

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105714

TDOA/SDS-TWR 联合的超宽带室内测距

尹秋园 余慧敏

(湖南师范大学 长沙 410000)

摘要: 超宽带室内定位系统常用的测距方法是 TDOA 和 SDS-TWR, 针对 TDOA 测距在硬件上难以实现时钟精确同步和 SDS-TWR 测距速度慢, 提出了一种基于超宽带信号的 TDOA 和 SDS-TWR 联合的新的测距方法。该方法将已知锚节点分为通信主节点和辅助节点, 可直接测得定位所需的主节点到目标节点的通信时间和目标节点到辅助节点的时间差信息, 并可以此计算出该定位区域内所有锚节点与目标节点的距离。通过误差分析发现, 所提方法在室内定位中足够准确, 且仿真结果表明, 其定位精度在 25 cm 内, 比 TDOA 测距的误差更小并改善了 SDS-TWR 测距速度慢的问题。

关键词: 超宽带; 室内定位; SDS-TWR 测距; TDOA 测距; 定位精度

中图分类号: TN98 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510.5015

TDOA/SDS-TWR combined ranging method based on ultra-wideband

Yin Qiuyuan Yu Huimin

(Hunan Normal University, Changsha 410000, China)

Abstract: TDOA and SDS-TWR are commonly used ranging methods in UWB indoor positioning systems, aiming at the difficulty of clock synchronization in TDOA and the slow speed of SDS-TWR ranging in hardware, a new ranging method based on the fusion of TDOA and SDS-TWR is proposed. This method divides the known anchor nodes into communication master node and secondary node, and can directly measure the communication time from the master node to the target node and the time difference between the target node and the secondary node required for positioning, and the distance between all anchor nodes and the target node in the positioning area can be calculated accordingly. Through error analysis, it is found that the proposed method is accurate enough in indoor positioning, and the simulation results show that its positioning accuracy is within 25 cm, which is smaller than the error of TDOA ranging and improves the slow speed of SDS-TWR ranging.

Keywords: ultra-wideband; indoor localization; SDS-TWR ranging; TDOA ranging; accuracy of positioning

0 引言

近几年,随着无线传感网络的发展,室内精确定位需求也随之增加,并逐渐应用于紧急救援、实时监护、井下定位、市场导购、监狱管理等社会的各个方面。目前室内定位技术包括超声波(US)定位技术^[1]、射频识别(RFID)定位技术^[2]、紫蜂(ZigBee)定位技术^[3]、蓝牙(Blue tooth)定位技术^[4]以及超宽带(ultra-wideband, UWB)定位技术^[5]。超声波定位通过适当布置传感器的位置,利用超声波测距,超声波在小范围的测距精度较高,王秋滢等^[6]设计了基于MES/超声波双足足绑式的定位系统,但是由于超声波在空气中的衰减较大,且易受环境干扰,导致其定位精度为1~3 m。RFID的定位原理是已知读写器的位置,测量标

签上接收到读写器信号的强度从而估算标签坐标,其代表性系统是 Landmarc,采用“最近邻居”算法估计节点空间位置,定位精度为0.05~5 m,该方法需要大量的参考标签,设备复杂。ZigBee定位通过信号传播路径损耗模型估算节点之间的距离从而实现定位,其缺点是信号传输受多径效应的影响大,定位精度仅为1~8 m^[7]。蓝牙定位适用于小范围区域,其设备小,功耗低,但抗干扰性差,定位精度为2.5 m左右^[8],不适合用于室内定位。

目前,室内定位技术的精度为厘米级。上述几种定位技术中,由于超宽带技术抗干扰能力强,具有超高的时间分辨率,更适用于室内高精度定位^[9]。本文基于超宽带网络,提出了一种基于超宽带信号到达时间差和双边双向测距联合的 SDS-TWR/TDOA 测距方法,实现了测距精度在

