

超宽带室内定位无线时钟同步设计与实现

冯帆,王军,陈小磊,吴春

(中电海康集团研究院,浙江 杭州 310015)

摘要:为解决基于到达时间差(TDOA)的超宽带(UWB)室内定位系统中不同定位基站的本地时钟不同步问题,设计并实现了一种单区域定位的无线时钟同步方式,并在此基础上进行了多区域定位无线时钟同步的扩展。首先利用UWB定位基站和待定位节点之间的无线通信,获取各基站的时间戳数据,之后服务器端的时钟同步模块利用该时间戳数据和基站位置数据,计算基站间的时钟偏差系数用于计算待定位节点信号到达不同基站的时间差TDOA,最后服务器端的定位模块利用TDOA数据对待定位节点进行定位。在实际室内场景下进行验证,结果表明,设计的时钟同步方法能够实现较好的同步效果,且对于多区域的定位能够得到较准确的定位结果。

关键词:室内定位;超宽带(UWB);到达时间差(TDOA);无线时钟同步;定位区域扩展

中图分类号: TN914;TP391

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.211545

中文引用格式: 冯帆,王军,陈小磊,等. 超宽带室内定位无线时钟同步设计与实现[J]. 电子技术应用, 2021, 47(9): 105–110.

英文引用格式: Feng Fan, Wang Jun, Chen Xiaolei, et al. Design and implementation of UWB wireless clock synchronization for indoor localization[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(9): 105–110.

Design and implementation of UWB wireless clock synchronization for indoor localization

Feng Fan, Wang Jun, Chen Xiaolei, Wu Chun

(Research Institute of CETHIK Group, Hangzhou 310015, China)

Abstract: In order to solve the clock asynchronization problem of the different positioning base stations in the ultra-wideband (UWB) indoor positioning system based on the time difference of arrival (TDOA), a wireless clock synchronization method for single-area positioning is designed and implemented, and the clock synchronization extension from single-area to multi-area positioning is made. The wireless communication between the base station and the unknown node is used to obtain the time-stamp data of each base station firstly. Then, the clock synchronization module on the server side utilizes the time-stamp data and the base station location data to calculate the clock deviation coefficient between the base stations, which is applied to calculate the TDOA of the base stations. Finally, the positioning module on the server side makes use of the TDOA data to locate the unknown node. It is verified in the actual indoor scene, and the result shows that the designed clock synchronization method can achieve better synchronization performance, and can obtain accurate positioning results for multi-area positioning.

Key words: indoor localization; ultra-wideband (UWB); time difference of arrival (TDOA); wireless clock synchronization; positioning area expansion

0 引言

随着物联网(IOT)技术的发展,各行各业,如危化工厂、养老院、监狱、机场大厅、矿井、隧道等,对室内定位信息的需求也日益增大。对于复杂的室内环境,全球导航卫星系统(GNSS)信号受损严重^[1],不能提供室精准的室内定位服务,而基于室内定位的服务极具商业价值和潜在应用前景,由此衍生出GNSS之外的室内定位技术,比如ZigBee技术^[2]、红外线技术、Wi-Fi技术^[3]、射频识别(RFID)技术、蓝牙(BLE)技术^[4]、超声波技术、超宽带(UWB)技术^[5]等。

相比于室外,室内环境复杂,无线信号在传播过程中存在反射、折射、衍射等现象,定位源接收到的定位信号受损严重,导致定位不准确甚至出现无法定位的情况^[6]。一些定位技术,如蓝牙、Wi-Fi、红外线、超声波等定位技术,由于信号受到室内复杂环境的严重干扰,达不到高精度的定位要求,而超宽带因为其上百兆的带宽,具有较强的多径分辨能力、抗干扰能力、穿透力等^[7],当用于室内定位时,其在定位结果的精确性和实时性方面具有绝对的优势^[8]。

