

基于UWB的增强非对称双边双向测距算法研究

王春琦¹, 冯大权¹, 何春龙¹, 陈常婷²

(1. 深圳大学 广东省智能信息重点实验室, 广东 深圳 518060;
2. 深圳技术大学 大数据与互联网学院, 广东 深圳 518118)

[摘要] 本文对 IEEE 802.15.4 协议下室内环境中超宽带信号的精确测距能力进行了研究。针对传统算法无法满足实际应用场景中低功耗、高实时性和高精度的测距定位系统需求的缺点和不足, 提出了一种增强非对称双边双向测距优化算法, 通过数学分析从理论上证明了该算法的有效性, 同时对由于时频漂移和频率漂移引起的测距误差进行了研究分析。最后使用超宽带模块进行了基于改进算法的测距实验, 对实验数据进行分析发现通过数据拟合标定算法可以进一步改善测距精度, 实验结果表明系统整体测距精度提高了 88%。

[关键词] 超宽带; 增强非对称双边双向测距; 飞行时间

[中图分类号] TP393.09

[文献标志码] A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4926.2019.01.011

[文章编号] 1001-4926(2019)01-0066-08

Enhanced Asymmetric Double Side Two-way Ranging Algorithm for UWB Ranging System

WANG Chun-qi¹, FENG Da-quan¹, HE Chun-long¹, CHEN Chang-ting²

(1. Guangdong Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong 518060, China;
2. College of Big Data and Internet, Shenzhen Technical University, Shenzhen Guangdong 518118, China)

Abstract: This paper investigates the indoor ranging capability of ultra-wideband signals under the IEEE 802.15.4 protocol. The traditional schemes usually cannot meet the low-power, high real-time and high-precision requirements in the practical applications. To this end, an enhanced asymmetric double side two-way ranging algorithm is proposed. We first analyze the validity of the algorithm through mathematical models, and then discuss ranging errors due to time and frequency shifting. Finally, the UWB module is implemented in the ranging experiment to test the performance of the improved algorithm. The experimental results show that the ranging accuracy can be further improved by the data fitting calibration algorithm. It is also shown that the overall ranging accuracy of the system can be improved around 88%.

Key words: UWB; enhanced asymmetric double side two-way ranging; time of flight

[收稿日期] 2019-01-02

[修回日期] 2019-02-20

[基金项目] 国家自然科学基金(61701317); 广东省自然科学基金(20142BAB207021); 深圳市基础研究项目(JCYJ20170302150006125); 深圳大学科研启动项目(2017076); 腾讯“犀牛鸟”深圳大学青年教师科研基金项目; 孔雀计划科研启动项目; 深圳海外高层次人才创新基金(KQJSCX20180328093835762)

[通讯作者] 冯大权(1986—), 男, 博士, 助理教授。主要研究方向: 智能无线通信系统。

引言

随着社会经济的快速发展和科学技术的巨大进步,在物联网时代准确有效地定位现实世界中的对象以及在虚拟世界中识别对象将变得越来越重要。当面临陌生的环境时,纵横复杂的道路网络和上下交叉的空间结构给人们的生活和工作带来了很大的困难,使得基于 LBS(Location Based Services, 位置服务)的需求越来越强。例如目的位置导航、路径优化选择、空间合理规划和兴趣点快速查找等相关服务^[1]。超声波(Ultrasonic)定位技术虽然结构简单,但是受到多径效应和非视距传播影响很大,同时需要投资大量的基础硬件设施导致成本太高^[2]。蓝牙(Bluetooth)定位技术设备体积较小、易于集成设计和应用推广,但是对于复杂的室内空间环境,容易受噪声信号干扰导致稳定性变差^[3]。RFID(Radio Frequency Identification, 射频识别)技术信标节点体积小、成本低、寿命长,但是通信距离近,同时很难兼容到其他系统之中^[4-5]。SLAM(Simultaneous Localization and Mapping, 同步定位和建图)技术在不明确自身具体位置的条件下,在完全未知的陌生环境中实时创建地图,可以利用创建好的地图进行自主定位和导航,但是图像数据量巨大,设备价格非常昂贵导致只适合理论研究不适合量产^[6-7]。相比传统的定位技术,UWB(Ultra wideband, 超宽带)定位技术具有发射功率小,抗多径效应能力强,测距定位精度高,保密性好,环境适应性强等优点而被广泛关注和研究^[8]。

