

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902487

采用三次通信的 TOF 与 TDOA 联合定位算法*

高 健¹ 陆 阳^{1,2} 李庆巧¹ 卫 星^{1,2}

(1.合肥工业大学 计算机与信息学院 合肥 230601; 2.安全关键工业测控技术教育部工程研究中心 合肥 230009)

摘 要:通常基于超宽带(UWB)的定位系统采用的主要技术是 TOA 和 TDOA 算法,但是 TOA 算法定位速度低,TDOA 算法定位精度不稳定,这些情况均限制了它们在 UWB 定位系统中的应用。为了权衡这两种算法在定位速度和精度方面的不足,提出了一种新的 TOF 与 TDOA 联合定位算法(CTT)。该算法仅需要 3 次 UWB 通信便可测量 TDOA 算法所需的所有时间差信息和一个 TOF 距离值,并可以此计算出该定位区域内所有基站与单个标签的距离,定位速度比 TOA 算法提升至少 50%。使用 DW1000 分别对 TOA、TDOA 与 CTT 算法进行定位精度对比,结果表明 CTT 算法在二维情况下的平均定位误差 <20 cm,标准差 <10 cm,接近于 TOA 的精度并解决了 TDOA 算法精度不稳定的问题。

关键词:超宽带;TOF 测距;到达时间差定位;到达时间定位;联合定位

中图分类号:TN92;TP393

文献标识码:A

国家标准学科分类代码:510.5015

Joint positioning algorithm of TOF and TDOA using three-communication

Gao Jian¹ Lu Yang^{1,2} Li Qingqiao¹ Wei Xing^{1,2}

(1.School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China;

2.Engineering Research Center of Safety Critical Industry Measure and Control Technology,

Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract:The main technologies used in ultra-wideband(UWB) based positioning systems are TOA and TDOA. However, the low positioning speed of TOA algorithm and the unstable positioning accuracy of TDOA algorithm limit the development of UWB positioning system. In order to balance the shortcomings of the two algorithms in positioning speed and accuracy, this paper proposes a new TOF and TDOA joint positioning algorithm combination of TDOA and TOF(CTT). The algorithm only needs three times of UWB communication to measure all time difference information and a TOF distance value required by the TDOA algorithm, and can calculate the distance between all base stations and a single tag in the positioning area. The positioning speed of CTT is at least 50% higher than the TOA algorithm. DW1000 is used to compare the positioning accuracy of TOA, TDOA and CTT algorithms respectively, the results show that the average positioning error of CTT algorithm in two-dimensional case is less than 20 cm and the standard deviation is less than 10 cm, close to the accuracy of TOA and solve the instability of TDOA algorithm.

Keywords:UWB; TOF; TDOA; TOA; joint positioning method

0 引 言

近几年来,随着对精确定位需求的增加,定位技术的应用逐渐从航海、测绘、军事、自然灾害预防等领域延伸到室内导航、人员跟踪、井下定位、无人运输等社会的其

他方面^[1-5]。当前 GPS 技术解决了开放空间下广阔的室外无线定位问题,但是 GPS 技术并不适用于室内的情况,因为卫星信号无法穿透墙壁和一些坚固的障碍物,在具有深阴影效应的情况下完全失效。随着位置服务的相关技术和产业从室外向室内发展的需要,一系列室内无线定位技术如超宽带(UWB)、WiFi、ZigBee、蓝牙、超声

收稿日期:2019-08-18 Received Date: 2019-08-18

* 基金项目:国家重点研发计划专项(2018YFC0604404, 2016YFC0801804)、中央高校基本科研业务费专项(PA2019GDPK0079)资助

波、红外线等正在加快商业化的步伐。其中 UWB 定位技术使用纳秒级别的短脉冲进行信号传输,通过亚纳秒级别的高时钟分辨率来完成精确距离测量,使 UWB 更为适用于 TOA (time of arrival) 和 TDOA (time difference of arrival) 定位算法。

