与 ω_2 分别为测量与预测的加权值，$\omega_1+\omega_2=1$。ω_1 与 ω_2 是调节标签运动轨迹平滑度的参数，ω_1 越大，定位实时性越好，但定位抖动可能越大，轨迹平滑度下降；反之 ω_2 越大，定位抖动变小，轨迹平滑度较好，但标签位置发生突变时，位置更新可能会有延时。当使用精度较高的 UWB 定位系统，且定位环境较好时，原始定位结果的抖动较小，ω_1 可选取较大值以提高实时性；当定位精度较低或定位环境较差，如存在 NLOS 时，ω_2 可选取较大值，以提高定位稳定性及轨迹平滑度。

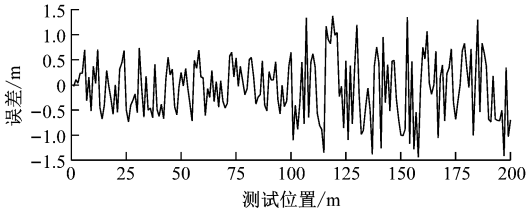
3　实验测试

采用 UWB 与 CSS 这 2 种常用技术进行实验来验证煤矿巷道多源数据融合定位算法的可行性和有效性。定位基站的部署如图 1 所示，设定位基站所在位置为坐标原点，天线 A 的覆盖方向为正方向，天线 B 的覆盖方向为负方向。标签在 NLOS 条件下的巷道内按指定路线每 2 s 运动一次，同时标签也每隔 2 s 与定位基站进行一次定位测量，连续采集 200 个数据点进行分析。

使用 UWB 定位技术时，射频中心频率为 3.9 GHz，PRF 为 64 MHz，定位基站和标签都使用精度为 1×10^{-6} 的 TCXOS 作为时钟源，RSS 计算公式见式(3)。优化参数选取如下：$L=2.3$ dB·m，$\omega_1=0.6$，$\omega_2=0.4$。UWB 测距定位误差如图 4 所示。



(a) UWB 测距定位时单独使用 TOF 算法的误差



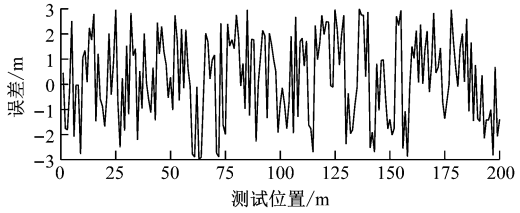
(b) UWB 测距定位时使用 TOF+RSS+PIM 算法的误差

图 4　UWB 测距定位误差

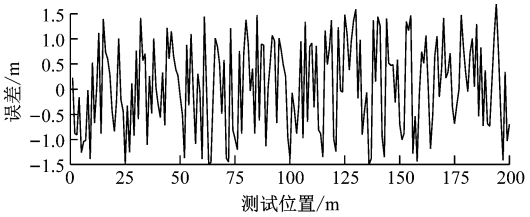
Fig. 4　Positioning error using UWB ranging

使用 CSS 定位技术时，射频中心频率为 2.4 GHz，RSS 计算公式见式(4)。优化参数选取如下：$L=2$ dB·m，$\omega_1=0.4$，$\omega_2=0.6$。CSS 测距定位误差如图 5 所示。

从图 4、图 5 可看出，UWB 的定位精度总体比 CSS 要高，但是 100 m 以外，非视距干扰更为明显。本文融合(TOF+RSS+PIM)算法将 UWB 的定位误差区间压缩到原来的 35%，将 CSS 的定位误差区间压缩到原来的 48%。



(a) CSS 测距定位时单独使用 TOF 算法的误差



(b) CSS 测距定位时使用 TOF+RSS+PIM 算法的误差

图 5　CSS 测距定位误差

Fig. 5　Positioning error using CSS ranging

使用不同算法验证方向判断的正确率，统计结果见表 1。

表 1　方向判断正确率统计结果

Table 1　Statistical result of direction adjustment correctness　　%

定位算法	方向判断正确率	
	UWB	CSS
TOF	89	83
TOF+RSS	91	92
TOF+RSS+PIM	100	99

从表 1 可看出，使用本文所述 TOF、RSS 与 PIM 融合算法，在 UWB 与 CSS 的定位过程中，方向判断准确率高于 99%，较其他方向判断算法精度有较大提高。

在使用 CSS 与 UWB 技术测试时，分别统计 TOF 算法与使用本文所述多数据融合定位算法所求得的测算位置与各参考测试位置的均方根误差(Root Mean Squared Error，RMSE)，见表 2。