低成本、低功耗、低维护费用和高精度的距离测量是解决高精度定位问题的关键技术^[9]。与传统测距技术相比,TWR(Two-Way Ranging, 双向测距)算法中设备 A 和设备 B 分别依赖自己独立运行的晶体振荡器产生的时钟,可以有效避免设备之间需要时钟同步的影响^[10]。同时它不需要任何额外的通信基础设施,可以作为独立装置在 2 个节点之间进行通信交换消息,并基于这些消息的发送和接收时间戳来计算 2 个节点之间的信号往返

TOF(Time of Flight, 飞行时间),从而根据飞行时间来计算 2 个节点之间的距离。但是由于时钟漂移和频率漂移,简单的 TWR 算法仍有许多误差源。因为纳秒级别的时间误差会导致分米级别的距离测量估计误差,所以信号飞行时间的精确测量成为距离精确测量的关键^[11]。测距算法中的一些参数如果选择不正确,会使测距误差加剧。假设设备 A 和设备 B 的振荡器相对于理想振荡器频率有一个固定的频率误差分别为 e_A 和 e_B , 每个设备上的频率误差或偏移将引起相对于理想频率的时钟漂移,但是频率漂移在任何设备上的频率误差不是固定的,而是随时间变化的。

为了有效控制和消除时钟漂移和频率漂移导致的测距误差,提出了一种增强非对称双边双向测距优化算法,通过在实验室使用基于 DW1000 微处理器开发的 UWB 模块进行基于改进算法的测距实验,最后对 30 组实验数据进行分析,发现通过数据拟合标定算法可以进一步改善测距精度,其中数据标定前测距标准误差为 0.695 5 m,标定后的测距标准误差仅为 0.083 3 m,测距整体精度提高了 88%。由频率误差导致的时钟漂移如图 1 所示。

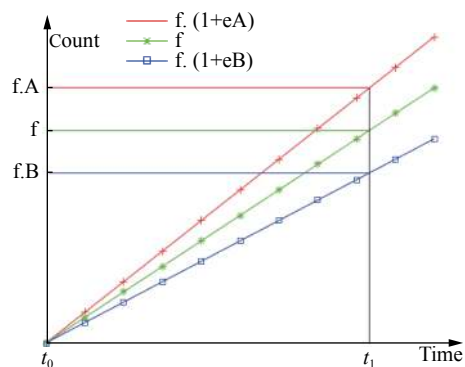


图 1 频率误差导致的时钟漂移

1 双向测距及其误差分析

1.1 单边双向测距及其误差分析

首先设备 A 向设备 B 发出一个轮询消息(Poll Message)数据包并记录下发送轮询消息数据包的时刻,接着设备 B 收到轮询消息数据包并记下收

到轮询消息数据包的时刻, 然后设备 B 等待先前设定好的延迟处理时间 T_{replyB} 后向设备 A 发送一个响应消息 (Response Message) 数据包并记录下发送响应消息数据包的时刻, 设备 A 收到响应消息数据包并记下收到响应消息数据包的时刻值, 这样便完成一次测距任务^[12]。SS-TWR (Single Sided Two-Way Ranging, 单边双向测距) 具体过程如图 2 所示。

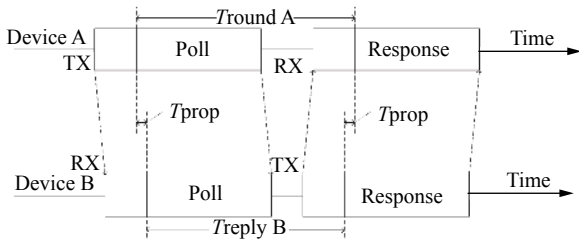


图 2 SS-TWR 测距模型

现在设备 A 和设备 B 传输过程信号往返时间如式 (1) 所示:

$$T_{roundA} = 2T_{prop} + T_{replyB} \quad (1)$$

则往返时间 TOF 真实值如式 (2) 所示:

$$T_{prop} = \frac{T_{roundA} - T_{replyB}}{2} \quad (2)$$

假设设备 A 和设备 B 的晶体振荡器由于时钟漂移相对于理想晶体振荡器有一个固定的频率误差分别为 e_A 和 e_B , 则 TOF 的测量估计值由式 (3) 给出:

$$\hat{T}_{prop} = \frac{T_{roundA} (1 + e_A) - T_{replyB} (1 + e_B)}{2} \quad (3)$$