近年来,一些研究集中于对 UWB 的媒体访问控制层 (MAC) 协议的优化^[6-7],提升了数据链路的稳定性和吞吐量,但是这些协议专注于数据传输,并不适用于定位系统的构建。在定位方面,传统接收信号强度 (received signal strength indication, RSSI) 方法的鲁棒性和精度有限,并未充分利用 UWB 的高时钟分辨能力的优势,于是许多基于 TOA 或 TDOA 的 UWB 定位算法被提出。文献[8-13]提出了一系列定位算法以估计移动节点的位置,其中基于 TOF (time of flight) 的 TOA 算法具有较高的定位精度,使用对称双边双向算法 (symmetric double-sided two-way ranging, SDS-TWR) 来完成 TOF 测距过程,可以抑制 UWB 晶振的时钟漂移问题,实现分米级别的高精度定位^[9]。但是由于 TOF 测距所需的 UWB 通信量较大,限制了系统的定位容量和刷新率的提高。基于 TDOA 的算法^[8-9]需要基站间精确的时间同步,较少的 UWB 通信量使其具备较高的定位容量,但是单纯的 TDOA 算法由于其双曲线几何性质带来的误差放大,导致其定位精度不稳定。针对于单一定位技术在性能上存在的缺陷,一些研究通过混合多种定位技术来提升精度^[10-13]。文献[12]提出通过在 TDOA 测量的基础上,增加一次移动标签到基站之间的 SDS-TWR 测距过程,可以显著抑制 TDOA 因为双曲线几何性质而产生的误差放大,但是在二维平面上需要至少 6 次 UWB 通信才能完成一次定位过程;文献[13]通过合并同步过程和测距的通信过程,通过 4 次 UWB 通信便可测量 TOF 值与 TDOA 数据来完成上述过程。上述两种算法的实验表明这种联合定位算法的定位精度接近基于 TOF 的 TOA 算法。本文提出了一种新的联合定位算法的通信流程,仅需 3 次通信便可得到 TOF 和 TDOA 所需的所有时间信息,最终实验表明本文算法也可以达到接近基于 TOF 的 TOA 算法的定位精度,并且相比于文献[12-13]进一步减少了单次定位所需要的 UWB 通信量。

1 基本定位算法

1.1 TOF 测距算法

虽然 UWB 设备高时间分辨率的特性可以保证其测距的精确性,但是由于参与定位的节点之间存在的时钟漂移 (当前集成晶振的准确度为 $\pm 1 \times 10^{-5}$),这将会导致 TOF 测距过程在 1 ms 的通信过程中最多产生接近 20 ns 的时间误差,所以必须采取措施去消除时钟漂移的影响。

SDS-TWR^[5] 算法是 TOF 测距过程中常用的算法之一,它通过记录测距双方的通信时间来消除时钟漂移的影响,可以达到 10 cm 的测距精度。

SDS-TWR 算法通信流程如图 1 所示,具体通信步骤如下。

1) 由标签开始发起定位,发送 Poll 帧给基站,并记录下发送时间 t_1 。

2) 基站接收到 Poll 帧之后,记录下接收时间 a_1 ,并于 a_2 时刻发送 Response 帧给标签。计算出 a_1 到 a_2 的时间间隔 t_{replyA} 。

3) 标签接收到 Response 帧之后记录下时间 t_2 ,并在时刻 t_3 处发送 Final 帧,其中 Final 帧中包含了 t_1 到 t_2 的时间间隔 t_{roundT} 以及 t_2 到 t_3 的时间间隔 t_{replyT} 。

4) 基站接收到 Final 帧后,记录 Final 帧中的 t_{roundT} 和 t_{replyT} 值,并记录下接收时间 a_3 ,计算 a_2 到 a_3 的时间间隔 t_{roundA} 。此时在基站处通过式(1)计算出标签到基站的距离 $d_{A,T}$ 。

$$\begin{cases} t_{A,T} = \frac{1}{4}((t_{\text{roundT}} - t_{\text{replyT}}) + (t_{\text{roundA}} - t_{\text{replyA}})) \\ d_{A,T} = c \times t_{A,T} \end{cases} \quad (1)$$