表 2　定位误差统计结果

Table 2　Statistical result of positioning error　　m

定位算法	RMSE	
	UWB	CSS
TOF	0.45	1.87
TOF+RSS+ PIM	0.27	0.79

从表 2 可看出，在使用 UWB 定位或 CSS 定位时，单独使用 TOF 算法时 RMSE 较大，即定位误差较大。使用本文算法后，RMSE 有较大改进，优化了位置轨迹的稳定性及位置的精度，减小了定位轨迹的抖动。

4　结论

(1) 提出了一种基于 TOF、RSS 及 PIM 的煤矿

巷道多源数据融合定位算法，基于 UWB 和 CSS 定位技术介绍了对称双向双边的 TOF 测距方法、RSS 计算方法、PIM 预测方法及通过不同权值将这三者进行融合的数据融合方法。

(2) 煤矿巷道多源数据融合定位算法通过融合 TOF、RSS 及 PIM 预测数据，提高了标签在巷道内定位轨迹的稳定性和定位精度。实验结果表明，该算法方向判断准确率达到了 99%以上。

(3) 后续工作将着重对数据融合算法在平面和立体定位中的应用做进一步研究。

参考文献(References)：

[1] 谢和平，王金华，王国法，等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报，2018，43(5)：1187-1197.
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187-1197.

[2] 王国法，赵国瑞，任怀伟. 智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析[J]. 煤炭学报，2019，44(1)：34-41
WANG Guofa, ZHAO Guorui, REN Huaiwei. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 34-41.

[3] 霍中刚，武先利. 互联网+智慧矿山发展方向[J]. 煤炭科学技术，2016，44(7)：28-33.
HUO Zhonggang, WU Xianli. Development tendency of Internet plus intelligent mine[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 28-33.

[4] 王国法，王虹，任怀伟，等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J]. 煤炭学报，2018，43(2)：295-305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305.

[5] 孙哲星，孙继平. 异步测时矿井人员精确定位方法[J]. 煤炭学报，2018，43(5)：1464-1470.
SUN Zhexing, SUN Jiping. Underground coal mine accurate personnel positioning method based on asynchronous time-measuring [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1464-1470.

[6] 陈康，王军，包建军，等. 基于消息复用的 TOF 井下精确定位技术[J]. 工矿自动化，2019，45(2)：1-5.
CHEN Kang, WANG Jun, BAO Jianjun, et al. TOF underground accurate positioning technology based on message multiplexing [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(2): 1-5.

[7] MAO G, FIDAN B, ANDERSON B D O. Wireless sensor network localization techniques[J]. Computer Networks, 2007, 51(10): 2529-2553.

[8] 肖竹，王勇超，田斌，等. 超宽带定位研究与应用：回顾和展望[J]. 电子学报，2011，39(1)：133-141.
XIAO Zhu, WANG Yongchao, TIAN Bin, et al. Development and prospect of ultra-wideband localization research and application [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 133-141.

[9] KIM H. Performance analysis of the SDS-TWR-MA algorithm[C]// Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly, Leipzig, 2009: 21-24.

[10] 董哲，吴瑶，孙德辉. 室内定位技术的多源数据融合算法研究[J]. 计算机工程与设计，2014(5)：1526-1530.
DONG Zhe, WU Yao, SUN Dehui. Multi-source data fusion algorithm on indoor location technology[J]. Computer Engineering and Design, 2014 (5): 1526-1530.

[11] 朱剑，赵海，徐久强，等. 无线传感器网络中的定位模型[J]. 软件学报，2011，22(7)：1612-1625.
ZHU Jian, ZHAO Hai, XU Jiuqiang, et al. Localization model in wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2011, 22(7): 1612-1625.

[12] LEE K H, CHO S H. CSS based localization system using Kalman filter for multi-cell environment[C]// IEEE International Conference on Advanced Technologies for Communications, Hanoi, 2008: 293-296.

[13] 杨锌，林基明，刘争红. 基于 nanoLOC 的嵌入式定位系统[J]. 计算机系统应用，2012，21(9)：38-42.
YANG Xin, LIN Jiming, LIU Zhenghong. Embedded positioning system based on nanoLOC [J]. Computer Systems & Applications, 2012, 21(9): 38-42.

[14] 张岩，魏书田，张守祥. 啁啾扩频超宽带技术的测距定位研究[J]. 计算机工程与应用，2012，48(28)：130-134.
ZHANG Yan, WEI Shutian, ZHANG Shouxiang. Ranging and location based on chirp spread spectrum ultra-wideband technology[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(28): 130-134.

[15] WYLIE M P, HOLTZMAN J M. The non-line-of-sight problem in mobile location estimation[C]// IEEE International Conference on Universal Personal Communications, Manoa, 1996.

[16] 李波，马恒，王彦本. 基于 TOF 和 RSSI 的融合测距算法实现[J]. 西安邮电大学学报，2018，23(4)：57-61.
LI Bo, MA Heng, WANG Yanben. Implementation of fusion ranging algorithm based on TOF and RSSI [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2018, 23(4): 57-61.