则 TOF 测量估计值和真实值之间的差值即测距误差式 (4) 所示:

$$\hat{T}_{prop} - T_{prop} = T_{prop} \times e_A + \frac{T_{replyB} (e_A - e_B)}{2} \quad (4)$$

由于 TOF 的真实值 T_{prop} 远远小于设备 B 延迟处理时间 T_{replyB} , 所以式 (4) 等号后面第一项可以忽略不计。因此该算法测距精度的主要误差如式 (5) 所示:

$$Error = \frac{T_{replyB} (e_A - e_B)}{2} \quad (5)$$

假设设备 A 与设备 B 2 个时钟的频率偏差为 10^{-5} , 延迟处理时间为 0.000 1 s, 光速是 300 000 000 m/s²,

则系统误差达到 0.15 m。图 3 显示了 SS-TWR 模型测距误差。

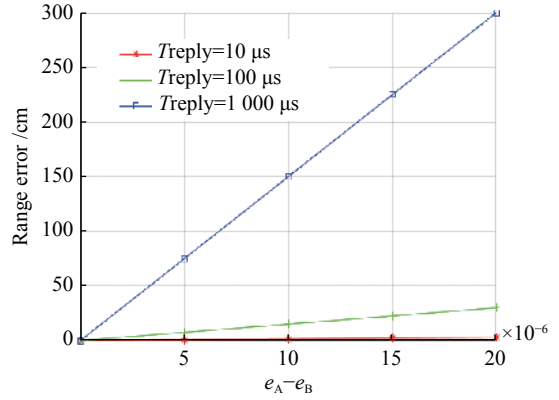


图 3 SS-TWR 模型测距误差

1.2 对称双边双向测距及其误差分析

SDS-TWR (Symmetric Double Sided Two-Way Ranging, 对称双边双向测距) 算法是在 SS-TWR 算法基础上再增加一次信息传输^[13]。设备 A 收到设备 B 发送的响应消息后, 设备 A 等待先前设定好的延迟处理时间 T_{replyA} 后向设备 B 发送一个最后消息 (Final Message) 数据包并记录下发送最后消息数据包时刻, 设备 B 接收到最后消息数据包并记录下接收到最后消息数据包时刻。SDS-TWR 测距算法具体过程如图 4 所示。

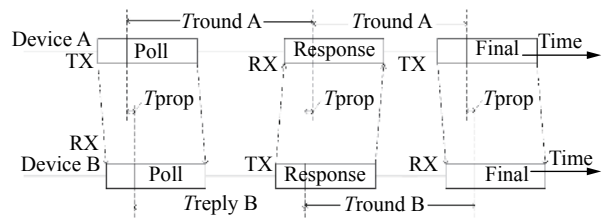


图 4 SDS-TWR 测距模型

现在设备 A 和设备 B 传输过程信号往返时间如式 (6) 所示:

$$\begin{aligned} T_{roundA} &= 2T_{prop} + T_{replyB} \\ T_{roundB} &= 2T_{prop} + T_{replyA} \end{aligned} \quad (6)$$

则往返时间 TOF 真实值如式 (7) 所示:

$$T_{prop} = \frac{(T_{roundA} - T_{replyA}) + (T_{roundB} - T_{replyB})}{4} \quad (7)$$

假设备 A 和设备 B 的晶体振荡器由于时钟漂移相对于理想晶体振荡器有一个固定的频率误差分别为 e_A 和 e_B , 则往返时间 TOF 的测量估计值由式 (8) 给出:

$$\hat{T}_{\text{prop}} = \frac{(T_{\text{roundA}} - T_{\text{replyA}})(1 + e_A) + (T_{\text{roundB}} - T_{\text{replyB}})(1 + e_B)}{4} \quad (8)$$

则 TOF 测量估计值和真实值之间的差值即测距误差如式 (9) 所示:

$$\hat{T}_{\text{prop}} - T_{\text{prop}} = \frac{T_{\text{prop}}(e_A + e_B)}{2} + \frac{(T_{\text{replyB}} - T_{\text{replyA}})(e_A - e_B)}{4} \quad (9)$$

