

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1804537

# 面向相对导航的 UWB 测距误差估计与补偿方法<sup>\*</sup>

李荣冰, 王念曾, 刘建业, 王智奇

(南京航空航天大学导航研究中心 南京 211106)

**摘 要:** 基于无人飞行器和智能机器人等载体构成的智能集群是当前的研究热点, 相邻或相近集群成员之间精确的相对距离是密集集群实现协同控制的关键信息。超宽带 (UWB) 无线传输技术能传输信息, 同时具有厘米级的理论测距精度, 在集群的协同导航与控制中具有广阔的应用前景。面向集群成员间相对导航的厘米级测距需求, 阐述了 UWB 的测距方案, 分析了实际环境中 UWB 天线的时钟偏移、节点之间有相对速度和非视距环境引起的测距误差的特性, 研究了 UWB 距离测量的状态检测和误差补偿、估计的方法, 采用 DW1000 超宽带模块构建了实验环境, 对所研究的方法进行实验验证。结果表明, 所研究的方法可显著提高 UWB 在实际应用中的测距精度, 与传统的测距算法相比, 在空旷环境 (LOS) 状态下误差降低了 70%, 在非视距环境 (NLOS) 状态下误差降低了 50%。

**关键词:** 相对导航; 超宽带; 测距; 卡尔曼滤波

中图分类号: TN96 TH70 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.35

## UWB ranging error estimation and compensation method for relative navigation

Li Rongbing, Wang Nianzeng, Liu Jianye, Wang Zhiqi

(Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Intelligent swarm based on unmanned aerial vehicles or robots has become a research hotspot. To achieve collaborative control of dense cluster, the key information is to achieve the precise relative distance among adjacent agent clusters. Ultra-wideband (UWB) wireless transmission technology can transmit information and realize centimeter-level theoretical ranging accuracy. It has broad application prospect in coordinated navigation and control of clusters. In this paper, the UWB ranging scheme for centimeter-level ranging requirement of relative navigation is first described. Then, the reason and characteristics of the ranging error caused by the clock offset of UWB antenna in the actual environment, the relative speed between the nodes and the non-line-of-sight environment is analyzed. The state detection, error compensation and estimation methods of UWB distance measurement are studied. Finally, based on the DW1000 ultra-wideband module, the experimental environment is constructed and the method studied in the paper is evaluated. Experimental results show that the error estimation and elimination method can significantly improve the accuracy of UWB in practical application. Compared with the traditional ranging algorithm, the ranging accuracy of the proposed method is improved under the relatively static scenario and a scene with relative speed between nodes. To be specific, the error is reduced by 70% in the line-of-sight environment state and by 50% in the non-line-of-sight environment state.

**Keywords:** relative navigation; ultra-wideband; ranging measurement; Kalman filtering

## 0 引 言

目前, 无人飞行器和智能机器人等载体无论在军事还是民用领域, 都得到了广泛运用<sup>[1]</sup>。除单个载体的任

务应用外, 以层次架构和主从关系为主要特征的编队是主要的使用方式。近年来, 受蜂群、蚁群等生物启发的群体智能技术的发展促进了无人飞行器、机器人编队的新组织结构的研究, 麻省理工学院林肯实验室提出了多架小型无人机组成的无中心节点、基于信息共享计算决策、

收稿日期: 2018-12-14 Received Date: 2018-12-14

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(61703207, 61703208)、江苏省自然科学基金(BK20170801, BK20170815)项目资助

规划个体任务,实现个体与集群目标协同的分布式控制编队机制。这种基于集群、分布式的控制与决策机制具有良好的冗余性和联动性。不管是传统的编队模式,还是集群分布式模式,成员之间的距离信息作为集群控制中相对导航信息的重要一环,其精度是实现实时精准集群控制的重要前提。

目前针对近距离的测距方法主要有动捕系统、激光、红外、超声波、视觉、超宽带(ultra-wideband, UWB)等。其中,动捕系统主要应用于室内环境;激光只能测量单一方向;红外和超声波都较容易受到外部环境的影响,而UWB具有宽频带(3.1 GHz ~ 10.6 GHz)和高速率(1 Gbit/s)的特点<sup>[2-3]</sup>,能克服较复杂多变的外部环境,且功耗低、成本低、穿透力强、保密性好<sup>[4]</sup>。此外,其兼具通信和测距的能力,基于一套硬件实现2项必要功能,有利于飞行器和机器人的系统集成。