在基于UWB的室内实时定位系统中,主要是通过

基于时间的测距方式来实现对未知目标源的定位, 基于到达时间(TOA)的方法和基于到达时间差(TDOA)的方法是常用的UWB室内定位方法^[5], 这两种方法都需要精准的时间测量。由于每个源节点的内部都有独立的晶体振荡器, 各自按照自己的时钟体系运转, 不存在相互联系, 从而导致不同源节点之间存在初始的时间差。除了时间差外, 各个源节点的晶振之间还存在频率差, 即使所有源节点初始时间相同, 即不存在初始时间差, 但是因为频率差的存在, 各个源节点的时间读数也会在一段时间后有所不同, 而引起频率差的原因有很多, 如: 生产工艺、温度、湿度、设备老化等。同时, 在利用无线信号实现基于时间的测距的过程中, 由于无线信号的飞行速度(3×10^8 m/s)的数量级, 导致 $1\text{ }\mu\text{s}$ 钟差足够产生 300 m 的误差, 因此不管是基于 TOA 还是 TDOA 的测距方法, 都需要对不同的源节点进行时钟同步。

对于定位源节点的时钟同步, 目前大体有有线和无线^[9]两种方式。有线同步利用同步控制器连接每个定位源节点, 通过有线通信的方式将时间信息传输到每个源节点, 使得每个源节点都共用一个时钟系统。无线同步利用源节点之间频繁的时钟信息交互, 获取时钟偏差参数, 对本地时钟进行调整实现时钟与其他源节点时钟一致。虽然有线方式的同步精度比无线方式的高, 但是在部署简易度和成本上来说, 无线同步方式更有优势。源节点间的无线通信有单向模式^[10]也有双向模式^[11], 单向通信模式中某一基站按照一定的频率发送 UWB 信号给其他基站, 无需等待其他基站的回复, 而双向通信模式中基站之间按照一定的频率进行双向 UWB 信息交换, 从时隙划分简易度和待定位节点并发量方面考虑, 显然单向通信模式优于双向通信模式。本文采用无线单向通信的同步方式实现定位源节点之间的时钟同步, 同时采用基于 TDOA 的测距来实现目标源节点的定位。考虑到

单个区域^[12](一个主基站三个从基站)的定位源节点的部署不足以满足实际定位场景中较大区域的定位要求, 在单个区域的时钟同步基础上进行了多区域(多个主基站多个从基站)的时钟同步设计, 实现多区域定位源节点的时钟同步和待定位节点的定位。

1 单区域时钟同步设计

针对单区域一主三从的网络设计, 主基站除了负责接收待定位节点的定位帧(BLINK)之外, 还需要额外周期性地给另外三个从基站发送同步帧(CCP), 从基站之间不存在交互, 同时对于主基站的同步帧也不需要进行回复。主基站需要在接收信息和发送信息两个状态之间进行切换, 从基站只需要一直处于接收状态, 待定位节点也需要一直处于发送状态。单区域一主三从时钟同步和定位系统组成示意图如图 1 所示。