由于 TOF 的真实值 T_{prop} 远远小于设备 A 和设备 B 延迟处理时间差 ΔT_{reply} , 如式 (10) 所示:

$$\Delta T_{\text{reply}} = T_{\text{replyB}} - T_{\text{replyA}} \quad (10)$$

所以式 (9) 等号后面第一项可忽略不计。因此该算法测距精度的主要误差如式 (11) 所示:

$$\text{Error} = \frac{\Delta T_{\text{reply}}(e_A - e_B)}{4} \quad (11)$$

假设备 A 与设备 B 2 个时钟的频率偏差为 10^{-5} , 处理时间差为 0.000 1 s, 则误差仅为 0.075 m, 相比 SS-TWR 算法误差降低了 50%。图 5 显示了 SDS-TWR 模型测距误差。

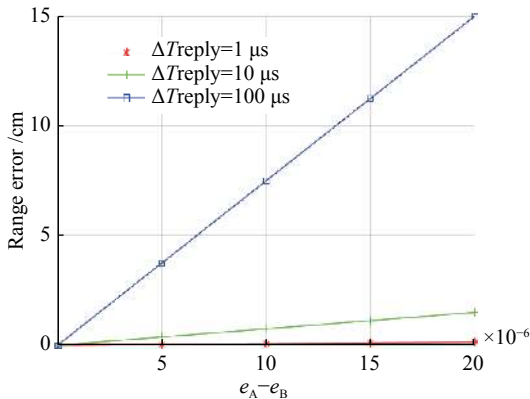


图 5 SDS-TWR 模型测距误差

1.3 非对称双边双向测距及其误差分析

在设备 A 收到设备 B 发送的响应消息后, 设备 B 等待极短的延迟处理时间或者不等待任何

延迟处理时间直接向设备 A 发送最后消息 (Final Message) 数据包, 设备 B 接收到最后消息数据包并记录下接收到最后消息数据包的时刻。ADS-TWR (Asymmetric Double Sided Two-Way Ranging, 非对称双边双向测距) 具体过程如图 6 所示。

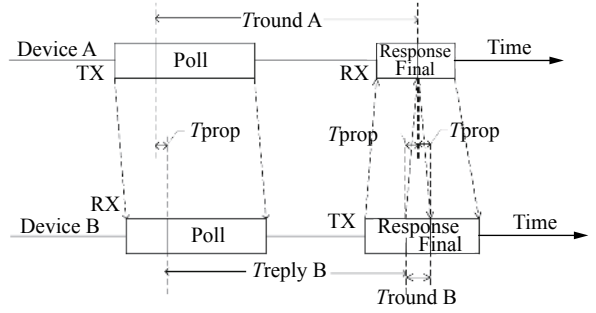


图 6 ADS-TWR 测距模型

现在设备 A 和设备 B 传输过程信号往返时间如式 (12) 所示:

$$\begin{aligned} T_{\text{roundA}} &= 2T_{\text{prop}} + T_{\text{replyB}} \\ T_{\text{roundB}} &= 2T_{\text{prop}} \end{aligned} \quad (12)$$

则往返时间 TOF 真实值如式 (13) 所示:

$$T_{\text{prop}} = \frac{T_{\text{roundA}} + T_{\text{roundB}} - T_{\text{replyB}}}{4} \quad (13)$$

假设备 A 和设备 B 的晶体振荡器由于时钟漂移相对于理想晶体振荡器有一个固定的频率误差分别为 e_A 和 e_B , 则往返时间 TOF 的测量估计值由式 (14) 给出:

$$\hat{T}_{\text{prop}} = \frac{T_{\text{roundA}}(1 + e_A) + (T_{\text{roundB}} - T_{\text{replyB}})(1 + e_B)}{4} \quad (14)$$

则 TOF 测量估计值和真实值之间的差值即测距误差如式 (15) 所示:

$$\hat{T}_{\text{prop}} - T_{\text{prop}} = \frac{T_{\text{prop}}(e_A - e_B)}{2} + \frac{T_{\text{replyB}}(e_A - e_B)}{4} \quad (15)$$

由于 TOF 的真实值 T_{prop} 远远小于设备 B 处理时间差 T_{replyB} , 所以式 (15) 中等号后面第一项可忽略不计, 因此该算法测距精度的主要误差如式 (16) 所示:

$$\text{Error} = \frac{T_{\text{replyB}}(e_A - e_B)}{4} \quad (16)$$

2 增强非对称双边双向测距

2.1 增强非对称双边双向测距及其误差分析

针对以上所述测距算法中的缺点和不足, 提出了一种 EADS-TWR(Enhance asymmetric Double Sided Two-Way Ranging, 增强非对称双边双向测距) 优化算法。在设备 A 收到设备 B 发送的响应消息后, 设备 B 等待较长的延迟处理时间向设备 A 发送最后消息(Final Message)数据包, 设备 B 接收到最后消息数据包并记录下接收到最后消息数据包的时刻。EADS-TWR 优化算法测距具体过程如图 7 所示。