国内外学者对UWB的测距技术和测距算法进行了较多的研究。文献[5]对常用测距技术的克拉美罗下限的分析,证明基于时间到达(time-of-arrival, TOA)的测量方式最为合适。但是由于收发节点间的时钟振荡器不同,时钟会产生偏移并导致测距双方的时钟不同步,双向测距法(two-way-ranging, TWR)则是为了解决这一问题,在TOA基础上演进的一种方法。目前,UWB的理论测距精度已达到厘米级别<sup>[6]</sup>。然而,在无人机编队飞行、智能机器人编队控制等具体应用中,其测距精度仍只有分米级别。文献[7]的实验结果显示在运动状态下,UWB测距仍会有约30 cm的误差。本文基于密集集群成员高精度测距的需求背景,针对相对导航的主要几个具体的测距场景,研究了双边双程测距(double-sided two-way-ranging, DS-TWR)算法中的UWB距离测量的误差模型、环境检测和误差补偿、估计的方法。最后,对相关算法和模型进行试验验证。

## 1 基于相对导航的UWB测距方案

自主协同集群需要成员之间进行两两间的测距,本文以最基本的2架无人机构成的最小系统为对象,研究了实现相对测距的相关技术。对于多架无人机之间的测距,每架无人机只需分时与周围成员之间进行同样的测距方案即可得到各成员之间的距离信息。

### 1.1 基于TWR算法的测距过程研究

经典双程测距法使用了信号往返的时间戳信息,在一定程度上降低了时钟不同步带来的误差,但是由于芯片内部处理信息时间所造成的通信时延仍会造成一定误差,因此,需要在双程的基础上再增加一组往返信息,一方面减少内部处理信息导致的误差,另一方面消除时钟不同步带来的误差<sup>[8]</sup>。时间戳消息传播过程如图1所示。

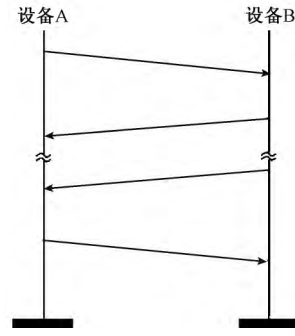


图1 带有4条消息的双程双向测距

Fig.1 Two-way ranging with four messages

由于信息传递次数越多,传递期间的不确定因素也就越多,且会产生传播时延<sup>[9]</sup>。本文将第1次返回的时间戳消息答复帧作为第2次往返测量的时间戳消息发起帧,将DS-TWR的4次信息传递简化为3次传递,增加测距稳定性。测距期间消息的传递过程如图2所示,测距节点A在 $T_1$ 时刻启动首次消息发送帧,之后测距节点B在 $T_2$ 时刻响应消息发送帧并经过 $T_{reply1}$ 后在 $T_3$ 启动第2次消息发送帧(第1次消息回复帧),测距节点A在 $T_4$ 时刻接收到消息并经过 $T_{reply2}$ 后在 $T_5$ 响应应该发送帧,测距节点A在 $T_6$ 时刻接收到消息完成接收,这就是整个双程双向测距过程。每个消息都附有测距节点精确的发送和接收时间。

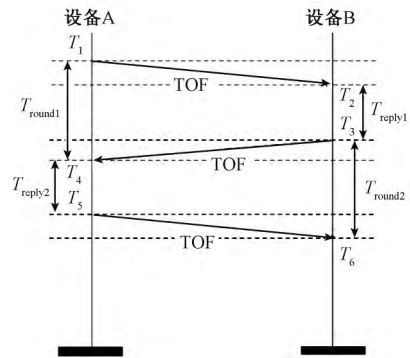


图2 带有3条消息的双程双向测距过程

Fig.2 Two-way ranging with three messages

图2中消息的传递时间为:

$$TOF =$$

$$\frac{(T_{reply1} + 2TOF)(T_{reply2} + 2TOF) - T_{reply1}T_{reply2}}{2T_{reply1} + 4TOF + 2T_{reply2}} = \frac{T_{round1} \times T_{round2} - T_{reply1} \times T_{reply2}}{T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2}} \quad (1)$$

式中:  $TOF$  为信号的传播时间;  $T_{round1}$  和  $T_{round2}$  分别为2次消息传递所经过的时间,各变量之间的关系如下:

$$\begin{cases} T_{\text{round1}} = T_{\text{reply1}} + 2TOF \\ T_{\text{round2}} = T_{\text{reply2}} + 2TOF \\ T_{\text{round1}} = T_4 - T_1 \\ T_{\text{round2}} = T_6 - T_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_{\text{reply1}} = T_3 - T_2 \\ T_{\text{reply2}} = T_5 - T_4 \end{cases} \quad (3)$$

## 1.2 基于双程双向测距算法的误差分析

设  $e_A$  和  $e_B$  分别为节点 A、B 的时钟漂移误差, 则信号的传递时间为:

$$\begin{aligned} TOF = & \frac{T_{\text{round1}}(1+e_A) \times T_{\text{round2}}(1+e_B) - T_{\text{reply1}}(1+e_A) \times T_{\text{reply2}}(1+e_B)}{T_{\text{round1}}(1+e_A) + T_{\text{round2}}(1+e_B) + T_{\text{reply1}}(1+e_A) + T_{\text{reply2}}(1+e_B)} \end{aligned} \quad (4)$$