收稿日期:2021-01-19

• 75 •

25 cm 以内。本文首先详细介绍了 TDOA 测距原理和 SDS-TWR 测距原理及其优缺点;然后深入研究了所提的测距方法,并通过仿真结果分析了该方法的定位精度;最后进行总结与展望。

1 基本测距方法

1.1 TDOA 测距

到达时间差(time difference of arrival, TDOA)测距原理如图 1 所示。待测节点同时向两个或多个锚节点发送信号,锚节点记录信号到达的精确时刻,再计算任意两个锚节点接收到的 TDOA 值,最后将 TDOA 值转换成待测节点和锚节点 1、2 间的距离差^[10]。

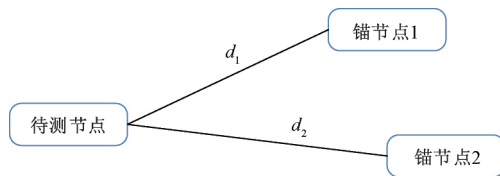


图 1 TDOA 测距原理

记锚节点 1 记录的信号到达时间为 T_1 , 锚节点 2 记录的信号到达时间为 T_2 , 到达时间差为:

$$\Delta T = T_2 - T_1 \tag{1}$$

待测节点到两个锚节点的距离差为:

$$\Delta d = \Delta T \times C \tag{2}$$

式中: C 为电磁波在空气中的传播速度。

TDOA 测距几何模型是以待测节点到达基站的时间差信息构建的双曲线,在先验信息下确定正确的双曲线交点来得到待测节点位置^[11],如图 2 所示。

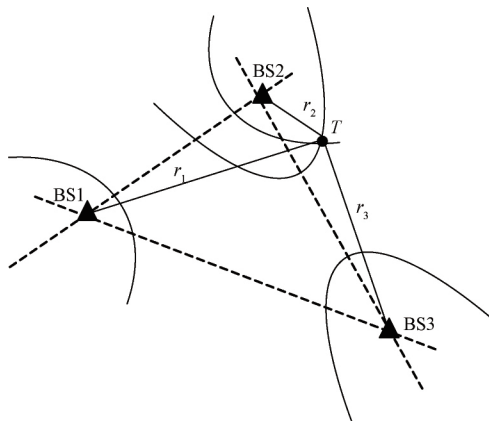


图 2 TDOA 几何模型

其中 BS1、BS2、BS3 均为位置已知的锚节点,坐标均已知,分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) ; T 为待测节点,其坐标为 (x, y) 。待测节点发送信号后,通过 TDOA 测距过程计算出锚节点接收到信号的时间差 $\tau_{i,1} (i > 1)$,根据双曲线几何模型构建方程求解得到 T 的坐标值。

$$\begin{cases} c\tau_{2,1} = r_2 - r_1 = \sqrt{(x-x_2)^2 - (y-y_2)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 - (y-y_1)^2} \\ c\tau_{3,1} = r_3 - r_1 = \sqrt{(x-x_3)^2 - (y-y_3)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 - (y-y_1)^2} \end{cases} \tag{3}$$

TDOA 测距的精度较高,但这是基于锚节点时钟精确同步的前提下实现的^[12],且在实际应用中难以实现。

1.2 SDS-TWR 测距

双边双向 (symmetric doublesided two-way ranging, SDS-TWR) 测距是对到达时间 (time of flight, TOF) 测距方法的改进,该方法利用信号双程传播时间测距,接收节点和发送节点协作,记录信号在收发节点间的往返时间^[13]。

SDS-TWR 测距的消息机制如图 3 所示。一次完整的测距过程由“请求—应答和二次请求—结束”3 条消息组成,节点 A、B 通过精确采样信号发出和接受的时间点,计算 T_1, T_2, T_3, T_4 四个时间间隔。