单区域时钟同步原理示意图如图 2 所示。以主基站 MA 和从基站 SA1 之间的通信为例, 当主基站 MA 处于

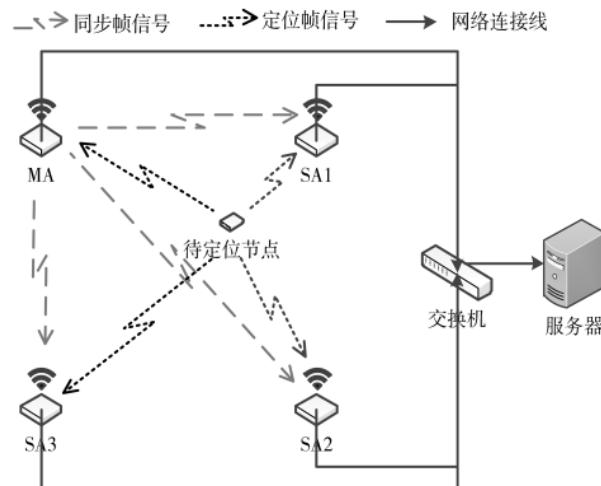


图 1 单区域系统组成示意图

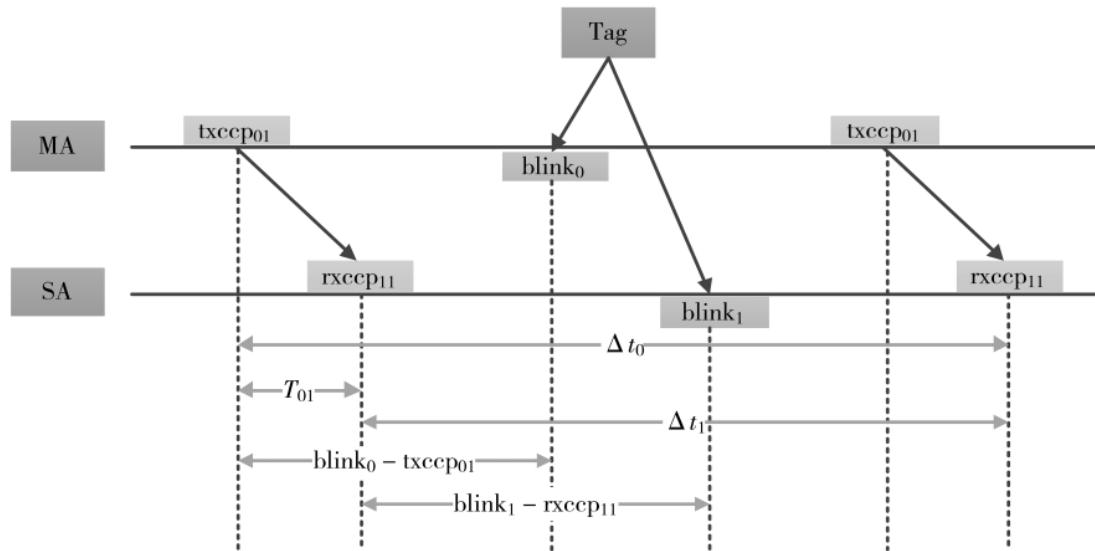


图 2 单区域时钟同步原理示意图

发送状态，发送同步帧 CCP 给从基站 SA1，同时记录发送 CCP 时间戳 t_{xcep01} ，之后切换至接收状态，接收待定位节点 Tag 的定位帧，记录定位帧接收时间戳 $blink_0$ ，在经过一段固定时间 Δt_0 后，主基站 MA 再次发送同步帧 CCP 给从基站 SA1，记录发送时间戳 t_{xcep02} ；从基站 SA1 一直保持接收状态，分别记录接收到主基站 MA 同步帧的时间戳 t_{xcep11} 、 t_{xcep12} 和待定位节点 Tag 定位帧时间戳 $blink_1$ 。

当主基站 MA 和从基站 SA1 处于相同的时钟体系，即两者之间不存在初始时间差和频率差时，很容易得出主基站 MA 和从基站 SA1 对于待定位节点 Tag 的 TDOA，即：

$$tdoa_{1-0}=blink_1-blink_0$$

但是在实际应用场景中，主基站 MA 和从基站 SA1 都有自己的时钟体系，必然不能直接计算两者之间的 TDOA。

根据图 2 主从基站同步通信过程可知，从基站 SA1 和主基站 MA 的定位帧在从基站 SA1 接收同步帧 CCP 的时刻对应的时间差分别为：

$$\begin{cases} \mu_1 = rxcep_{11} - (txcep_{01} - T_{01}) \\ \mu_2 = rxcep_{12} - (txcep_{02} - T_{01}) \end{cases}$$

其中 T_{01} 表示同步帧 CCP 从主基站 MA 到从基站 SA1 的飞行时间。

假设在时间段 $[txcep_{01}, txcep_{02}]$ 内，两基站的时钟未发生漂移^[13]，即时钟频率保持不变，从而可得两者的频率差为：

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\mu_2 - \mu_1}{txcep_{02} - txcep_{01}} = \frac{(rxcep_{12} - rxcep_{11}) - (txcep_{02} - txcep_{01})}{txcep_{02} - txcep_{01}} \\ &= \frac{\Delta t_1 - \Delta t_0}{\Delta t_0} \end{aligned}$$

