

农资仓储脉冲超宽带室内定位系统设计与试验及误差分析

孙小文, 张小超*, 赵博, 王丽丽, 伟利国, 贾全

(中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对仓储环境下农资物品与自动导引运输车 (automated guided vehicle, AGV) 的定位精度低的问题, 开发了适用于农资仓储环境下的脉冲超宽带技术 (impulse radio-ultra wide band, IR-UWB) 室内定位系统。采用双面双程测距 (symmetric double sided-two way ranging, SDS-TWR) 方法, 建立了考虑时钟频偏等因素的到达时间 (time of arrival, TOA) 定位系统模型。研究表明定位系统计算所带来的误差主要来源于距离测算方法和节点位置计算方法 2 方面, 在这 2 方面提出了相应的解决办法, 包括测距算法的选择, 基站的布置等。最后, 以 DW1000 射频芯片为硬件基础, 设计了定位系统移动站和基站节点, 并在农资仓库的环境中分别进行了静态测距试验、静态定位试验、以及动态定位试验。试验表明: 静态测距精度优于 50 mm, 静态定位精度优于 50 mm, 动态定位试验精度优于 85 mm。综合结果表明, 该文搭建的系统可满足农资物品定位的实际应用要求, 可为室内农资仓储环境下 AGV 的定位和导航提供参考。

关键词: 位置控制; 仓库; 误差分析; 脉冲超宽带; 无线定位; 到达时间定位算法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.004

中图分类号: S925; TP2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-Supp.1-0023-07

孙小文, 张小超, 赵博, 王丽丽, 伟利国, 贾全. 农资仓储脉冲超宽带室内定位系统设计与试验及误差分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 23-29. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.004 http://www.tcsae.org

Sun Xiaowen, Zhang Xiaochao, Zhao Bo, Wang Lili, Wei Ligu, Jia Quan. Design, experiment and error analysis of impulse radio-ultra wide band indoor positioning system used in agricultural warehousing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(Supp.1): 23-29. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.004 http://www.tcsae.org

0 引言

随着智能化装备的发展, 精确位置服务需求已成为精准农业、农资仓储、农资物流等领域亟待解决的问题。在空旷的室外环境, GPS (global positioning system), BDS (beidou navigation satellite system) 等全球导航卫星系统可实时监测得出具体位置信息。但室内的环境则要复杂很多^[1], 尤其是农资仓储的环境, 受物料、货架等的遮挡干扰较多, 常规的室外定位系统以及定位方法在定位精度上很难满足需求。目前, 随着无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN) 定位技术^[2-3]不断的发展, 各种通信系统不断涌现, 脉冲超宽带 (impulse radio-ultra wide band, IR-UWB) 技术则因其较强的穿透力, 较高的传输速率, 较小的功耗而引起广泛的重视^[4-11]。

IR-UWB 技术通过发送 ns 级或者 ns 级以下的超窄脉冲来传输数据, 可以获得 GHz 级的数据带宽, 具有很强的时间分辨率, 可获得 cm 级测距精度。IR-UWB 测距技术主要包括接收信号强度 (received signal strength information, RSSI) 测距技术, 到达角度 (angle of arrival,

AOA) 测距技术, 以及飞行时间 (time of flight, TOF) 测距技术。RSSI 测距技术成本较低, 能耗较少且易于实现, 但是在室内环境中, 它易受温度、多径传播、非视距、反射的影响, 所以该算法的测距精度误差较大, 不适合较大距离的测量^[12-13]。AOA 测距技术测量准确性受多径传输、天线阵列的精度, 以及非视距传播的影响, 因此精度较差^[14]。TOF 测距技术采用电磁波作为能量波, 其传播速度快, 传播距离远, 精度高, 因此成为目前室内定位研究的热点。其中基于此项技术而开发的到达时间^[15] (time of arrival, TOA) 算法和到达时间差^[16] (time difference of arrival, TDOA) 算法又是最常用的定位算法。

IR-UWB 技术因其设计简单、成本低、网络节点布置方便, 对场地环境无苛刻要求, 因此适合于农资仓库等室内环境中使用。目前在国内外利用 IR-UWB 技术进行室内定位已经取得一些成果。Salman^[17] 等利用 IR-UWB 技术设计了一种名为 CoLoRbot 的移动机器人, 用于室内未知环境的定位。该系统利用电磁波成像技术和 IR-UWB 定位技术融合的方式, 可以很好地完成二维室内环境下的孤立对象的定位。四川航天系统工程研究所利用 IR-UWB 技术和北斗导航相结合开发了室内外无缝定位系统^[18], 可应用于物流及办公环境。中国矿业大学利用 IR-UWB 技术开发了便携式定位设备进行矿井环境下的人员定位的系统等^[19]。虽然 IR-UWB 技术已经应用于某些领域, 但如何提高室内定位系统的抗干扰性和定位精度, 增强其实用性等仍旧是当前无线定位技术的热点和难点^[20-24]。

收稿日期: 2016-11-14 修订日期: 2016-12-19

基金项目: “十二五” 国家科技支撑计划 (2015BAD18B03)

作者简介: 孙小文, 男, 河南周口人, 主要从事室内定位及导航研究。北京中国农业机械化科学研究院, 100083。Email: xiaowen0715@126.com