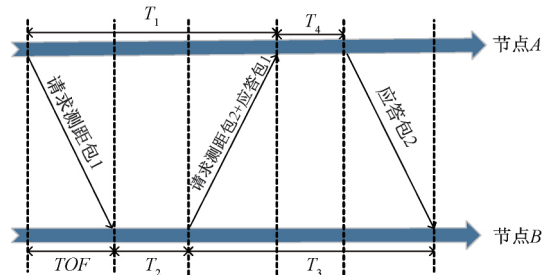


图 3 SDS-TWR 测距原理

求得信号的传输时间 TOF 为:

$$TOF = \frac{(T_1 - T_2) + (T_3 - T_4)}{4} \tag{4}$$

由于 T_1, T_4 由节点 A 的时钟采样计算, T_2, T_3 由节点 B 的时钟采样计算,记节点 A、B 的时钟偏差分别为 e_A, e_B , 则 4 个时间间隔的真实值为:

$$\hat{T}_1 = (1 + e_A) T_1 \tag{5}$$

$$\hat{T}_2 = (1 + e_B) T_2 \tag{6}$$

$$\hat{T}_3 = (1 + e_B) T_3 \tag{7}$$

$$\hat{T}_4 = (1 + e_A) T_4 \tag{8}$$

信号传输时间的测量值 \hat{TOF} 和理论值 TOF 的误差为:

$$T_{err} = \hat{TOF} - TOF = \frac{1}{4}(e_A - e_B)(T_2 - T_4) \tag{9}$$

由式(9)可见, T_{err} 与 T_3 和 T_2 的差值成正比,且该差值越接近于 0 时,越小。该方法利用“ $A \rightarrow B$ ”和“ $B \rightarrow A$ ”两次互补的测距过程,抵消了由于节点 A 与节点 B 之间的时钟偏差带来的误差。

根据 IEEE 802.15.4a 标准下规定的时钟时序,锚节点存在高达 $\pm 20 \times 10^{-6}$ 的时钟偏移。假设节点 A、B 的时钟偏移均为 $\pm 20 \times 10^{-6}$,将式(9)的时间误差转换为距离误差

d_{err} , 其与 $(e_A - e_B)$, $(T_2 - T_4)$ 之间的关系如图 4 所示。由于 d_{err} 与 $(T_2 - T_4)$ 成正比, 可以使 $(T_2 - T_4)$ 尽可能接近于 0 以减小误差, 即“ $A \rightarrow B$ ”和“ $B \rightarrow A$ ”两次测距过程尽可能对称。

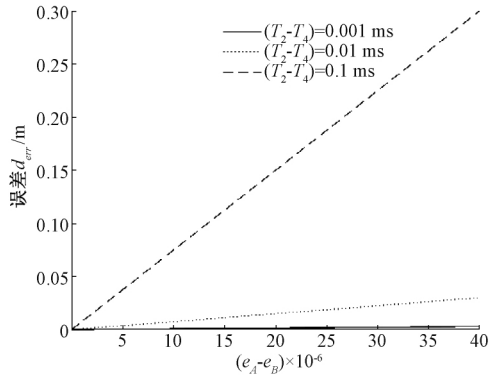


图 4 距离误差与 $(e_A - e_B)$, $(T_2 - T_4)$ 的关系

SDS-TWR 测距无需精确的时钟同步就可以获得待测节点到锚节点的信号飞行时间 TOF^[14]。但实际上, T_2 依赖于节点 A 的时钟, T_4 依赖于节点 B 的时钟, 两者的计时器相互独立, 使 $(T_2 - T_4)$ 等于 0 是非常困难的, 且完成一次测距有 2 次时延, 耗时太长。

2 TDOA/SDS-TWR 联合测距

针对 TDOA 在硬件上难以实现时钟的精确同步和 SDS-TWR 耗时长, 本文提出了一种可直接采样得到 TDOA 值的测距方法, 定位精度在 25 cm 内, 其测距原理如图 5 所示。