已知主从基站的频率差，则对于从基站时钟体系下的某一时间间隔 Δt_s ，均可换算成其对应的主基站时钟体系下的时间间隔 Δt_m ，换算关系如下：

$$\Delta t_m = \frac{1}{1+\delta} \cdot \Delta t_s \quad (1)$$

其推导过程如下：

以 t 表示标准时钟的读数， $c(t)$ 表示节点本地时钟在标准时刻 t 时的读数，则节点时钟与标准时钟在标准时刻 t 的时间偏差为：

$$\mu(t) = c(t) - t$$

从而可得两者的时间频率差^[10]为：

$$\delta(t) = \frac{du(t)}{dt}$$

即两者时间偏差的一阶导数。

以主基站的时钟为标准时钟体系，对于从基站的一个时间间隔，令其本身时钟体系下的起始时刻和终止时刻分别为 t_{s_1} 和 t_{s_2} ，其所对应的主基站时钟体系下的时刻分别为 t_{s_1}' 和 t_{s_2}' ，则存在如下关系：

$$\begin{cases} \mu(t_{s_1}') = t_{s_1}' - t_{s_1} \\ \mu(t_{s_2}') = t_{s_2}' - t_{s_2} \end{cases}$$

两式相减并移项得：

$$\begin{aligned} t_{s_2}' - t_{s_1}' &= t_{s_2} - t_{s_1} - \mu(t_{s_2}') + \mu(t_{s_1}') \\ &= t_{s_2} - t_{s_1} - \delta(t_{s_2}' - t_{s_1}') \\ t_{s_2}' - t_{s_1}' &= \frac{1}{1+\delta} (t_{s_2} - t_{s_1}) \end{aligned}$$

根据单区域主从基站时钟同步原理示意图可以看出，如果将从基站 SA1 时钟体系下的时间间隔换算成主基站 MA 时钟体系下的时间段，就可以得出从基站 SA1 与主基站 MA 对同一定位帧 BLINK 的 TDOA，即：

$$tdoa_{1-0} = (blink_1 - rxcep_{11})' + T_{01} - (blink_0 - txcep_{01}) \quad (2)$$

由时间段换算关系式(1)可得：

$$tdoa_{1-0} = \frac{blink_1 - rxcep_{11}}{1+\delta} + T_{01} - (blink_0 - txcep_{01})$$

2 多区域时钟同步设计

在将单区域定位系统扩展成多区域定位系统来满足更大区域的定位需求的过程中，用于定位的源节点的角色不再是以前的主基站和从基站，而需要分成三类基站，即一级主基站、次级主基站和从基站。

一级主基站周期性地发送同步帧 CCP 给其从基站和下级主基站，并在发送完 CCP 后切换至接收状态接收标签定位帧 BLINK；次级主基准站在接收其上级主基准站发送的定位帧 CCP 之后，切换至发送状态并发送同步帧给其下级主基站（若有）和从基站，然后切换至接收状态接收标签定位帧 BLINK；从基站一直处于接收状态，接收其上级主基准站发送的定位帧 CCP 和标签发送的定位帧 BLINK。

本文设计的多区域定位系统以图 3 为例来进行说明。一级主基准站 MA1 的下级主基准站为 MA2，从基站为 SA1 和 SA2，该四个基站围成的区域为第一区域；次级主基准站 MA2 的上级主基准站为 MA1，下级主基准站为 MA3，从基站为 SA2 和 SA3，该四个基站围成的区域为第二区域；次级主基准站 MA3 的上级主基准站为 MA2，没有下级主基准站，从基站为 SA3、SA4 和 SA5，该四个基站围成的区域为第三区域。在该系统中，对于多个主基准站发送的同步帧，次级主基准站和从基站只会接收其上级基准站发送的同步帧。