*通信作者: 张小超, 男, 江苏南京人, 研究员, 博士生导师, 主要从事精准农业智能装备研究。北京 中国农业机械化科学研究院, 100083。Email: zxchao2584@163.com

本文通过对目前国内外无线传感器网络定位技术及其各测距算法的优缺点进行对比研究,分析了时钟频偏等因素对飞行时间测量的影响,推导了数学表达式,详细阐述了在测距和定位过程中的误差来源,建立了基于双面双程测距 (symmetric double sided-two way ranging, SDS-TWR) 方案进行测距, TOA 算法进行定位的室内定位系统。并利用相应的硬件设备,在农资仓库的实际场地中进行试验分析验证。

1 TOF 测距方法及误差分析

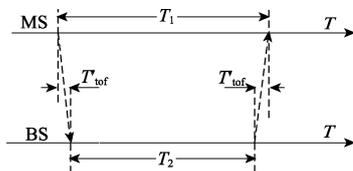
1.1 TOF 测距方法

TOF 测距方法是 Mccrady 等于 2000 年提出的^[25],起初只是应用于直接序列扩频的通信系统。后来 Andre 等在 IEEE 802.11b 的无线局域网中使用其作为一种测距技术^[26],才逐渐的应用于室内定位中。

TOF 测距技术分为 3 种方法,分别是单程测距 (one way ranging, OWR), 双程测距 (two way ranging, TWR), 和 SDS-TWR。其中 OWR 必须要保证基站与移动站之间时钟同步,因此对硬件的要求较高,相应的成本也偏高,其主要应用于 TDOA 定位算法不适用与 TOA 定位算法,所以在此不做详细讨论。

1.1.1 TWR 测距原理

TWR 测距是通过数据的往返传输来消除 2 个节点之间因时钟不同步而造成的测距误差,执行流程如图 1 所示。



注: MS 为移动站; BS 为基站; T 为测量时间, s ; T_1 为移动站从发送请求信号到接收到反馈信号的时间差, s ; T_2 为基站从接收到请求信号到发送反馈信号的时间差, s ; T_{tof} 为信号从基站到移动站之间的飞行时间, s 。下同。
Note: MS is mobile station; BS is base station; T is the measured time, s ; T_1 is the time difference from mobile station sending request signals to receiving feedback signals, s ; T_2 is the time difference from base station receiving request signals to sending feedback signals, s ; T_{tof} is time of flight from the BS to MS, s . The same below.

图 1 TWR 测距流程

Fig.1 Process of two way ranging

首先移动站节点 MS (mobile station) 发送一个请求信号,并在发送第一个符号时启动本地时钟计数器 t_m , 基站节点 BS (base station) 收到请求信号之后再反馈回去一个响应信号,同时在收到请求的第一个符号时启动自身时钟计数器 t_b 开始计数,并在发送反馈信号的第一个符号时终止计数。移动站节点在收到反馈信号的第一个符号时终止计数器,并计算出从发送信号到接收到反馈信号的时间差,记为 T_1 (s), 基站节点计算出从其接收到信号到发送反馈信号的时间差 T_2 (s), 两者的差值即为信号在两者之间往返的时间,除以 2 就可以得出单程的时间。将得到的时间乘以信号速度便得到 2 个节点之间的距离。

$$T'_{tof} = (T_1 - T_2) / 2 \quad (1)$$

式中 T'_{tof} 表示信号从基站到移动站之间的飞行时间, s ; T_1 表示移动站从发送请求信号到接收反馈信号的时间差, s ; T_2 表示基站从接收请求信号到发送反馈信号的时间差, s 。

两者之间的距离 D 为

$$D = c \cdot T'_{tof} \quad (2)$$

式中 c 为光速,取 3×10^8 m/s。

1.1.2 TWR 测距误差分析

在系统中每一个节点的时钟都有一个标称频率的晶振和一个微处理器,由于内在独立性以及受外部环境的影响,晶振的工作频率和标称频率会存在一定的偏差,称之为时钟频偏。不同的节点之间具有独立性,所以时钟运行的步调并不一致,会有快慢不同的现象。设移动站和基站节点因时钟频偏所造成的误差分别是 e_{MS} ($\%$), e_{BS} ($\%$), 则考虑到时钟频偏之后实际测量到的值是

$$T_{tof} = \frac{T_1(1 + e_{MS}) - T_2(1 + e_{BS})}{2} \quad (3)$$

式中 e_{BS} 为基站节点因时钟频偏所造成的误差, $\%$; e_{MS} 为移动站节点因时钟频偏所造成的误差, $\%$ 。

将 (1) 式与 (3) 式进行相减,便得出理论值和测量值之间的偏差,即时钟频偏所引起的测量误差

$$\begin{aligned} \text{Error} &= T'_{tof} - T_{tof} = \\ &= \frac{T_1 - T_2}{2} - \frac{T_1(1 + e_{MS}) - T_2(1 + e_{BS})}{2} \approx \\ &= \frac{1}{2} T_2 (e_{BS} - e_{MS}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 T_{tof} 为信号从基站到移动站之间的飞行时间, s ;