式中: c 为电磁波在空气中传输的速度。

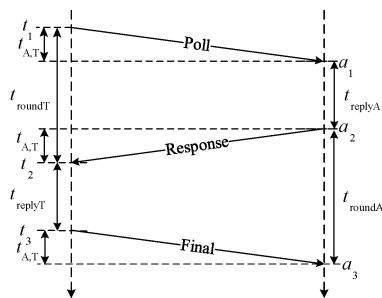


图1 SDS-TWR 通信流程

Fig.1 The communication process of SDS-TWR

1.2 TOA 定位算法

TOA 是一种经典的定位算法,在二维平面情况下需要至少 3 个已知位置的基站来协助定位。其在二维平面的定位原理如图 2 所示。

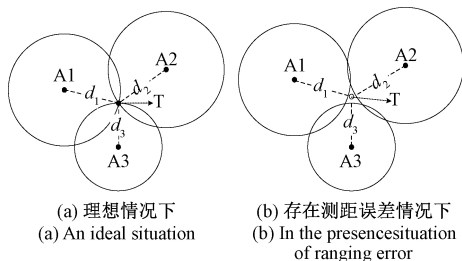


图2 TOA 定位原理及误差示意图

Fig.2 The positioning principle and error indication of TOA

其中 A1、A2、A3 均为定位基站(统称为 Ax),坐标均已已知,分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) ; T 为移动标签,其坐标为 (x, y) 。通过 TOF 测距过程测量 T 到 Ax 的距离,然后根据圆形几何构建方程求解得到 T 的坐标值。图 2(a)表示了理想情况下三圆正好交于一点,但是在实际情况下测量的距离值往往包含误差(图 2(b)),导致三圆无法正好交于一点,此时需要将圆构建的非线性方程做线性化处理来计算出一个近似的坐标值。以 d_1 、 d_2 、 d_3 分别表示标签 T 到基站 A1、A2、A3 的距离,TOA 方程为:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = d_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

经过线性化过程推导出最终结果^[14]:

$$\mathbf{X}_T = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \quad (3)$$

$\mathbf{X}_T$ 是标签的坐标向量,其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (x_2^2 + y_2^2) - (x_1^2 + y_1^2) + d_1^2 - d_2^2 \\ (x_3^2 + y_3^2) - (x_1^2 + y_1^2) + d_1^2 - d_3^2 \end{bmatrix}$$

1.3 TDOA 定位算法

TDOA 算法以移动标签到达基站的时间差信息来构建双曲线,在先验信息下确定正确的双曲线交点来得到位置,常见的定位解算法有 Fang、Taylor 级数法、Chan 算法等^[14]。在二维层次上同样需要至少 3 个基站来完成定位,其在理想情况下和存在误差的情况下的定位原理如图 3 所示。

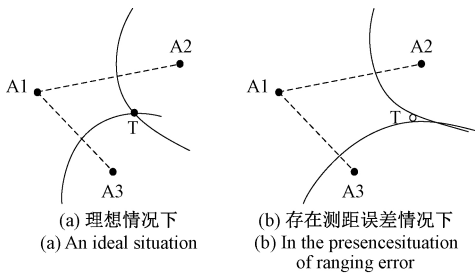


图 3 TDOA 定位原理及误差示意图

Fig.3 The positioning principle and error indication of TDOA

1) 时间同步算法

基于 UWB 的 TDOA 算法的重点是实现基站间亚纳秒级别的时钟同步。可以通过有线和无线的方式实现同步。有线时钟同步需要设计同步信号发生器,使用电缆昂贵,安装困难并且对环境十分敏感。

而无线时钟同步算法基于 UWB 设备的高时钟分辨率,开销远小于有线同步。其中线性插值法为 TDOA 算法常用的无线时钟同步算法^[15]。线性插值法的通信流程如图 4 所示,在一次同步周期内的具体步骤如下。