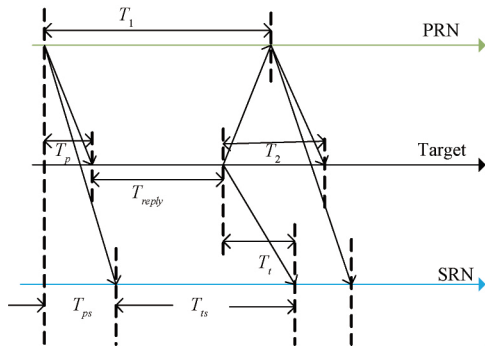


图 5 TDOA/SDS-TWR 联合测距原理

不同于 TDOA 测距, 此时在待测节点和多个锚节点间不是采用同一种方法获得时间信息, 而是将锚节点分为通信主节点 (PRN) 和辅助节点 (SRN), 辅助节点到目标节点 (Target) 和主节点采用 TDOA 测距方法, 主节点和目标节点之间采用 SDS-TWR 测距方法, 并且与传统的 SDS-TWR 不同的是为了减小耗时, 在发送二次应答信号时没有时延。整个信号发送过程如下:

1) 通信主节点同时发送初始数据包给目标节点和辅助节点;

2) 目标节点接收到初始数据包后, 再经过一段应答时间 T_{reply} , 同时发送应答数据包给主节点和辅助节点;

3) 主节点接收到应答数据包的同时发送二次应答数据包给目标节点和辅助节点, 这里的二次应答数据包包含下一轮定位的初始数据包的内容。

通过精确采样信号发出和接受的时间点, 计算 $T_1, T_2, T_p, T_{reply}, T_t, T_{ps}, T_{is}$ 。其中, T_{is} 为辅助节点接收的两个信号的 TDOA 测量值, 由于主节点到辅助节点的距离已知, 因此 T_{ps} 也已知。

根据图 5 可推导出公式:

$$T_1 = 2T_p + T_{reply} \quad (10)$$

$$T_2 = 2T_p \quad (11)$$

则主节点到目标节点的信号飞行时间 T_p 为:

$$T_p = \frac{T_1 - T_{reply} + T_2}{4} \quad (12)$$

也可以组合为:

$$T_p = \frac{T_1 \times T_2}{T_1 + T_{reply} + T_2} \quad (13)$$

同理, 从图 5 也可推导出:

$$T_{ps} + T_{is} = T_p + T_{reply} + T_t \quad (14)$$

那么目标节点到辅助节点的信号飞行时间 T_t 为:

$$T_t = T_{ps} + T_{is} - T_p - T_{reply} \quad (15)$$

由此, 便可得到目标节点分别到主节点和辅助节点的信号飞行时间, 再转换成距离进行定位。

本文所提方法在测距过程中同时使用了 TDOA 和 SDS-TWR 两种方法, 因此将其称为 TDOA/SDS-TWR 联合测距。

2.1 误差分析

上述是理想情况下的 TDOA/SDS-TWR 联合测距。在实际中, 存在多径效应导致的无线传播的延迟, 以及设备的晶振缺陷和时钟不同步带来的时序问题, 使测距存在较大的误差。多径效应产生的误差可从信道模型^[15]、多径衰弱^[16]和 NLOS^[17]进行分析, 文献[18-20]也给出了一定的改进方法, 本文不做讨论, 只分析晶振产生的时钟漂移给 TDOA/SDS-TWR 联合测距带来的误差。

记主节点、目标节点、辅助节点的时钟偏移分别为 e_p 、 e_t 、 e_s , 则主节点到目标节点的信号飞行时间的测量值 \hat{T}_p 和理论值 T_p 的误差为:

$$T_{p-err} = \hat{T}_p - T_p = \frac{1}{4}(e_p T_1 - e_t (T_2 - T_{reply})) \quad (16)$$

将式(10)、(11)代入得:

$$T_{p-err} = \frac{1}{2}(e_p + e_t)T_p + \frac{1}{4}(e_p - e_t)T_{reply} \quad (17)$$

类似地, 目标节点到辅助节点的飞行时间的测量值 \hat{T}_t 和理论值 T_t 的误差为:

$$T_{t-err} = \hat{T}_t - T_t = e_s T_{is} - e_p T_p - \frac{T_{reply}}{2}(e_p + e_t) \quad (18)$$