测量值与真实值的误差为:

$$\begin{aligned} TOF - TOF = & \frac{(1+e_A)(1+e_B)TOF(2T_{\text{reply1}} + 4TOF + 2T_{\text{reply2}})}{2T_{\text{reply1}}(1+e_A) + 2T_{\text{reply2}}(1+e_B) + 4TOF + 2e_A TOF + 2e_B TOF} \end{aligned} \quad (5)$$

简化式 (5) 可得:

$$\begin{aligned} TOF - TOF = & \frac{TOF(T_{\text{reply1}}(e_{AB} + e_A) + T_{\text{reply2}}(e_{AB} + e_B))}{T_{\text{reply1}}(1+e_A) + T_{\text{reply2}}(1+e_B)} \end{aligned} \quad (6)$$

最终可以得到误差:

$$e = TOF(e_A - e_B) + TOF \cdot O(e_A, e_B, T_{\text{reply1}}, T_{\text{reply2}}) \quad (7)$$

由式 (7) 可得, DS-TWR 通过 2 次测量不仅消除了时钟不同步所产生的误差, 而且大大降低了通信时延造成的误差。通过使用此算法, 可以得到精度更高的测距信息。

## 2 UWB 的测距误差建模与修正

在实际环境中, 多种因素会对 UWB 测距精度产生较大的影响, 典型的场景如下。

1) 发送消息时, 通信帧从发送电路到发送天线存在发送天线延迟; 接收消息时, 通信帧从接收天线到接收电路存在接收延迟(发送/接收天线延时)。

2) 测距时节点间存在相对速度时引起的测距误差。

3) 非视距(non-line-of-sight, NLOS)环境中的信号衰减导致的测距误差<sup>[10-11]</sup>。

本文针对以上情况进行分析, 研究了相对应的误差估计、补偿方法, 从而提升 UWB 的测距精度。

### 2.1 天线延迟导致的测距误差的校准处理

发送天线延迟指在  $T_1$ 、 $T_3$ 、 $T_5$  数据帧的发送时刻发送电路到发送天线的延时 TX\_ANTD, 接收天线延迟指在

$T_2$ 、 $T_4$ 、 $T_6$  数据帧的接收天线到接收电路的延时 RX\_ANTD。所以在使用 UWB 前需先进行初始校准处理, 以消除处理电路与天线之间的延时误差。

本文采用线性拟合方法对天线延迟导致的测距误差进行修正。首先对 UWB 测距信息进行采样, 在 1~20 m 每隔 10 cm 进行 1 次测量, 对采集数据做线性拟合处理, 拟合结果如图 3 所示, 拟合函数为:

$$d_f = 0.9971d + 11.5996 \quad (8)$$

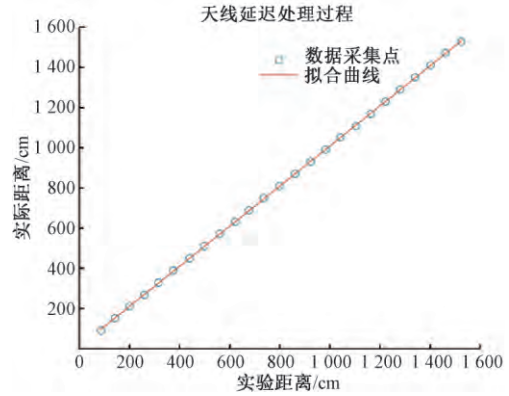


图3 天线延迟线性处理过程

Fig.3 Linear processing of antenna delay

初始校准前后测距误差对比结果如图 4 所示, 拟合前, 实际距离和测量距离存在一定程度的误差; 拟合后, 系统基本消除了天线延迟造成的线性误差。

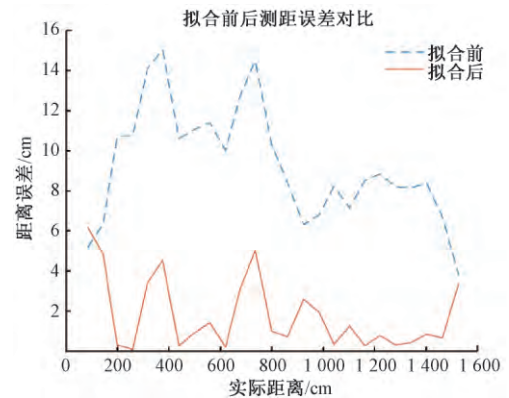


图4 拟合前后测距误差对比

Fig.4 Comparison of ranging error before and after fitting

### 2.2 节点间存在相对速度情况下的测距误差修正处理

基于 UWB 的距离测量中, 还存在因节点之间的相对运动引起的误差。本文研究了 2 节点存在相对速度时, 对测距结果产生的影响以及误差修正方法。

为简化分析, 假设测距节点 A 向静止的测距节点 B 移动, 速度为  $v$ , 测距过程如图 5 所示。

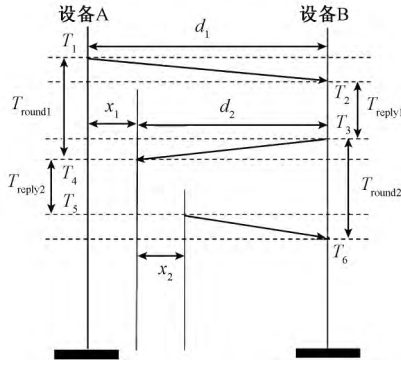


图5 动态补偿算法过程

Fig.5 Dynamic compensation algorithm process

设测距节点 A、B 初始时刻  $T_1$  相距  $d_1$ , 节点 A 向节点 B 发送 Poll 数据包, 在  $T_4$  时刻收到 Response 数据包, 这段时间内, 节点 A 以速度  $v$  向节点 B 移动了距离  $x_1$ , 此时节点 A、B 相距  $d_2$ 。  $T_5$  时刻, 节点 A 向节点 B 发送 Final 数据包, 节点 B 在  $T_6$  时刻收到消息时, 节点 A 向节点 B 移动了距离  $x_2$ , 此时, 实际距离为  $(d_2 - x_2)$ 。

假设 2 测距节点相对静止, 按照第 2 节的测距算法计算出 2 测距节点之间的距离为:

$$distance = \frac{\left(d_1 - \frac{x_1}{2}\right) + \left(d_2 - \frac{x_1}{2}\right)}{2} = \frac{d_1 + d_2}{2} - \frac{x_1 + x_2}{4} \quad (9)$$

则产生的误差为:

$$e = distance - (d_2 - x_2) = \frac{d_1 - d_2}{2} - \frac{x_1}{4} + \frac{3x_2}{4} \quad (10)$$

由图 5 可知,  $d_1 - d_2 = x_1$ ;  $x_1$  和  $x_2$  可以分别看作是  $T_{reply1}$  和  $T_{reply2}$  时间段内的位移, 且  $T_{reply1} = T_{reply2}$ , 则  $x_1 = x_2 = v \cdot T_{reply1}$ 。所以:

$$e = v \cdot T_{reply1} \quad (11)$$

因此, 当 2 测距节点有相对速度时所导致的测距误差与飞行速度和系统处理数据时间有关。在实际处理中, 从测距节点 B 的速度传感器中获取当前节点的速度  $v_B$ , 和时间信息一同传给测距节点 A。节点 A 将自己当前速度与节点 B 速度作差, 将  $(v_A - v_B) \cdot T_{reply1}$  补偿到测距结果中。

### 2.3 在 NLOS 环境下的测距误差修正处理

多径干扰是地面和低空环境中的重要干扰因素, 多径干扰导致 UWB 信号的非直线传输, 此时只能在 NLOS 状态下完成测距。NLOS 状态下, UWB 信号碰到反射面发生多次反射造成测距误差, 这是目前 UWB 测距应用中最主要的误差。针对此情况, 国内外也有相应的解决方案。目前解决此问题的方法大致分 2 类, 第 1 类是通过

收集和处理 NLOS 环境/视距 (line-of-sight, LOS) 环境下多节点的测量数据来获取某一时刻的运动节点的位置<sup>[12]</sup>; 第 2 类则是在测距之前减少 NLOS 误差, 然后基于优化过的位置矩阵进行距离估计。文献 [13-14] 将测量到的信号多路径的到达时间数据与散射模型的数据相匹配, 以获得各个节点之间的可视范围。但是这些方法大多复杂, 且需要多个基站进行辅助, 难以应用到节点间相对距离不断变化的智能集群的相对导航中。

本文基于卡尔曼滤波, 针对 NLOS 的误差特点, 对滤波过程进行优化, 设计 NLOS 状态识别器, 并基于识别结果进行误差修正。本文对测距数据进行误差建模、估计和修正的整个流程如图 6 所示, 在某个时刻  $i$  对前  $k$  个测量值进行标准差计算, 判断是否处于 NLOS 状态。若处于 LOS 状态, 系统将进行天线延时校准, 相对速度校准 (见 2.1、2.2 节) 和卡尔曼滤波平滑; 若处于 NLOS 状态, 系统将进行优化过后的卡尔曼滤波校准, 最终得到距离估计值。