通过公式 (4) 可以看出测量误差与 2 个量有直接的关系,其一是 T_2 , 其二是 $(e_{BS} - e_{MS})$, 所以要想减小误差就需要从减少基站节点的应答时间和时钟频偏的影响出发。而本文将采用的 SDS-TWR 算法将从以上 2 方面开始讨论分析,以此来提高定位精度。

1.2 SDS-TWR 测距原理

SDS-TWR 是在 TWR 的基础上又进行了一次反向的 TWR, 执行流程如图 2 所示。与 TWR 相类似,首先移动站 MS 向基站节点 BS 发送请求信号,并与此同时启动本地时钟计数器 t_m , 基站节点接收到请求信号的同时启动其时钟计数器 t_b , 并接着反馈回一个应答信号,与此同时停止时钟计数器,读取处理时间,移动站接到应答信号之后接着反馈回一个终止信号,基站收到终止信号之后进行相应的计算,得出相应的测距时间,并在下一次答复移动站请求信号的时候反馈给它,从而由移动站计算出两者之间的距离。

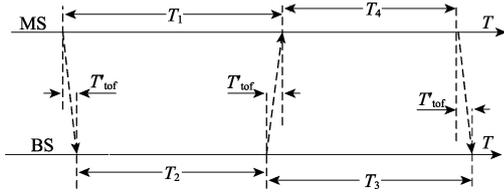
根据以上分析能够得出

$$T'_{tof} = (T_1 - T_2 + T_3 - T_4) / 2 \quad (5)$$

式中 T_3 为表示基站从发送反馈信号到接收终止信号的时间差, s ; T_4 为表示在移动站从接收到反馈信号到发送终止信号的时间差, s 。

两者之间的距离 D 为

$$D = c \cdot T'_{tof} \quad (6)$$



注: T_3 为基站从发送反馈信号到接收到终了信号的时间差, s ; T_4 为移动站从接收到反馈信号到发送终了信号的时间差, s 。

Note: T_3 is the time difference from basic station sending feedback signals to receiving final signals, s ; T_4 is the time difference from mobile station receiving feedback signals to sending final signals, s .

图 2 SDS-TWR 测距流程

Fig.2 Process of SDS-TWR ranging

1.3 SDS-TWR 误差分析

根据 1.1.2 节分析可知, 实际上由于时钟频偏所造成的误差测量到的实际值为

$$T_{\text{tof}} = \frac{1}{4}[T_1(1+e_{\text{MS}}) - T_2(1+e_{\text{BS}}) + T_3(1+e_{\text{BS}}) - T_4(1+e_{\text{MS}})] \quad (7)$$

将式 (5) 与式 (7) 相减, 便可得出此方法由于时钟频偏所引起的测量时间误差

$$\begin{aligned} \text{Error} &= T'_{\text{tof}} - T_{\text{tof}} = \\ &= \frac{1}{4}(T_1 - T_2 + T_3 - T_4) - \frac{1}{4}[T_1(1+e_{\text{MS}}) - T_2(1+e_{\text{BS}}) + T_3(1+e_{\text{BS}}) - T_4(1+e_{\text{MS}})] = \\ &= \frac{1}{4}[(T_4 - T_1)e_{\text{MS}} + (T_2 - T_3)e_{\text{BS}}] \approx \\ &= \frac{1}{4}\Delta T(e_{\text{BS}} - e_{\text{MS}}) \quad (8) \end{aligned}$$

式中 ΔT 为 T_4 与 T_1 之间的差值。在此假设移动站信号接收时间与信号发送时间之差和基站信号接收时间与信号发送时间之差近似相等, 即 $T_4 - T_1$ 约等于 $T_2 - T_3$ 。

由于 T_2 远大于 ΔT , 所以对比式 (4) 和式 (8), 可以得到 SDS-TWR 由于时钟频偏所引起的测量误差要小于 TWR 由于时钟频偏所引起的测量误差。所以 SDS-TWR 采用两次测量不仅能够消除时钟不同步造成的测距影响, 并能消除两个节点时钟频偏误差造成的测距影响, 进一步提高了测距精度^[27]。

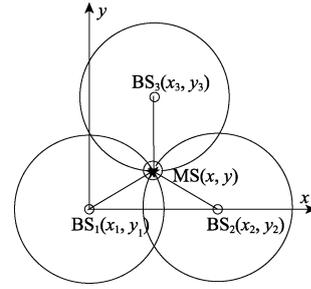
2 TOA 定位算法

2.1 TOA 定位算法原理

TOA 定位算法至少需要 3 个基站, 从几何意义上看实质上是一种圆周定位算法, 其原理是以基站为圆心, 以测得的移动站与基站之间的距离为半径来画圆, 如图 3 所示, 所对应的圆的交点即为移动站的位置点。

在此设定有 3 个基站, 一个移动站。假设移动站 MS 的位置为 (x, y) , 基站的位置分别为 $\text{BS}_1(x_1, y_1)$, $\text{BS}_2(x_2, y_2)$, $\text{BS}_3(x_3, y_3)$, mm; 利用 SDS-TWR 方法测量到的移动站与基站之间的距离分别是 $c \cdot t_1$, $c \cdot t_2$, $c \cdot t_3$, mm; 其中 t_i ($i=1,2,3$) 为对应信号到达时间, 可以得到

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = (ct_1)^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = (ct_2)^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 = (ct_3)^2 \end{cases} \quad (9)$$



注: BS_1 , BS_2 , BS_3 为基站。

Note: BS_1 , BS_2 and BS_3 are base stations.