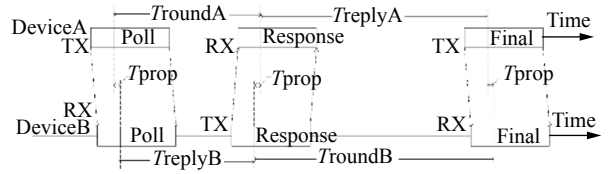


图 7 EADS-TWR 测距模型

现在设备 A 和设备 B 传输过程信号往返时间如式 (17) 所示:

$$T_{roundA} = 2T_{prop} + T_{replyB} \quad (17)$$

$$T_{roundB} = 2T_{prop} + T_{replyA}$$

根据式 (17) 通过数学计算得到如式 (18) 所示:

$$\begin{aligned} T_{roundA} \times T_{roundB} - T_{replyA} \times T_{replyB} &= 4T_{prop}^2 + 2T_{prop}(T_{replyA} + T_{replyB}) \\ T_{roundA} + T_{roundB} + T_{replyA} + T_{replyB} &= 4T_{prop} + 2T_{replyA} + 2T_{replyB} \end{aligned} \quad (18)$$

则往返时间 TOF 真实值如式 (19) 所示:

$$T_{prop} = \frac{T_{roundA} \times T_{roundB} - T_{replyA} \times T_{replyB}}{T_{roundA} + T_{roundB} + T_{replyA} + T_{replyB}} \quad (19)$$

漂移相对于理想晶体振荡器有一个固定的频率误差分别为 e_A 和 e_B , 则往返时间 TOF 的测量估计值由式 (20) 给出:

假设备 A 和设备 B 的晶体振荡器由于时钟

$$\hat{T}_{prop} = \frac{T_{roundA}(1+e_A)T_{roundB}(1+e_B) - T_{replyA}(1+e_A)T_{replyB}(1+e_B)}{T_{roundA}(1+e_A) + T_{roundB}(1+e_B) + T_{replyA}(1+e_A) + T_{replyB}(1+e_B)} \quad (20)$$

则 TOF 测量估计值和真实值之间的差值即测距误差如式 (21) 所示:

$$\hat{T}_{prop} - T_{prop} = \frac{[(e_A + e_B + 2e_Ae_B)T_{prop} + T_{replyA}(e_A + e_Ae_B) + T_{replyB}(e_B + e_Ae_B)]T_{prop}}{T_{replyA}(1+e_A) + T_{replyB}(1+e_B) + T_{prop}(2+e_A+e_B)} \quad (21)$$

由于 TOF 的真实值 T_{prop} 远远小于设备 A 和设备 B 处理时间 T_{replyA} 和 T_{replyB} , 所以式 (21) 化简可得式 (22):

$$\hat{T}_{prop} - T_{prop} = \frac{[T_{replyA}(e_A + e_Ae_B) + T_{replyB}(e_B + e_Ae_B)]T_{prop}}{T_{replyA}(1+e_A) + T_{replyB}(1+e_B)} \quad (22)$$

因此该算法测距精度的主要误差如式 (23) 所示:

$$\begin{aligned} Error &= T_{prop}(e_A + e_B) + T_{prop} \times \\ &o(e_A, e_B, T_{replyA}, T_{replyB}) \end{aligned} \quad (23)$$

2.2 增强非对称双边双向测距能耗及误差分析

为了最大化节约能耗, 设备在关闭晶体振荡器的情况下保持睡眠模式, 因此要进行测距任务时, 设备被重新打开, 测距任务完成, 设备再次被关闭。在这种情况下, 测距任务是在其中一个设备通

过石英晶体预热阶段转换时进行的。这意味着在测距任务期间, 其中一个设备 A 上存在频率漂移, 设备 B 的频率误差保持不变。我们假设装置 A 上频率漂移的累积误差可以近似为 2 个单独的频率误差。石英晶体预热期间装置 A 的频率漂移如图 8