多区域时钟同步原理和单区域时钟同步原理类似，以三个主基准站和三区域的某个从基站为例，其原理示意图如图 4 所示。

为方便多区域基站的时钟同步，在进行多区域基站的时钟同步时，将每个基站接收到的标签定位帧时间戳换算成一级主基准站时钟体系下的时间戳。令：

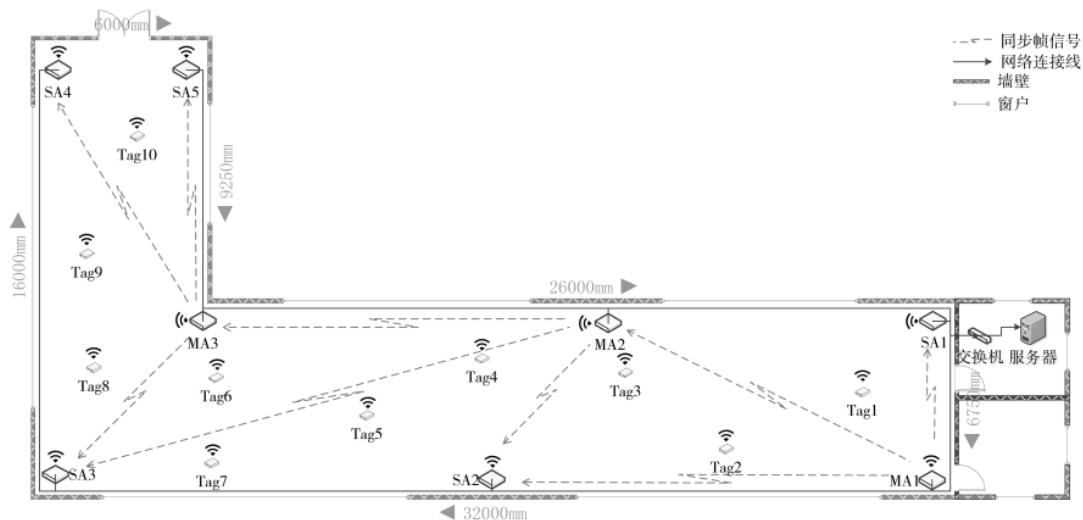


图 3 多区域系统组成示意图

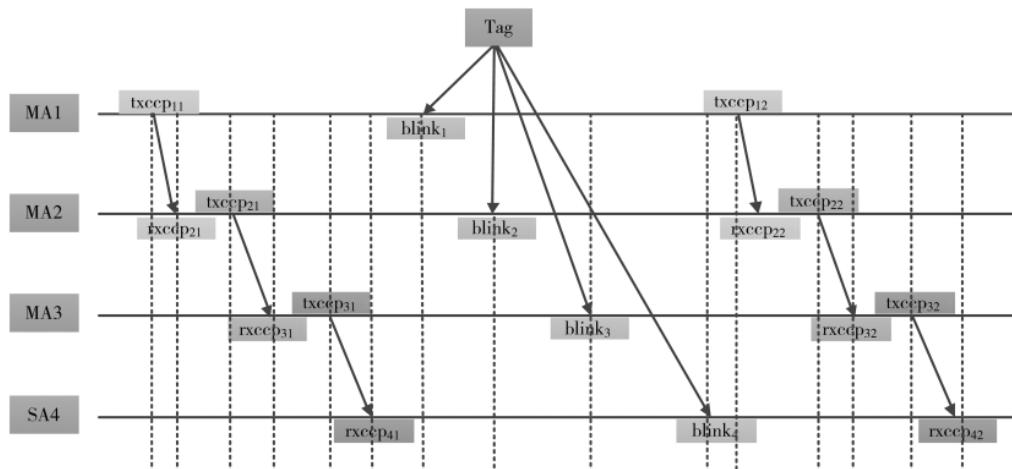


图 4 多区域时钟同步原理示意图

$$\begin{aligned}\Delta t_1 &= \text{txcep}_{12} - \text{txcep}_{11} \\ \Delta t_2 &= \text{txcep}_{22} - \text{txcep}_{21} \\ \Delta t_3 &= \text{rxcep}_{22} - \text{rxcep}_{21} \\ \Delta t_4 &= \text{txcep}_{32} - \text{txcep}_{31} \\ \Delta t_5 &= \text{rxcep}_{32} - \text{rxcep}_{31} \\ \Delta t_6 &= \text{rxcep}_{42} - \text{rxcep}_{41}\end{aligned}$$

则对于次级主基站 MA2 接收到的定位帧 BLINK2，其转换后的值为：

$$\text{blink}'_2 = (\text{blink}_2 - \text{rxcep}_{21}) \cdot \frac{1}{1 + \delta_{21}} + T_{12} + \text{txcep}_{11}$$

$$\text{其中 } \delta_{21} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta t_1}.$$