图 3 TOA 定位算法原理

Fig.3 Principle of time of arrival location algorithm

对式 (9) 进行整理得

$$\begin{cases} 2x(x_1 - x_2) + 2y(y_1 - y_2) = r_1 \\ 2x(x_1 - x_3) + 2y(y_1 - y_3) = r_2 \\ 2x(x_2 - x_3) + 2y(y_2 - y_3) = r_3 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{其中} \begin{cases} r_1 = x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2 + (ct_3)^2 - (ct_2)^2 \\ r_2 = x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 + (ct_3)^2 - (ct_1)^2 \\ r_3 = x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 + (ct_2)^2 - (ct_1)^2 \end{cases}$$

式 (10) 有 3 个方程, 2 个未知数, 属于超静定方程组, 需要利用非线性最小二乘法 (non-linear least squares, NL-LS) 求解。根据 3 个基站的参数及几何位置建立误差函数, 然后利用泰勒级数展开的方法进行近似计算使误差函数最小, 从而来确定移动站的坐标位置。

2.2 TOA 定位算法误差分析

取式 (10) 前两式可近似求得移动站的位置

$$\begin{aligned} x &= \frac{(y_2 - y_1)r_1 + (y_2 - y_3)r_2}{2[(x_2 - x_3)(y_2 - y_1) + (x_1 - x_2)(y_2 - y_3)]} \\ y &= \frac{(x_2 - x_1)r_1 + (x_2 - x_3)r_2}{2[(x_2 - x_1)(y_2 - y_3) + (x_2 - x_3)(y_1 - y_2)]} \end{aligned} \quad (11)$$

由以上表达式可以看出, 因为 r_i ($i=1,2,3$) 只与信号到达时间 t_i ($i=1,2,3$) 有关, 所以移动站的位置是关于测量信号到达时间的函数。

x , y 分别对 t_1 , t_2 , t_3 进行微分, 可得

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{\partial x}{\partial t_1} t_1 + \frac{\partial x}{\partial t_2} t_2 + \frac{\partial x}{\partial t_3} t_3 = \\ &= \frac{c^2}{2B} [(y_2 - y_3)t_1 dt_1 + (y_1 - y_3)t_2 dt_2 + (y_1 - y_2)t_3 dt_3] \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta y &= \frac{\partial y}{\partial t_1} t_1 + \frac{\partial y}{\partial t_2} t_2 + \frac{\partial y}{\partial t_3} t_3 = \\ &= \frac{c^2}{2B} [(x_2 - x_3)t_1 dt_1 + (x_1 - x_3)t_2 dt_2 + (x_1 - x_2)t_3 dt_3] \quad (13) \end{aligned}$$

式中 $B = (x_2 - x_3)(y_2 - y_1) + (x_1 - x_2)(y_2 - y_3)$ 。

进而可以推导求得 x , y 的误差 δx , δy , 具体推导步骤可参考文献[28]。

$$\begin{aligned} \delta_x^2 &= \left(\frac{\partial x}{\partial t_1}\right)^2 \delta t_1^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial t_2}\right)^2 \delta t_2^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial t_3}\right)^2 \delta t_3^2 = \\ &= \left(\frac{c^2}{B}\right)^2 [(y_3 - y_2)^2 t_1^2 \delta t_1^2 + (y_1 - y_3)^2 t_2^2 \delta t_2^2 + (y_1 - y_2)^2 t_3^2 \delta t_3^2] \quad (14) \end{aligned}$$

$$\delta_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial t_1}\right)^2 \delta t_1^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial t_2}\right)^2 \delta t_2^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial t_3}\right)^2 \delta t_3^2 = \left(\frac{c^2}{B}\right)^2 [(x_3 - x_2)^2 t_1^2 \delta t_1^2 + (x_1 - x_3)^2 t_2^2 \delta t_2^2 + (x_1 - x_2)^2 t_3^2 \delta t_3^2] \quad (15)$$

从以上 2 式可以看出, 定位误差取决于 2 个因素: 其一是基站的几何分布, 其二是各测量值的大小。测量值的大小由基站和移动站之间的距离决定, 要想减少 TOA 定位算法的误差需要从基站的几何分布着手。

根据仿真模拟^[29]当基站数量较多时, 其几何分布按照蜂窝型布置时定位误差最小, 如图 4 所示。

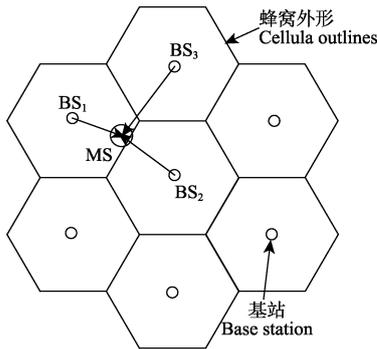


图 4 蜂窝型基站分布图
Fig.4 Honey comb figure of base station

3 测距定位试验

3.1 系统硬件设计与试验准备

本试验采用了 decaWave 公司生产的 DW1000 射频芯片作为系统硬件的基础单元。该芯片符合 IEEE802.15.4-2011 超宽带标准, 发送数据帧包括前导码、数据帧分隔符、数据帧头、数据区部分, 可以完成在数据传输过程中的时钟计数。其内部集成 63.897 6 GHz 采样时钟, 具有较高的时间分辨率, 为实现 SDS-TWR 测距方式提供了前提。DW1000 数据传输速率最高可达 6.8 Mbps, 支持 6 个信道, 频率范围 3.5~6.5 GHz, 发射功率可调, 范围为 -8~-15 dbm, 采用 2 种调制方式单脉冲位置调制 (pulse position modulation, PPM) 和二进制项移键控 (binary phase shift keying, BPSK)。