也可以表示为:

$$T_{t-err} = e_s T_{ts} - e_p T_p - e_t T_{reply} = e_s T_{ts} - T_{p-err} - e_t T_{reply} \quad (19)$$

由式(17)可见,当 3 个节点的时钟偏移相等时, T_p 的误差最小。设节点的时钟偏移均为 $\pm 20 \times 10^{-6}$, 主节点到目标节点的距离为 9 m, T_p 的误差为: $T_{p-err} = 20(\times 10^{-6})T_p$, 其值为 0.6 ps, 对应的距离为 0.012 cm, 这在室内定位系统中是非常理想的,但在实际中难以实现。

因此再通过式(13)分析主节点到目标节点的信号飞行时间的测量值和理论值的误差,主节点到目标节点的飞行时间的测量值为:

$$\hat{T}_p = \frac{(1+e_p)(1+e_t) \times T_1 \times T_2}{(1+e_p)T_1 + (1+e_t)T_{reply} + (1+e_t)T_2} \quad (20)$$

相应的误差值为:

$$T_{p-err} = \frac{2e_p e_t + e_p + e_t}{2 + e_p + e_t} \times T_p \quad (21)$$

若给定 $e_p = 20 \times 10^{-6}$, $e_t = 30 \times 10^{-6}$, 则误差值约为 $2.5 \times 10^{-5} T_p$, 该误差在室内定位中已经足够准确。

类似地,目标节点到辅助节点的误差值采用式(19)计算,并将式(21)及 $T_{ts} = T_p + T_{reply} + T_t - T_{ps}$ 代入可得:

$$T_{t-err} = (e_s - e_t)T_{reply} + e_s(T_t - T_{ps}) + \left(e_s - \frac{2e_p e_t + e_p + e_t}{2 + e_p + e_t} \right) \times T_p \quad (22)$$

其中 T_t 和 T_{ps} 分别是主节点到辅助节点的飞行时间和目标节点到辅助节点的飞行时间,所以 $(T_t - T_{ps})$ 足够小可以忽略不计;而 $\left(e_s - \frac{2e_p e_t + e_p + e_t}{2 + e_p + e_t} \right)$ 在上述讨论中也可以确定其值足够小,因此, T_t 的误差主要由 T_{reply} 和 $(e_s - e_t)$ 决定。

2.2 仿真分析

1) 主节点到目标节点的测距误差分析

在上述误差分析中得到了主节点到目标节点的测距误差公式,后续分析中采用下式:

$$\Delta d = \left(\frac{1}{2}(e_p + e_t)T_p + \frac{1}{4}(e_p - e_t)T_{reply} \right) \times C \quad (23)$$

在式(23)中,由于信号飞行时间非常短,测距误差主要取决于目标节点的 T_{reply} 以及 $(e_p - e_t)$ 。

设主节点到目标节点的距离为 9 m,主节点的时钟偏移为 20×10^{-6} 。测距误差随 T_{reply} 的变化情况如图 6 所示。测距误差随 T_{reply} 的增加而增大,当 T_{reply} 为 0.2 ms 时,无论目标节点的时钟偏移多少,其测距误差始终在 25 cm 内。

测距误差随 e_t 的变化情况如图 7 所示。测距误差 < 25 cm,并随 e_t 的增大而减小,当 e_t 为 20×10^{-6} 时,测距误差接近于 0,这是因为目标节点和主节点的时钟偏移相等,即 $e_p - e_t = 0$, 此时误差值足够小可以忽略。