同理，对于次级主基站 MA3 和从基站 SA4，其转换后的定位帧时间戳分别为：

$$\begin{aligned}\text{blink}'_3 &= [(\text{blink}_3 - \text{rxcep}_{31}) \cdot \frac{1}{1 + \delta_{32}} + T_{23} + \text{txcep}_{21} - \text{rxcep}_{21}] \cdot \\ &\quad \frac{1}{1 + \delta_{21}} + T_{12} + \text{txcep}_{11}\end{aligned}$$

$$\text{blink}'_4 = [(\text{blink}_4 - \text{rxcep}_{41}) \cdot \frac{1}{1 + \delta_{43}} + T_{34} + \text{txcep}_{31} - \text{rxcep}_{31}] \cdot$$

$$\frac{1}{1 + \delta_{32}} + T_{23} + \text{txcep}_{21} - \text{rxcep}_{21} \cdot$$

$$\frac{1}{1 + \delta_{21}} + T_{12} + \text{txcep}_{11}$$

$$\text{其中, } \delta_{32} = \frac{\Delta t_3 - \Delta t_2}{\Delta t_2}, \delta_{43} = \frac{\Delta t_4 - \Delta t_3}{\Delta t_3}.$$

第一区域响应定位帧的基站 BLINK 时间戳换算可以参考次级主基站 MA2 的 blink'_2 ，第二区域的基站参考次级主基站 MA3 的 blink'_3 ，第三区域的基站参考从基站 SA4 的 blink'_4 。通过将所有响应标签定位帧的基站的 BLINK 时间戳转换成一级主基站时钟体系下的时间戳后，在定位阶段，可选任以基站作为定位参考基站，均可以计算其余基站与该基站的 TDOA，从而进行基于 TDOA 的位置解算，实现对目标源节点的定位。

3 测试验证和结果分析

在测试时钟同步效果时，采用了一主一从两基站进

行验证,此时标签置于两基站正中间,理论上来说,此时标准 TDOA 应该为 0,本文分别测试了两个基站不同距离时所估计的 TDOA 大小,并与标准值进行比较,比较结果如图 5 所示。

在测试验证定位效果时,选择某室内场地作为测试场景,其示意图如图 3 所示,各个基站的坐标分别如下:MA1(0,0),MA2(12,6),MA3(26,6),SA1(0,6),SA2(16,0),SA3(31,0),SA4(31,15),SA5(26,15)。实测过程中,每个区域选取了一个点进行定点测试,且这些点也代表了区域内部点、区域边界附近点以及区域重合附近点,累计误差概率图如图 6 所示。

从测试结果可以看出,在实际定位场景中,对于一主一从两基站的 TDOA 预估与标准值的误差在 ± 1000 ps 左右,

而且对于多区域不同区域的定点测试,定位结果的定位误差低于 0.4 m 的概率不低于 95%。

4 结论

本文在单区域(一主三从)UWB 定位基站时钟同步的基础上,提出了一种适用于较大区域的时钟同步方案,并利用实际室内环境进行测试,测试结果表明,该时钟同步系统能够达到较好的同步效果,并能够取得较好的定位效果。

参考文献

- [1] 石钦,赵思浩,崔晓伟,等.无线时钟同步的 TDOA 室内定位系统[J].导航定位与授时,2018,5(3):53-58.
- [2] 刘博深.基于 ZigBee 的室内定位算法设计与实现[D].哈尔滨:黑龙江大学,2020.