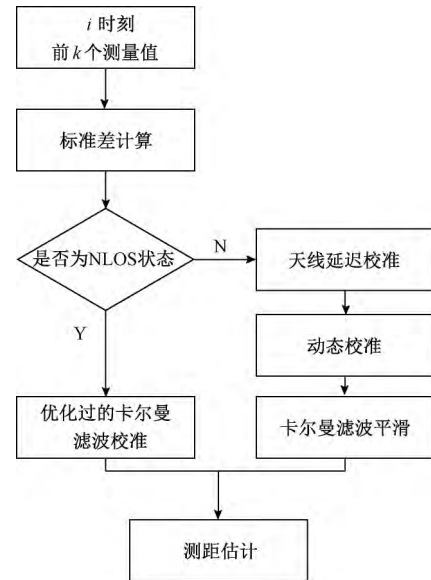


图6 测距数据的误差处理过程

Fig.6 Error processing of ranging data

#### 1) NLOS 检测方案与过程设计

设测距节点之间的测距模型如下:

$$d = d_t + d_e + d_n \quad (12)$$

式中:  $d$  为 UWB 测量的节点之间的距离;  $d_t$  为节点之间的实际距离;  $d_e$  为 UWB 测距期间产生的测距误差, 可将其看作符合高斯分布的白噪声, 标准差为  $\sigma_m$ ;  $d_n$  为由 NLOS 引起的距离误差, 非 NLOS 状态下此项为 0。

在研究 NLOS 问题时有 2 大难点: 1) 由于不知道 LOS 出现和消失的时间和频率, 所以需要不断检查节点所有时刻的 LOS/NLOS 状态; 2) 在 LOS 场景中, 卡尔曼滤波器能将测距结果收敛到精度较高的范围, 距离估计

可以给出非常准确的测距结果。然而,在 NLOS 的状态下,经过卡尔曼滤波处理后测距结果仍会有一个较大的偏置误差。本文设计了一种基于测距样本标准差的 NLOS 状态识别方案。

令  $\hat{\sigma}_m$  为  $k$  时刻量测距离  $d(k)$  在之前  $K$  个时刻的标准差  $x_{f_k}$  为  $k$  时刻经过卡尔曼滤波算法修正后的状态向量中的第 1 个值:

$$\hat{\sigma}_m(k) = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=k-K+1}^k (d(i) - x_{f_i})^2} \quad (13)$$

LOS 状态下的标准差是由测量噪声  $\sigma_m$  引起的,所以可以设定一个阈值,比较标准差和阈值大小,可识别 LOS/NLOS 状态,标准假设如下:

假设 1,  $\hat{\sigma}_m < \gamma\sigma_m$ , LOS 状态;

假设 2,  $\hat{\sigma}_m \geq \gamma\sigma_m$ , NLOS 状态。

传统的检测过程如图 7 所示,阴影条部分  $[0, C]$  表示此过程的数据样本用于状态检查。 $C$  时刻确定 LOS/NLOS 状态后,直到下一个更新状态的时刻  $N+C$  之前状态都不会改变。 $C$  和  $N$  的选取依赖于场景的变化。此外,在等待更新下一个状态期间很有可能丢失或错误地检测到 NLOS 和 LOS 之间的转换,从而导致测距中较大的估计误差。



图 7 周期性识别

Fig.7 Periodic identification

本文设计一种实时逐样处理和响应识别的滑动窗口识别方案,如图 8 所示。滑动窗口识别方案能够对场景变化进行快速响应,有助于 NLOS 的实时识别,克服周期性区间检查方案所导致的缺点。



图 8 滑动窗口识别

Fig.8 Sliding window recognition

## 2) 基于卡尔曼滤波的测距数据平滑算法

卡尔曼滤波算法采用递推迭代的方法,运用上一时刻的估值和当前的测量值进行计算,能较好地满足实时性的需求。

设该测距系统的模型为:

$$\begin{cases} X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + W_{k-1} \\ Z_k = H_k X_k + V_k \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $X_k = [d_k \ \dot{d}_k]$  为  $k$  时刻的状态向量  $d_k$  为  $k$  时刻的估

值  $\dot{d}_k$  为  $d_k$  的一阶导数;  $\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  为  $k-1$  到  $k$  时刻的系统一步转移矩阵;  $U_{k-1}$  为  $k-1$  时刻无人机之间的相对速度;  $W_{k-1}$  为白噪声序列;  $Z_k$  为  $k$  时刻的量测值;  $H_k = [1 \ 0]$  为  $k$  时刻的量测矩阵;  $V_{k-1}$  为白噪声序列。

卡尔曼滤波分状态预测和量测更新 2 个阶段<sup>[15]</sup>,在预测阶段的模型为:

$$\begin{cases} \hat{X}_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1|k-1} + B_{k-1} U_{k-1} \\ P_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1|k-1} \Phi_{k,k-1}^T + Q_{k-1} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\hat{X}_{k|k-1}$  是利用  $\hat{X}_{k-1}$  计算得到  $\hat{X}_k$  的一步预测;  $P_{k|k-1}$  为估值  $\hat{X}_{k|k-1}$  的均方误差阵。在量测更新阶段的模型为:

$$\begin{cases} K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} + R_k)^{-1} \\ \hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1}) \\ P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $K_k$  为滤波增益;  $\hat{X}_{k|k}$  为  $k$  时刻的最优估计值,其均方误差为  $P_{k|k}$ ;  $I$  为单位矩阵。