在此硬件的基础上本文开发了 IR-UWB 测距定位系统, 搭建了试验平台。基站通过和移动站之间的信号传输, 根据 SDS-TWR 算法测算出距离移动站的距离, 并在信号传输的过程中将距离信息传输给移动站, PC 机读取移动站接收的距离数据之后利用 TOA 定位算法, 来确定移动站的位置信息。工作原理图如图 5 所示。

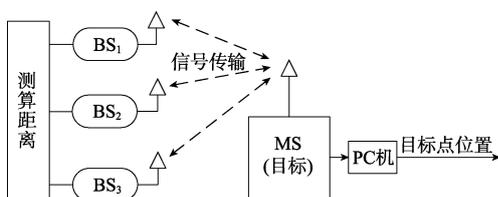


图 5 IR-UWB 定位系统工作原理图
Fig.5 Working principle of the IR-UWB locating system

在此基础上分别进行了静态测距试验, 静态定位试验以及动态定位试验^[30-31]。试验环境为某农资仓库的室内环境, 仓库大小约为 60 m×46 m, 共有 24 排货架。仓库布局以及静态与动态定位试验节点排布如图 6 所示。

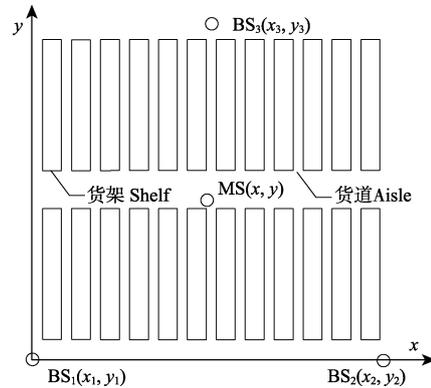


图 6 试验场地及定位试验节点排布简图
Fig.6 Schematic diagram of experimental site and node arrangement about positioning experiment

3.2 试验方案与结果分析

3.2.1 静态测距试验

试验首先设置 2 个节点, 一个作为基站, 另一个作为移动站, 分别进行 10, 15, 20, 30, 40, 50 m 的距离测定的试验。每段距离分别采集 5 min, 3 000 组左右的数据, 取平均值与实际值进行比对, 求出各个测量距离的定位精度以及均方根误差, 并将同样环境下利用 TWR 测距算法采集到的数据作为对照组, 见表 1 所示。

表 1 SDS-TWR 算法和 TWR 算法静态测距试验的测量值与实际值对比

实际距离 Actual distance value/mm	SDS-TWR 算法 SDS-TWR algorithm			TWR 算法 TWR algorithm		
	测量值 Measured distance value/mm	差值 Difference /mm	均方根误差 Root mean-square error/mm	测量值 Measured value /mm	差值 Difference /mm	均方根误差 Root mean-square error/mm
10 000	10 020.98	20.98	19.69	10 071.61	71.61	28.49
15 000	15 028.10	28.10	17.53	15 080.67	80.67	33.86
20 000	20 026.87	26.87	37.05	20 095.69	95.69	44.05
30 000	30 027.44	27.44	20.63	30 085.56	85.56	46.04
40 000	40 049.39	49.39	40.34	40 110.38	110.38	60.34
50 000	50 047.77	47.77	22.34	50 110.77	110.77	59.85

从表 1 可以看出采用 SDS-TWR 算法时实际距离与测量距离之间的偏差最大不超过 50 mm, 均方根误差最大不超过 41 mm。而采用 TWR 算法时实际距离与测量距离之间的偏差最大超过了 110 mm, 均方根误差最大超过了 60 mm。

图 7 给出了不同测量距离的误差累积分布函数, 指的是在不同测量距离下测量数据的误差小于或等于某个数值的概率。横轴表示误差, 是指测量距离与实际距离之间的偏差, 纵轴表示误差小于或等于横坐标值的概率。从图上可以看出采用 SDS-TWR 算法时不同测量距