2) 目标节点到辅助节点的测距误差分析

同样在误差分析中得到了目标节点到辅助节点的测距

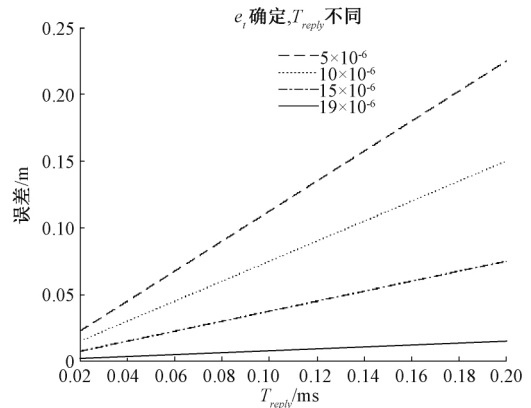


图 6 测距误差随应答时间的变化

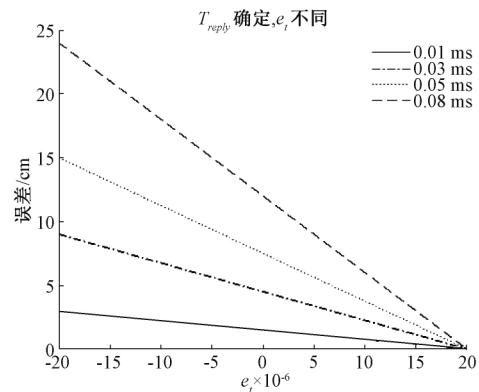


图 7 测距误差随时钟偏移的变化

误差式(18),并将式(15)代入得:

$$\Delta d = (e_s(T_t - T_{ps}) + (e_s - e_p)T_p + \left(e_s - \frac{e_p + e_t}{2} \right) T_{reply}) \times C \quad (24)$$

同理,目标节点到辅助节点的距离误差由应答时间 T_{reply} 和时钟偏移差值 $\Delta e (\Delta e = e_s - (e_p + e_t)/2)$ 决定。

设辅助节点的晶振偏移为 10×10^{-6} 。目标节点到辅助节点的测距误差随 T_{reply} 的变化情况如图 8 所示。随着 T_{reply} 和 e_t 的增加,测距误差也在逐渐增大,当应答时间 T_{reply} 为 0 时,测距误差也接近于 0。

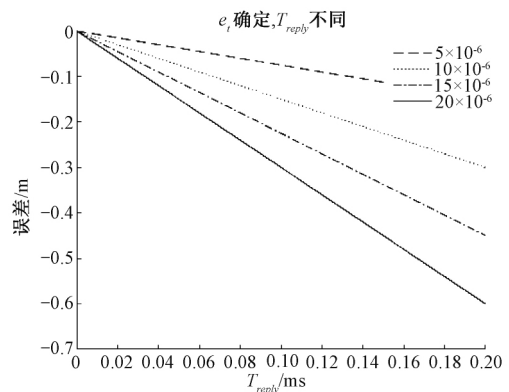


图 8 测距误差随应答时间的变化

目标节点到辅助节点的测距误差随 e_t 的变化如图 9 所示。在不同的应答时间下存在一个交点, 交点上的测距误差为 0, 这是由于当 $e_t = 0$ 时, $\Delta e = 0$, 测距误差也接近于 0。

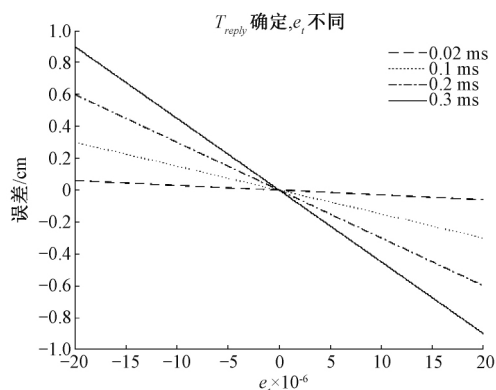


图 9 测距误差随时钟偏移的变化

综合以上仿真结果及分析讨论来看, 主节点到目标节点可以达到 < 25 cm 的定位精度, 而目标节点到辅助节点的定位精度可以随着 T_{reply} 和 e_t 的减小而提高。