## 3) 针对 NLOS 状态的卡尔曼滤波优化

在 NLOS 状态下,为提高距离精度,采取增大测距的噪声协方差矩阵中对角元素的方法,减小卡尔曼滤波中的增益系数,减小量测对预测值的修正程度,可改善卡尔曼滤波效果,改进标准如下:

$$\hat{\sigma}_x = \begin{cases} \alpha\sigma_m, & \text{当 NLOS 状态被检测到且 } Z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1} > 0 \\ \sigma_m, & \text{其他} \end{cases}$$

其中,  $\alpha$  为放大系数,其值与对应的环境参数有关,需针对具体情况确定数值。本文取  $\alpha = 10$ 。

## 3 试验验证

### 3.1 硬件设计

试验采用 Decawave 公司的 DWM1000 作为测距模块。测距模块使用 IEEE802.15.4a,通信帧编码格式包括前导码、帧起始定符、物理帧头、传输数据。

### 3.2 测距性能试验

本文设计节点之间保持静态和具有相对速度 2 种状态进行试验,以验证上述方案能否提高测距精度。实验分别在开阔场景和 NLOS 场景进行,以区分 LOS 和 NLOS 2 种情况。当测量 NLOS 情况时,在 2 节点之间设立挡板模拟有遮挡物的 NLOS 场景。

#### 1) 静态情况的测距性能试验

测距节点间保持相对静止情况下,分别在空旷和 NLOS 情况进行试验。实验场景如图 9 所示, UWB 2 节点放置在高为 1 m 的三脚架上采集数据。



图9 静态环境测距实验场景

Fig.9 Experimental scenario of static environment ranging

在1~15 m,每隔1 m测量1次,将测量结果与实际值进行比较。测量结果如图10所示,在室外空旷线性拟合修正之后,误差均值由9 cm降为1.8 cm,测距精度得到明显提升。但是在室内有遮挡物的环境下,线性拟合效果不明显,如图11所示,说明线性拟合能够处理天线时延带来的误差,而NLOS带来的误差需进一步通过优化过的卡尔曼滤波来优化。

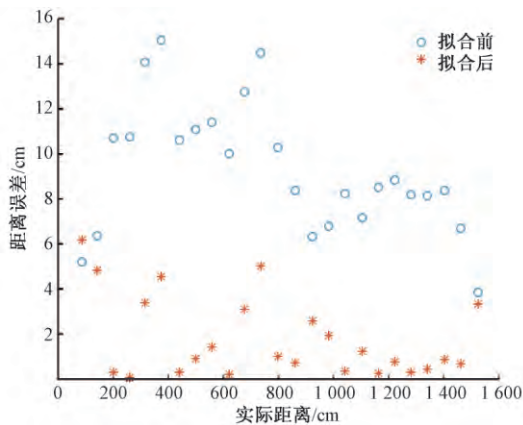


图10 静态 LOS 环境

Fig.10 LOS static environment

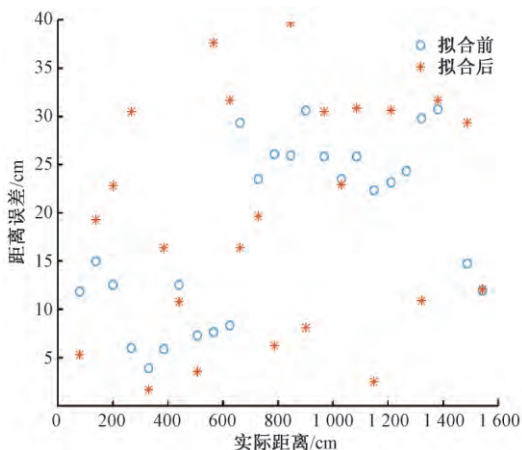


图11 静态 NLOS 环境

Fig.11 NLOS static environment

针对NLOS环境,取480 cm的测量数据来做具体分析。如图12所示,采用优化的卡尔曼滤波,测距误差从14.6 cm降为4.2 cm,误差的标准差从2.17 cm降为0.73 cm,测距效果得到了提升。

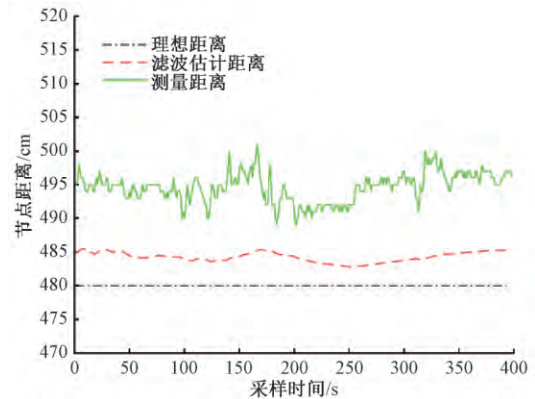


图12 NLOS 状态下480 cm处数据处理结果

Fig.12 Data processing result at 480 cm in NLOS state

## 2) 节点间存在相对速度情况的试验

在空旷和有遮挡物2种环境下设计实验,验证测距节点之间有相对速度时的情况。测距节点A固定在原地,测距节点B固定在智能小车上,以1.6 m/s的速度在相距1~20 m作匀速运动,如图13所示。