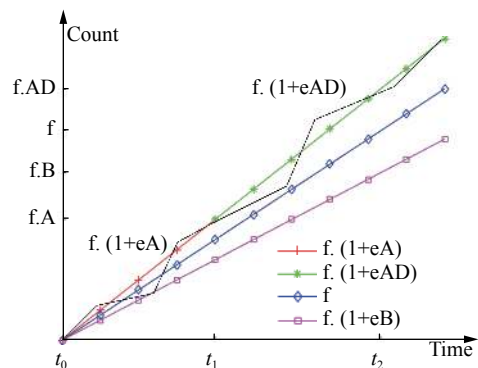


图 8 设备 A 石英晶体振荡器预热期间的频率漂移

所示。如果实现在晶体预热期间进行一个测距交换以降低功耗, 那么就需要最小化由于频率漂移而导致的额外精度误差。

现在设备 A 和设备 B 传输过程信号往返时间如式 (17) 所示, 则往返时间 TOF 真实值与 SDS-TWR 算法相同如式 (24) 所示:

$$\hat{T}_{\text{prop}} = \frac{T_{\text{roundA}}(1+e_A) - T_{\text{replyA}}(1+e_{AD}) + (T_{\text{roundB}} - T_{\text{replyB}})(1+e_B)}{4} \quad (25)$$

由于 TOF 的真实值 T_{prop} 和延迟处理时间差 ΔT_{reply} 远远小于 T_{replyA} , 因此该算法由于设备 A 频率漂移引起测距精度的主要误差如式 (26) 所示:

$$\text{Error} = \frac{T_{\text{replyA}}(e_A - e_{AD})}{4} \quad (26)$$

由于频率漂移引起的测距误差在每个晶体振荡器启动时, 测距误差会略有不同。本质上这可以被视为一个随机频率偏移, 因此它的影响需要最小化。由于设备 A 频率漂移导致的 SDS-TWR 算法测距精度误差如图 9 所示。

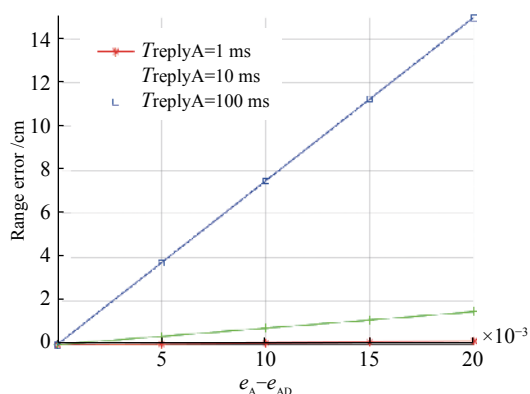


图 9 设备 A 频率漂移导致的 SDS-TWR 算法测距误差

2.3 增强非对称双边双向测距实施

TWR 算法使用了 5 条消息: 2 条消息位于发现阶段 (Blink 和 Ranging Init), 3 条消息位于测距阶段 (Poll、Response 和 Final)。测距实施的具体过程如图 10 所示。在发现阶段, 标签周期性地发送一条包含自己地址的闪烁消息 (Blink), 并监听来自基站的测距初始化响应 (Ranging Init) 消息, 如果标签没有收到这个响应消息, 它会休眠一段时间 (默认为 1 s) 然后再次闪烁, 基站将继续监听闪烁, 当

$$T_{\text{prop}} = \frac{(T_{\text{roundA}} - T_{\text{replyA}}) + (T_{\text{roundB}} - T_{\text{replyB}})}{4} \quad (24)$$

假设备 A 的晶体振荡器由于频率漂移相对于理想晶体振荡器有一个固定的频率误差分别为 e_A 和 e_{AD} , 因此往返时间 TOF 的测量估计值如式 (25) 所示:

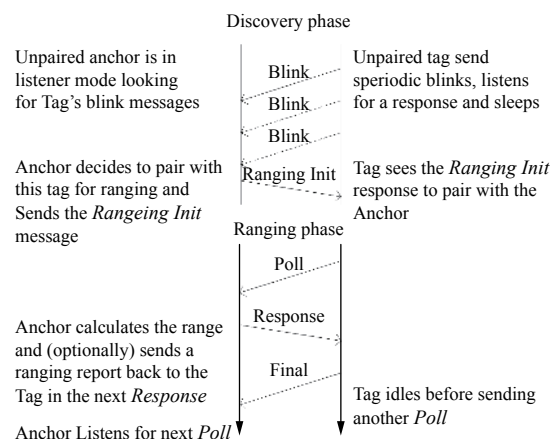


图 10 发现和测距阶段消息交换

它收到闪烁消息时, 基站将发送一个测距初始化消息到标签, 这样便完成发现阶段并进入测距阶段。在测距阶段, 标签定期与基站进行双向测距交换。每个双向测距交换过程包括标签发送轮询消息、接收响应消息然后发送最终消息。基站计算距离并将距离报告在下一个响应消息中发送给标签, 使得标签知道距离。