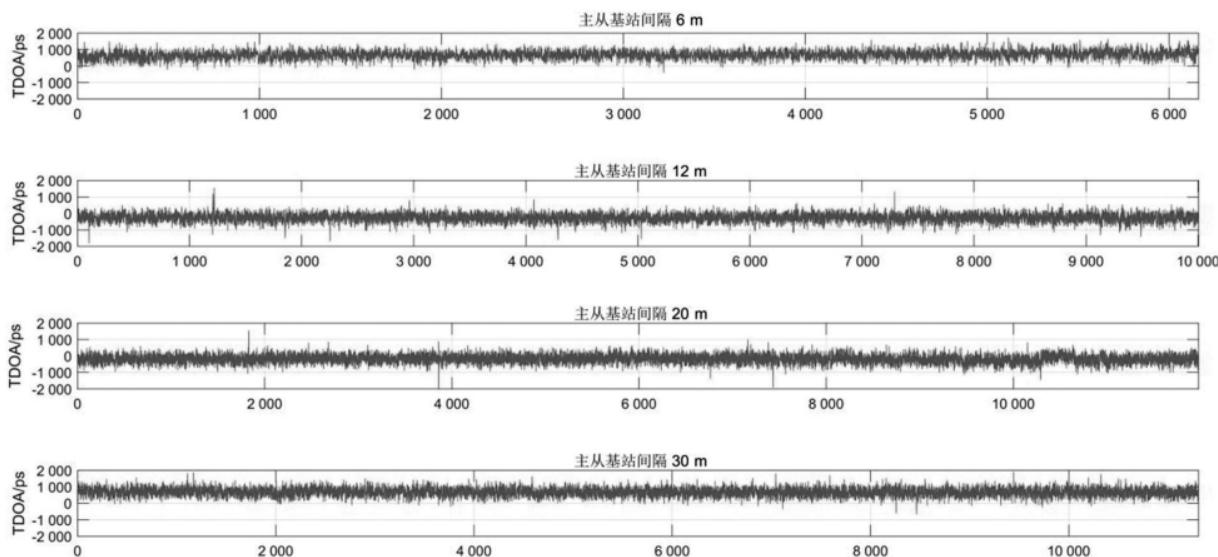


图 5 主从基站预估 TDOA 与标准值的比较

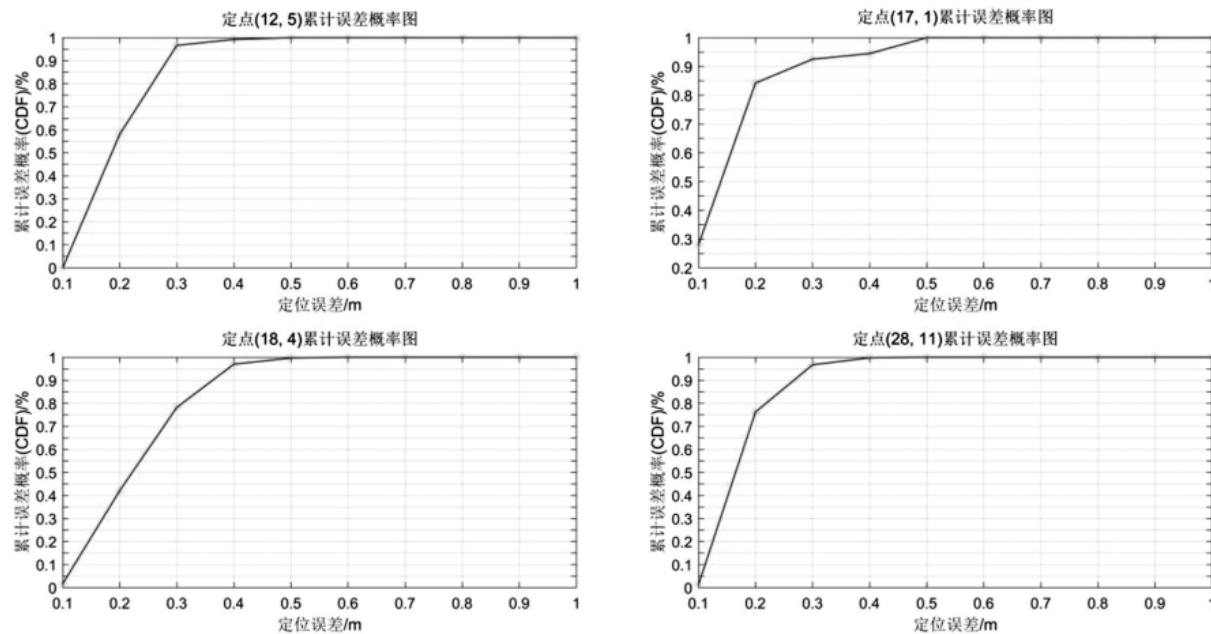


图 6 多区域不同点的定点测试结果

- [3] 韩萍,王浩,方澄,等.基于 WiFi 数据的实时高效定位分析系统设计[J].现代电子技术,2020(4):43-47.
- [4] 宋丽萍.基于 RSSI 的室内定位算法研究[J].太原师范学院学报(自然科学版),2019,18(2):49-52.
- [5] 赵红梅,赵杰磊.超宽带室内定位算法综述[J].电信科学,2018,34(9):130-142.
- [6] HWANG S S,KWON G R,PYUN J Y,et al.AOA selection algorithm for multiple GPS signals[C]//2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers.IEEE,2013:481-485.
- [7] 葛丽丽.基于 UWB 的高精度室内定位及时钟同步算法的研究[D].北京:北京邮电大学,2019.
- [8] 朱振海.超宽带精准实时定位系统的TDOA 定位算法研究[D].海口:海南大学,2019.
- [9] WU Y C,CHAUDHARI Q,SERPEDIN E.Clock synchronization of wireless sensor networks[J].IEEE Signal Processing,2011,28(1):124-128.
- [10] YOU B,LI X,LIU W.A Kalman-filter-based wireless clock synchronization method in indoor localization[C]// Eighth International Conference on Digital Image Process-

(上接第 100 页)

系统进行设计,并进行大量试验,获得达到设计要求的脉冲偏压控制系统,为脉冲束流的调控奠定技术基础。

(1)采用 DSPIC30F4012 实现了脉冲束流基值、峰值向偏压基值、峰值的转化,根据输入脉冲频率、占空比,可以调节脉冲束流的输出;

(2)采用 SG3525A 输出 100 kHz 以上的基波,由 DSP 输出脉冲合成的模式,再经由大功率运放、基值、峰值串联整流电路可以获得脉冲偏压输出,继而实现对脉冲束流输出的调控。

参考文献

- [1] 陈国庆,树西,张秉刚,等.国内外电子束熔丝沉积增材制造技术发展现状[J].焊接学报,2018,39(8):123-128,134.
- [2] 熊进辉,李士凯,耿永亮,等.电子束熔丝沉积快速制造技术研究现状[J].电焊机,2016,46(2):7-11.
- [3] 齐铂金,范霁康,刘方军.脉冲束流电子束焊接技术综述[J].航空制造技术,2015(1):26-30.