图13 动态状态实验场景

Fig.13 Dynamic state experiment scenario

将测距信息、滤波后实际距离进行对比,结果如图14所示。

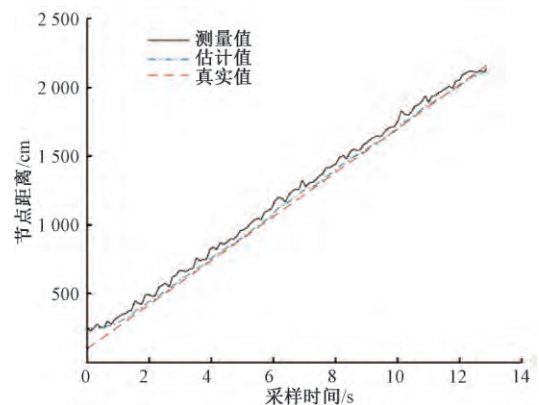


图14 LOS 动态环境

Fig.14 LOS dynamic environment



在 LOS 状态下,经过相对速度导致的误差进行修正和滤波平滑,测距精度得到了提高,误差均值由 23 cm 降为 4 cm,误差的标准差由 12 cm 降为 1.6 cm。如图 15 所示,在 NLOS 状态下,优化过后的卡尔曼滤波算法较好的消除了 NLOS 所带来的误差,增大测量噪声协方差阵后,测距曲线正向偏置减少,误差均值由 75 cm 降为 25 cm,误差的标准差由 40 cm 降为 12 cm。

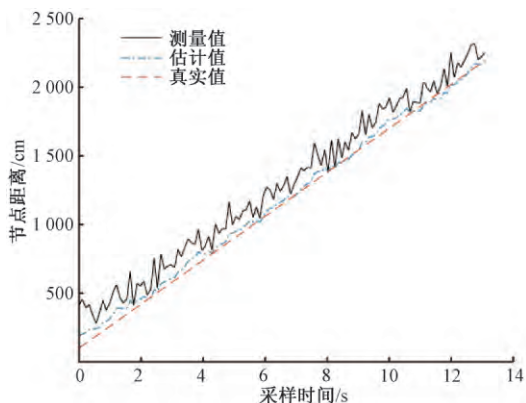


图 15 NLOS 动态环境

Fig.15 NLOS dynamic environment

### 3) NLOS/LOS 状态转换识别验证

该试验验证“滑动窗口识别”方案对实现 LOS 和 NLOS 之间转换的有效性。试验过程中,当小车行驶到 60 m 处,在 2 节点之间设置遮挡物。试验中设定标准差阈值为 40。如图 16 和 17 所示,此时测距数据中产生了较大的波动,误差也明显增大,标准差明显超过了设立的阈值,系统进入 NLOS 状态。结果表明,本文设计的 NLOS/LOS 识别方案能有效检验出 NLOS 环境。

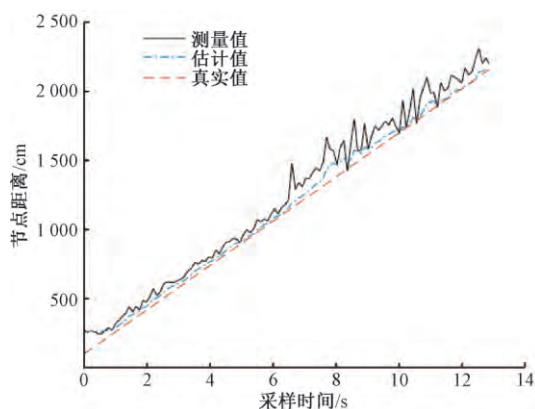


图 16 LOS/NLOS 混合动态环境

Fig.16 LOS/NLOS hybrid dynamic environment

根据以上 3 组试验结果,可得到如下结论。

1) LOS 状态下,通过线性拟合对节点进行校正能基本消除天线延迟所带来的线性误差;通过动态补偿和平

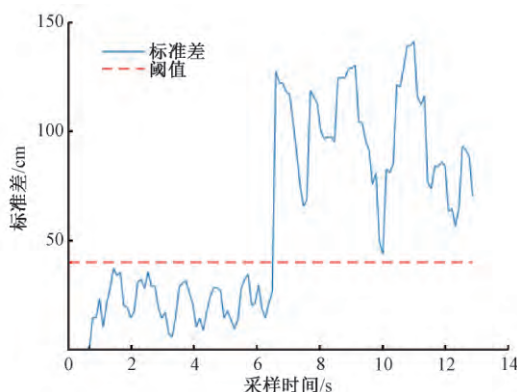


图 17 测距样本的标准差分布

Fig.17 Standard deviation of ranging

滑滤波能有效补偿 2 节点间具有相对速度时产生的测距误差。

2) NLOS 状态下,优化过后的卡尔曼滤波能较好地修正 NLOS 状态下的误差,在静态和动态情况下的误差分别下降 70% 和 50%;通过标准值的判断标准和滑动窗口识别方法能对 NLOS 状态进行快速判断,采用优化后的卡尔曼滤波模式,成功修正 NLOS 状态下误差。