3 结 论

本文分析了目前主流测距方法的定位性能, 并针对其不足之处提出了基于超宽带信号到达时间差和双边双向联合的 TDOA/SDS-TWR 测距方法。主节点发送测距信号进行测距, 主节点、辅助节点和目标节点精确采样信号发出到接收的时间点, 用改进的 SDS-TWR 得出目标节点到辅助节点的距离, 与传统的 SDS-TWR 测距相比减小了耗时, 用 TDOA 测距得出主节点到目标节点的距离, 且 TDOA 值由辅助节点直接采样得到, 无需计算。通过仿真分析可知, 本文提出的 TDOA/SDS-TWR 联合测距方法有效且提高了定位精度, 实现了 < 25 cm 的定位精度。今后将继续对所提方法进行改进, 一方面, 通过误差分析, 本文提出的方法还可以对目标节点到监听节点的测距进行改进, 进一步提高测距精度; 另一方面, 研究将此方法用于多目标的测距, 进一步检验该方法的定位精度。

参考文献

- [1] ZHANG L, SHI S L, SUN Y Y, et al. Indoor localization system based on an ultrasonic sensor network [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 1518: 3105-3109.
- [2] CUI D, ZHANG Q. The RFID data clustering algorithm for improving indoor network positioning based on LANDMARC technology [J]. *Cluster Computing*, 2019, 22(3): 5731-5738.
- [3] 浦宇欢, 毛丽民, 刘龙飞. 基于 ZigBee 的机器人室内定位设计 [J]. *实验室研究与探索*, 2017, 36(4): 64-68.
- [4] 陈伟. 蓝牙定位技术的探讨及测试 [J]. *国外电子测量*

技术, 2020, 39(10): 143-146.

- [5] ZHANG K, SHEN C, ZHOU Q, et al. A combined GPS UWB and MARG locationing algorithm for indoor and outdoor mixed scenario [J]. *Cluster Computing*, 2019, 22(3): 5965-5974.
- [6] 王秋滢, 周璐瑶, 郭铮, 等. 基于 MEMS/超声波双足足绑定式定位系统的实现 [J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(4): 919-925.
- [7] 侯启真, 史秉鑫, 刘衍帆. 基于 RSSI 的 ZigBee 定位技术研究 [J]. *计算机应用与软件*, 2016, 33(4): 134-137.
- [8] 卢燕, 栗勇军. 基于低功耗蓝牙的室内定位技术研究 [J]. *测控技术*, 2018, 37(4): 55-57, 63.
- [9] JIANG Q, MA Y, LIU K, et al. A probabilistic radio map construction scheme for crowdsourcing-based finger-printing localization [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(10): 3764-3774.
- [10] 高思琪, 孙建平. UWB 定位技术的应用研究 [J]. *仪器仪表用户*, 2019, 26(3): 77-82.
- [11] 高健, 陆阳, 李庆巧, 等. 采用三次通信的 TOF 与 TDOA 联合定位算法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(3): 66-73.
- [12] 朱自强. 超宽带定位的关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [13] 宋洋. 超宽带室内定位技术研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [14] 纪言, 唐思宇, 程晨, 等. 基于 TDOA 的 UWB 室内定位系统的研发 [C]. *物联网与无线通信-2018 年全国物联网技术与应用大会论文集*, 2018: 75-77.
- [15] 龚辉. 超宽带混合信道的信道估计 [J]. *电子测量技术*, 2015, 38(2): 134-137.
- [16] 汪嘉文. 考虑透射的室内复杂环境中超宽带信号多径传播特性研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2014.
- [17] 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.
- [18] 杨秀梓, 王敬东, 刘亚飞, 等. UWB/惯性技术组合优化的室内定位技术研究 [J]. *电子测量技术*, 2019, 42(15): 132-138.
- [19] 陈莹, 陈孝君, 钟菲, 等. 一种非合作超宽带信道盲估计算法 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 17(4): 310-314.
- [20] 贺晶晶, 姜平, 冯晓荣. 基于 UWB 的无人运输车的导航定位算法研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(11): 1743-1749.

作者简介

尹秋园, 硕士研究生, 主要研究方向为超宽带定位。

E-mail: 1752430343@qq.com