- [4] 周成候,李婵,吴王平,等.金属材料增材制造技术[J].金属加工(冷加工),2016(s1):879-883.
- [5] 张洪波,刘方军,左从进.一种新型脉冲电子束焊接用 PWM 逆变式栅偏压电源系统设计[J].航空制造技术,2004(增刊):188-191.
- [6] American Welding Society.Recommended practices for electron beam welding[M].Miami:Global Engineering Documents,1999.
- [7] 韦寿祺,莫金海,何少佳.大功率电子束轰击炉电子枪电源控制策略[J].真空科学与技术报,2008,28(2):58-62.
- [8] 王泽庭.高压电子束焊机电源的研究与实现[D].北京:北京工业大学,2011.
- [9] ZHANG Y M,LI P,CHEN Y,et al.Automated system for welding based rapid prototyping[J].Mechatronics,2002,12(1):37-53.
- [10] 莫金海,韦寿祺,何少佳,等.新型 PWM-BUCK 电子束焊机稳定高压电源的设计[J].焊接学报,2009,30(6):34-38.
- [11] 杜慧聪,刘方军,张伟,等.150kV 高压逆变电源倍压整流电路仿真[J].北京航空航天大学学报,2014,40(10):1001-1005.
- [12] 莫力林,韦寿祺.大型电子束轰击炉束功率控制系统的设[J].硬质合金,2009,26(4):240-245.
- [13] 齐铂金,徐国宁,刘方军.新型脉冲电子束焊接偏压电源设计[J].北京航空航天大学学报,2012,38(10):1311-1316.
- [14] 许海鹰,余伟,左从进.高压脉冲电子束的控制及其对焊缝形貌影响[J].北京航空航天大学学报,2011,37(8):1044-1048.
- [15] 齐铂金,徐国宁,肖攀.脉冲电子束焊接技术研究[J].上海交通大学学报,2012,16(S):141-144.

(收稿日期:2021-03-22)

作者简介:

冯帆(1993-),女,硕士,工程师,主要研究方向:物联网室内定位。

王军(1982-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:物联网建设和智能化控制。

陈小磊(1990-),男,硕士,工程师,主要研究方向:物联网室定位。



扫码下载电子文档



扫码下载电子文档

作者简介:

王壮(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:高能束流加工技术。

许海鹰(1973-),通信作者,男,博士,研究员,主要研究方向:高能束流加工技术,E-mail:xhyxhy@126.com。

桑兴华(1990-),男,硕士,工程师,主要研究方向:高能束流加工技术。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所