## 4 结 论

针对 UWB 在相对导航实际应用中面对的测距环境,本文研究了 3 种对测距精度影响较大的因素,提出了线性拟合、节点间相对运动补偿、滑动窗口识别、动态调整噪声参数的卡尔曼滤波算法等相应的误差补偿算法。设计了不同状态下的实验,结果表明本文所研究的方法能够及时识别模块所处的状态,提高了实际应用中的测距性能,为基于 UWB 技术解决集群编队模式下的相对导航奠定了基础。

### 参考文献

- [1] LEISHMAN R C, MCLAIN T W, BEARD R W. Relative navigation approach for vision-based aerial GPS-denied navigation[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 74(1-2): 97-111.
- [2] 徐湛, 刘鹏成, 任世杰, 等. 超宽带接收机 IQ 不平衡估计与补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 157-163.  
XU ZH, LIU P CH, REN SH J, et al. IQ imbalance estimation and compensation method for ultra-wideband receiver[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 157-163.
- [3] KIM N S, RABAEY J M. A 3.1-10.6 GHz 57-bands CMOS frequency synthesizer for UWB-based cognitive radios[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and

- Techniques, 2018, 66(9): 4134-4146.
- [4] KOK M, HOL J D, SCHON T B. Indoor positioning using ultrawideband and inertial measurements [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(4): 1293-1303.
- [5] 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]. 上海: 华中师范大学, 2016.  
TAO C. Research on optimization of SDS-TWR and fusion of location algorithm in indoor position based on UWB[D]. Shanghai: Central China Normal University, 2016.
- [6] 张涛, 徐亚明. UWB测距与室内定位精度研究[J]. 全球定位系统, 2016, 41(5): 56-60.  
ZHANG T, XU Y M. Research on accuracy of UWB ranging and indoor positioning[J]. Gns World of China, 2016, 41(5): 56-60.
- [7] JING H, BONENBERG L K, PINCHIN J, et al. Detection of UWB ranging measurement quality for collaborative indoor positioning [J]. Journal of Location Based Services, 2015, 9(4): 296-319.
- [8] 王长强, 徐爱功, 隋心. UWB测距的NLOS误差削弱方法[J]. 导航定位学报, 2017, 5(3): 24-27, 32.  
WANG CH Q, XU AI G, SUI X. A method of NLOS error inhibition for UWB ranging [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2017, 5(3): 24-27, 32.
- [9] HAMIE J, DENIS B, D'ERRICO R, et al. Onbody TOA-based ranging error model for motion capture applications within wearable UWB networks [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2015, 6(5): 603-612.
- [10] 杨海, 李威, 张禾, 等. 复杂环境下基于SINS/UWB的容错组合定位技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2177-2185.  
YANG H, LI W, ZHANG H, et al. Fault tolerant integrated positioning system based on SINS/UWB in complex environment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2177-2185.
- [11] YU K G, WEN K, LI Y B, et al. A novel NLOS mitigation algorithm for UWB localization in Harsh indoor environment [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1): 686-699.
- [12] 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.  
HE J J, JIANG P, FENG X R. Research on navigation and positioning algorithm for unmanned vehicle based on UWB [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(11): 1743-1749.
- [13] LEE K, OH J, YOU K. Closed-form solution of TDOA-based geolocation and tracking: A recursive weighted least square approach [J]. Wireless Personal Communications, 2017, 94(4): 3451-3464.
- [14] LI B, CUI W, WANG B. A robust wireless sensor network localization algorithm in mixed LOS/NLOS scenario [J]. Sensors, 2015, 15(9): 23536-23553.
- [15] 王长强, 徐爱功, 隋心. 超宽带双向到达时间测距的室内动态定位方法[J]. 测绘科学, 2017, 42(12): 151-156.  
WANG CH Q, XU AI G, SUI X. An indoor dynamic positioning method of UWB TW-TOA [J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(12): 151-156.

#### 作者简介



李荣冰(通信作者), 分别在2001年和2007年于南京航空航天大学获得学士学位和博士学位, 现为南京航空航天大学副教授, 主要研究方向为惯性导航、卫星导航、大气数据系统与组合导航。

E-mail: lrbing@nuaa.edu.cn

**LI Rongbing** (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2001 and 2007, respectively. He is currently an associate professor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include inertial navigation, GNSS, Air data system and integrated navigation.