离的 100mm 误差累积分布均大于 95.4%，而采用 TWR 算法时不同测量距离的 100mm 误差累积分布均不到 70%。

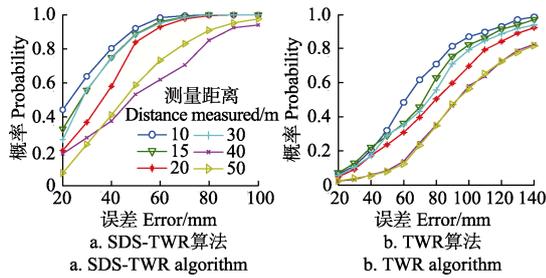


图 7 不同测量距离的误差累积分布函数

Fig.7 Cumulative distribution function error of different measurement distance

综上所述可以看出 SDS-TWR 算法具有较高的测距精度，

可用于精准定位。

3. 2. 2 静态定位试验

试验首先设定 3 个节点作为基站，一个节点作为移动站，依据 2.2 节分析，在 3 个基站的情况下将基站按照等边三角形排布定位误差最小，节点排布如图 6 所示。基站分别记做 BS₁, BS₂, BS₃，移动站记做 MS，进行固定坐标系下的定位试验，来测定移动站的静态位置(x, y), mm。试验同样设定了 TWR 算法下测算的数据为参照组，试验数据如表 2 所示。

从表 2 可以看出，采用 SDS-TWR 算法作为测距算法的试验中静态定位位置误差均在 50 mm 范围之内，均方根误差均不超过 65 mm。而采用 TWR 算法作为测距算法的试验中位置偏差大于 90 mm，均方根误差大于 115 mm。其中定位位置偏差为测出的目标节点的位置与其实际位置的欧氏距离偏差^[32]。

表 2 SDS-TWR 算法和 TWR 算法的静态定位试验数据

Table 2 Experimental data of static positioning of SDS-TWR and TWR

基站坐标 Base station coordinates/mm	移动站坐标 Mobile station coordinates/mm	SDS-TWR 算法 SDS-TWR algorithm			TWR 算法 TWR algorithm		
		测量坐标 Measured coordinates/mm	位置偏差 Positional deviation/mm	均方根误差 Root mean- square error/mm	测量坐标 Measured coordinates/mm	位置偏差 Positional deviation/mm	均方根误差 Root mean-square error/mm
BS ₁ (0, 0) BS ₂ (50 000, 0) BS ₃ (25 000, 43 300)	(5 800, 9 950)	(5 799.00, 9 940.90)	9.15	18.15	(5 839.54, 9 910.42)	55.95	49.37
	(22 250, 9 950)	(22 257.00, 9 959.00)	11.40	16.06	(22 295.00, 9 902.50)	65.43	56.41
	(22 250, 5 100)	(22 296.00, 5 110.40)	47.07	24.91	(22 295.02, 5 182.60)	94.07	95.85
	(14 026, 11 000)	(14 003.50, 11 089.90)	24.66	34.35	(14 058.00, 11 073.00)	79.70	85.72
	(14 026, 5 700)	(14 012.90, 5 675.60)	27.87	63.80	(14 001.90, 5 630.52)	73.54	115.82

由此可见，根据 SDS-TWR 算法作为测距方法，TOA 算法作为定位算法而搭建的定位系统具有较高定位精度，可以提供较准确的定位信息。

3. 2. 3 动态定位试验

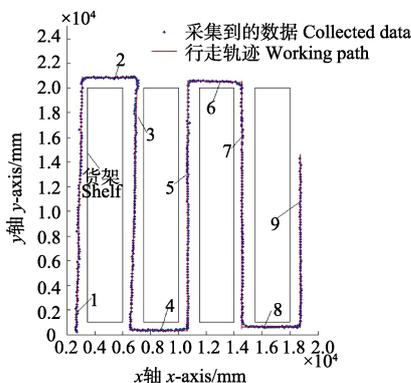
根据测距和静态定位精度的结果，试验采用了 SDS-TWR 算法作为测距方法，TOA 算法搭建的系统，并在图 6 所示的基站和移动站排布方式基础上，进行动态定位试验。在仓库中选择 5 条货道，9 段行走路径，使移动站沿着货道行走，采集相应的数据。将采集的数据和实际行走轨迹进行比较，结果如图 8 所示。

将采样点坐标与行走轨迹曲线之间的距离定义为测量偏差，对比分析每一条行走路径的定位偏差，结果如表 3 所示。

由表 3 可知，采集到的数据与实际行走轨迹偏差均在 85 mm 范围之内。证明了该系统具有较高的动态定位精度，能达到动态定位精度要求。

表 3 试验数据与行走轨迹之间误差对比
Table 3 Error comparison between experimental data and walking path

路径 Path	平均测量偏差 Average measurement deviation/mm	均方根误差 Root mean-square error/mm
1	68.23	30.65
2	65.06	28.81
3	82.66	41.11
4	69.02	51.26
5	77.69	83.50
6	58.25	58.80
7	78.30	71.39
8	57.23	21.11
9	64.14	39.28



注：i (i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9)是移动站路径。
Note: i (i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) are paths of moving station.