2.4 增强非对称双边双向测距数据标定

在使用 UWB 模块进行距离测量实验过程中, 由于搭建实验现场环境不同, 测量值在一定程度上受经纬度、空气质量、环境障碍物、海拔等因素干扰^[14], 测量结果表现为两种情况, 一种情况是测量值普遍比实际距离要大一些; 另外一种情况是测量值普遍比实际距离要小一些。所以在利用 UWB 模块进行测距的实验中, 我们提出对 UWB 模块进行测距数据校准标定来改善测距效果, 提高测距精度。针对同一组实验样本数据, 实验结果表明通过数据拟合修正, UWB 模块测量的距离值, 有非常

高的准确度。我们利用 EXCEL 软件进行对测量值和真实值数据拟合,并生成拟合公式,实验比较分析不同的拟合公式包含指数方程、线性方程、对数方程、多项式方程、幂方程、移动平均方程等对改善测距精度的影响,数据标定拟合效果如图 11 所示:

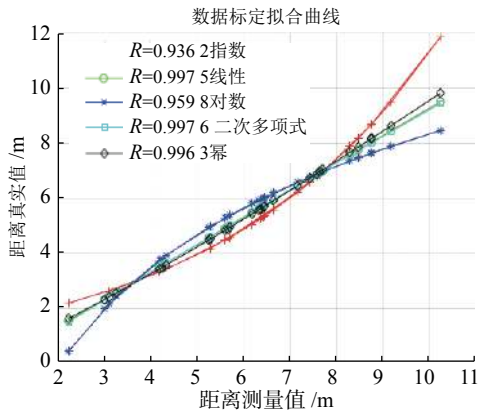


图 11 数据标定拟合效果

其中 R 表示 R 平方值,取值范围在 $0 \sim 1$ 之间的数值,它的数值大小反映趋势线的估计值与对应的实际数据之间的拟合程度,拟合程度越高,趋势线的可靠性就越高。当趋势线的 R 平方值等于 1 或接近 1 时,其可靠性最高,反之则可靠性较低。从图 1 的拟合结果可以看出,线性拟合和二项式拟合标定对改善测距误差有良好的效果。其中线性拟合的 R 平方值为 0.997 5,二项式拟合的 R 平方值为 0.997 6。所以我们采用最简单且计算量小的线性拟合方程对实验数据进行,针对同一组实验中的 30 个样本数据,数据标定前后的测量误差如图 2 所示,其中标定前的整体测距标准误差为 0.695 5 m,标定后的整体测距标准误差为 0.083 3 m,测距的整体标准误差降低了 88%。线性拟合数据标定前后测距误差如图 12 所示。

3 结束语

在简单的 SS-TWR 算法中,延迟处理时间 T_{replyB} 以及 e_A 和 e_B 之间的差值对测距误差均有影响。所以当延迟处理时间 T_{replyB} 较长时,很小的时

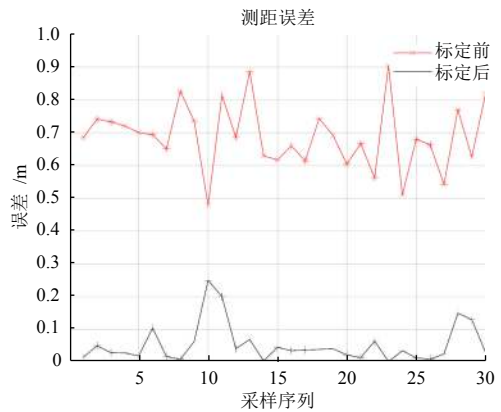


图 12 线性拟合数据标定前后测距误差

钟漂移也会对测量结果造成很大影响,而且这种影响是 SS-TWR 测距方式无法避免的。因此 SDS-TWR 算法通过在测距过程中引入另一条消息来最小化测距误差,以增加传输过程信号时间为代价来减小时钟漂移和频率漂移带来的误差。SDS-TWR 算法消除延迟处理时间 T_{replyB} 对测距误差的影响,而受到设备 A 和设备 B 延迟处理时间差值 ΔT_{reply} 以及频率误差 e_A 和 e_B 之间的差值的影响。当设备 A 和设备 B 的延迟处理时间非常接近或者相等时,SDS-TWR 算法能最大程度降低因时钟漂移带来的误差影响。相对于简单的 SS-TWR 算法,SDS-TWR 测距算法由于时钟漂移引起的误差减少了一半,测距精度的误差比 SS-TWR 算法小的多。ADS-TWR 测距算法相比 SS-TWR 测距算法在没有明显增加系统整个传输时间的前提下其误差减少了 50%,相比 SDS-TWR 测距算法系统整个传输时间明显减小,在实时性要求较高的测距和定位系统中,该算法有明显的优势。针对基于超宽带的传统无线定位测距技术在室内测距精度不高的问题,设计了一种基于超宽带 (UWB) 的增强非对称双边双向测距算法,通过数学分析从理论上证明了该算法的有效性,提高了室内定位系统的测距精度。存在频率漂移和时钟漂移的情况下,提出的 EADS-TWR 优化算法在不增加响应时间和延迟处理时间不完全相同的条件下对误差消除有良好的效果。研究结果表明减少测距误差的两种主要方法:一是使延迟处理时间 T_{replyA} 和 T_{replyB} 尽可能短,如果说延

迟处理时间是 0.01 s,那么任何额外的测距误差都不可能超过 0.02 m。二是尽可能减小延迟处理时间 T_{replyA} 和 T_{replyB} 之间的差值 ΔT_{reply} 。最后在实验室使用 UWB 模块进行了基于改进算法的测距实验,对 30 组实验数据进行分析,发现通过数据拟合标

定算法可以进一步改善测距精度,其中数据标定前测距标准误差为 0.695 5 m,标定后测距标准误差仅为 0.083 3 m,实验结果表明系统整体测距精度提高了 88%。

【参考文献】

- [1] Mautz R. Overview of current indoor positioning systems/Dabartines pozicionavimo sistemas patalpose [J]. Geodezija IrKartografija, 2009,35(1):18–22.
- [2] Ijaz F, Yang H K, Ahmad A W, et al. Indoor positioning: A review of indoor ultrasonic positioning systems [C]//IEEE 15th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2013:1146–1150.
- [3] Altini M, Brunelli D, Farella E, et al. Bluetooth indoor localization with multiple neural networks [C]//IEEE 5th International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC), 2010:295–300.
- [4] Yao C Y, Hsia W C. An indoor positioning system based on the dual-channel passive RFID technology [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11):4654–4663.
- [5] Yao C Y, Hsia W C. A dual-channel UHF passive CMOS RFID tag design [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2016, 61(4):1269–1279.
- [6] Xu Z, Chen S, Bai J, et al. A localization system for autonomous driving: global and local location matching based on mono-SLAM [R]. SAE Technical Paper, 2018.
- [7] Feng X U, Hao W, Fang B. Research on unmanned vehicle positioning technology based on multi-sensor fusion [J]. DEStech Transactions on Computer Science and Engineering, 2018(pcmm).
- [8] 陶偲. 基于 UWB 的室内 SDS-TWR 测距算法优化和定位算法融合的研究 [D]. 武汉:华中师范大学, 2016.
- [9] Wirola L, Laine T A, Jari S. Mass-market requirements for indoor positioning and indoor navigation [C]//IEEE International Conference on Indoor Positioning & Indoor Navigation, 2010.
- [10] 李周. 基于 IEEE802. 15. 4a 模型的 UWB 信道测量技术研究 [D]. 北京:北京邮电大学, 2011.
- [11] 卞佳兴, 朱荣, 陈玄. 基于改进双向测距-到达时间差定位算法的超宽带定位系统 [J]. 计算机应用, 2017, 37(9):2496–2500.
- [12] Yao L, Wu Y W A, Yao L, et al. An integrated IMU and UWB sensor based indoor positioning system [C]//IEEE International Conference on Indoor Positioning & Indoor Navigation, 2017.
- [13] Silva B, Pang Z, Åkerberg J, et al. Experimental study of UWB-based high precision localization for industrial applications [C]//IEEE International Conference on Ultra-wideband, 2014.
- [14] Guosheng W, Shuqi Q, Qiang L, et al. UWB and IMU system fusion for indoor navigation [C]//第 37 届中国控制会议论文集, 2018.