图 8 系统动态定位试验结果

Fig.8 System experimental result of dynamic positioning

4 结论

1) 本文采用了 SDS-TWR 测距方法和 TOA 定位算法。利用信号在移动站与基站之间 2 个方向的发送与接收，减少了时钟频偏所带来的测距误差，根据测距结果并利

用非线性最小二乘法求出误差函数的最小解,从而求出移动站坐标。该方法保证了定位的精准度。

2) 利用射频芯片 DW1000 作为脉冲超宽带技术的硬件基础搭建定位系统,并在农资仓储的环境下进行静态测距试验、静态定位试验以及动态定位试验。

3) 试验结果表明在农资仓库的环境下该系统能够获得较高的定位精度。静态测距精度优于 50 mm,静态定位精度优于 50 mm,动态定位精度优于 85 mm。可以为农资仓储 AGV 小车的自动驾驶提供定位基础。

[参 考 文 献]

- [1] 吴彬, 李俊娥. 无线传感器网络在室内定位中的应用研究[J]. 计算机科学, 2013, 40(5): 115—117.
Wu Bin, Li Jun'e. Application of wireless sensor network in indoor localization[J]. Computer Science, 2013, 40(5): 115—117. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陈瑜, 张铁民, 孙道宗, 等. 基于无线传感器网络的设施农业车辆定位系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 190—197.
Chen Yu, Zhang Tiemin, Sun Daozong, et al. Design and experiment of locating system for facilities agricultural vehicle based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 190—197. (in Chinese with English abstract)
- [3] 赵汝祺, 赵祚喜, 赵汝准. 基于多项式卡尔曼滤波器的车辆定位试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 49—56.
Zhao Ruqi, Zhao Zuoxi, Zhao Ruzhun. Experiment of vehicle localization based on polynomial Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, (Transactions of the CSAE), 2012, 28(18): 49—56. (in Chinese with English abstract)
- [4] Maria G, Di B, Guerino G. 超宽带无线电基础[M]. 葛利嘉, 朱林, 袁晓芳, 等. 译. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [5] Moe Z W, Robert A S. Characterization of ultra-wide band width wireless indoor channels: A communications theoretic view[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(9): 1613—1627.
- [6] John D C, Wayne E S. Performance of ultra-wideband communications with suboptimal receivers in multi-path channel[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20 (9): 1754—1766.
- [7] Moe Z W, Rober A S, Mark A B. Ultra-wide band width signal propagation for indoor wireless communications [C]//Proceedings of ICC97-International Conference on Communications. Montreal: IEEE, 1997: 56—60.
- [8] Shen Xuemin, Guizani M, Qiu R C. Ultra-wideband wireless communications and networks[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2003, 3(6): 663—685.
- [9] Schltz R A, Pozar D, Namgoong W. Ultra-wideband radio[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2005(3): 252—272.
- [10] Shi Xiaomin, Xi Xiaoli, Liu Jiangfan, et al. Novel ultra-wideband (UWB) bandpass filter using multiple-mode resonator[J]. Leice Electronics Express, 2016, 13 (11): 1—7.
- [11] Kumar R, Surushe G. Design of microstrip-fed printed UWB diversity antenna with tee crossed shaped structure[J]. Engineering Science & Technology An International Journal, 2016, 19(2): 946—955.
- [12] 郑学理, 付敬奇. 基于 PDR 和 RSSI 的室内定位算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1177—1185.
Zheng Xueli, Fu Jingqi. Study on PDR and RSSI based indoor localization algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 1177—1185. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王俊, 刘刚. 基于遗传 BP 算法的温室无线传感器网络定位方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 156—163.
Wang Jun, Liu Gang. Localization method of wireless sensor network for greenhouse based on genetic BP algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(21): 156—163. (in Chinese with English abstract)
- [14] Sha K, Shi W, Watkins O. Using wireless sensor network for rescue application: requirements and challenges[C]// Proceeding of Electro/Information Technology, East Lansing, MI, USA, 2006: 239—244.
- [15] Rappaport T S, Reed J H, Woerner B D. Position location using wireless communications on highways of the future[J]. IEEE Communication Magazine, 1996, 34(10): 33—41.
- [16] Li Xin, Cao Fucheng. Location based TOA algorithm for UWB wireless body area networks[J]. IEEE Autonomic and Secure Computing, 2014, 12(9): 507—511.
- [17] Salman R, Willms I. A mobile security robot equipped with UWB-radar for super-resolution indoor positioning and localization application[C]//2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2012: 1—8.
- [18] 王强, 何小旭, 李智鹏. 北斗导航和 UWB 技术相结合的室内外无缝定位系统: 中国专利 CN203490370[P]. 2014-03-19.
- [19] 张国鹏, 王艳芬, 丁恩杰. 矿井无线多媒体传感器网络 UWB 信号收发策略研究[J]. 煤炭科技, 2013, 41(12): 71—75.
Zhang Guopeng, Wang Yanfen, Ding Enjie. Study on UWB signal transmitting and receiving strategy of mine wireless multi—media sensor network[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(12): 71—75. (in Chinese with English abstract)
- [20] Bshara M, Orguner U, Gustafsson F, et al. Fingerprinting localization in wireless networks based on received-signal strength measurements: A case study on WiMAX networks [J]. IEEE Trans on Veh Technol, 2010, 59(1): 283—294.
- [21] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices[J]. IEEE Personal Communications Magazine, 2000, 7(5): 28—34.
- [22] Bekasiewicz A, Koziel S. Structure and design optimisation of compact UWB slot antenna[J]. Electronics Letters, 2016, 52(9): 681—682.
- [23] 徐兴元, 章玥, 季民河, 等. 农业生态环境监测中无线传感节点信号有效传输距离的确定[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 164—170.
Xu Xingyuan, Zhang Yue, Ji Minhe, et al. Determination of effective transmission distances of wireless sensor network nodes for agro-ecological environment monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 164—170. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张波, 罗锡文, 兰玉彬, 等. 基于无线传感器网络的无人机农田信息监测系统[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 176—182.
Zhang Bo, Luo Xiwen, Lan Yubin, et al. Agricultural environment monitor system based on UAV and wireless sensor networks[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 176—182. (in Chinese with English abstract)
- [25] Mccrady D D, Doyle L, Forstrom H, et al. Mobile ranging using low-accuracy clocks[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(6): 951—958.
- [26] Andre G, Christian H. Measuring round trip times to determine the distance between WLAN nodes[J]. Pontifical Institute of Mediaeval Studies, 2000, 25(8): 1913—1923.
- [27] Oh D, Kwak M, Chong J W. A subspace-based two way ranging system using a chirp spread spectrum modem, robust to frequency offset[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(4): 1478—1487.
- [28] 仇树军, 李红艳. 无线网络中 TOA 定位算法的误差分析[J]. 现代电子技术, 2007(2): 115—117.
Zhang Shujun, Li Hongyan. Analysis of error based on TOA location algorithm for wireless network[J]. Modern Electronics Technique, 2007(2): 115—117. (in Chinese with English abstract)
- [29] 刘颖, 王树勋, 宋春莆. 移动终端定位算法及误差分析[J]. 系统工程与电子技术, 2001(7): 98—102.
Liu Ying, Wang Shuxun, Song Chunpu. Location algorithm and error analysis about mobile terminal[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001(7): 98—102. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张漫, 周建军, 籍颖, 等. 农用车辆自动导航定位方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 74—77.
Zhang Man, Zhou Jianjun, Ji Ying, et al. Positioning method for automatic navigation of agricultural vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2009, 25 (Supp.2): 74—77. (in Chinese with English abstract)
- [31] 陈艳, 张漫, 马文强, 等. 基于 GPS 和机器视觉的组合导航定位方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 126—130.
Chen Yan, Zhang Man, Ma Wenqiang, et al. Positioning method of integrated navigation based on GPS and machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 126—130. (in Chinese with English abstract)
- [32] 周志华. 机器人学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.

Design, experiment and error analysis of impulse radio-ultra wide band indoor positioning system used in agricultural warehousing

Sun Xiaowen, Zhang Xiaochao^{*}, Zhao Bo, Wang Lili, Wei Liguu, Jia Quan

(National Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Science, Beijing 100083, China)

Abstract: For the problem of low positioning accuracy about agricultural goods and AGV (automated guided vehicle) in the warehousing environment, a system model applicable to agricultural warehouse is developed, which uses IR-UWB (impulse radio - ultra wide band) technology. This system adopts SDS-TWR (symmetric double sided - two-way ranging) scheme to set up positioning system model, and uses TOA (time of arrival) location algorithm to locate the mobile station. First of all, this system measures the distance between base station and mobile station, and then gets the optimal solution of error function using nonlinear least squares method. The optimal solution is the coordinate of the mobile station. This system also takes into account the factors of carrier frequency deviation, researches the source of error and tries to find out the method to reduce it. The analysis shows the main source of positioning error in 2 aspects, namely the method of distance measurement, and the method of calculating the position of the target nodes by the distance value. And we put forward the corresponding countermeasures for these 2 aspects, such as the selection of ranging algorithm, and the arrangement of the base stations. IR-UWB has many advantages such as strong anti-interference ability, high range accuracy, low power consumption, fast transmission speed and good security. Because of the convenience to layout network nodes and no strict requirements in the field environment, it is suitable for the field of agricultural warehousing. Finally, we design the positioning system of mobile and base station nodes based on DW1000 RF (radio frequency) chip, and respectively carry out static ranging experiments, static positioning experiments and dynamic positioning experiments. To increase contrast, this article also adds comparative trial, which uses TWR ranging algorithm. The static ranging experiments of this system adopt 6 distances of 10, 15, 20, 30, 40 and 50 m, and collects around 3 000 sets of data respectively. The experiments show that the error of the mean value between the actual distance and the ranging distance is less than 50 mm, and the root mean-square error is less than 41 mm using SDS-TWR ranging algorithm. However, the former is more than 110 mm and the latter is more than 60 mm using TWR ranging algorithm in the same experiment condition. In the static positioning experiments we conduct some experiments to measure coordinates of some spots under the fixed coordinate system. The result shows the positioning error is less than 50 mm and the root mean-square error is less than 69 mm with SDS-TWR ranging algorithm. And the positioning error is more than 90 mm and the root mean-square error is more than 115 mm with TWR ranging algorithm in the same experiment condition. In the dynamic positioning experiments, according to the actual situation of agricultural material warehouse, we move the mobile station along 5 produce aisles and 9 routes, and obtain the distance between the gathered data and the actual path. The experiments show that the positioning accuracy is 85 mm, which can meet requirement of 150 mm positioning accuracy. Comprehensive experiments show the system set up by this paper can satisfy the requirements of practical application in indoor agricultural material storage.

Keywords: position control; warehouse; error analysis; impulse radio-ultra wide band (IR-UWB); wireless positioning; time of arrival (TOA)