1) 主基站(MA)周期性地定位区域内广播 Syn1 同步帧,并记录下发送时间 t_1 ,从基站接收到之后记录下接收时间 a_1 。

2) 在主基站发送 Syn2 之前,标签在某一时刻请求定位并广播发送 Poll 帧,区域内所有主基站和从基站接收到 Poll 帧后分别记录 t_2 、 a_2 ,并分别计算 t_1 、 t_2 的时间间隔 t_{recMA} ; a_1 、 a_2 的时间间隔 t_{recSA} 。

3) 主基站于 t_3 时刻发送 Syn2 同步帧,从基站记录接收时间 a_3 ,此时完成一次同步。主基站和从基站分别计算出 t_1 、 t_3 的时间间隔 t_{synMA} , a_1 、 a_3 的时间间隔 t_{synSA} 。从基站通过以太网将 t_{recSA} 和 t_{synSA} 传输给主基站,通过式(4)便可测量出时间差。

$$\begin{cases} k_{\text{MA,SA}} = \frac{t_{\text{synMA}}}{t_{\text{synSA}}} \\ t_{\text{doaSA,MA}} = t_{\text{recSA}} k_{\text{MA,SA}} + t_{\text{MA,SA}} - t_{\text{recMA}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $k_{\text{MA,SA}}$ 是时钟漂移比例系数; $t_{\text{doaSA,MA}}$ 为标签 T 到从基站 SA 的距离与标签到主基站 MA 之间距离的差值; $t_{\text{MA,SA}}$ 是主基站到从基站之间电磁波传播的时间,可提前经过测量得知。

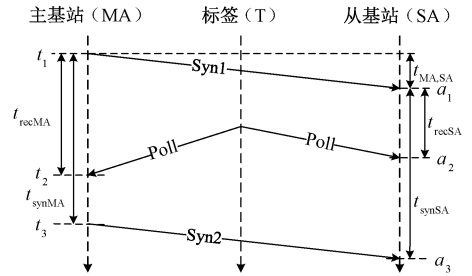


图 4 线性插值法通信过程

Fig.4 The communication process of linear interpolation

线性插值法仅能在接收到同步帧时才能处理本次同步帧到上次同步帧之间到达的标签定位请求,这会导致定位的延迟,如果同步周期为 100 ms,那么标签定位请求的处理延迟最大可能达到 100 ms,有的甚至会高于 100 ms,对于高速物体会因为处理延迟而导致额外的误差。使用卡尔曼滤波器算法来预测本次周期的 k 值可以较好地解决这个问题^[15]。

2 TOF 与 TDOA 联合定位算法(CTT)

2.1 改进的时钟同步算法

因为主基站对从基站周期性的同步会产生额外的通信开销,并且会产生较大的定位延迟,因此提出了一种无需连续时钟同步的算法,对所有定位请求均可以达到 < 20 ms 的反应速度,适用于高实时性的定位系统。

通信流程如图 5 所示,不同于线性插值法,此时不是

以主基站作为同步源来完成同步,而是以标签作为同步发生点通过广播 Poll 和 Final 帧来完成定位区域内基站的短暂同步,具体步骤如下。

1) 由标签发起定位,在区域内广播 Poll 帧,并记录发送时间 t_1 。

2) 主基站和从基站分别记录下接收 Poll 帧的时间 a_1 、 b_1 ,并由主基站于 a_2 时广播 Response 帧,并计算 a_1 与 a_2 的时间间隔 t_{replyMA} 。

3) 标签和从基站 SA 接收到 Response 之后分别记录下时间 t_2 、 b_2 ,并分别计算出 t_1 到 t_2 的时间间隔 t_{roundT} , b_1 到 b_2 的时间间隔 t_{recSA} 。之后标签于 t_3 时广播 Final 帧,其中 Final 帧中包含了 t_{roundT} 和 t_2 到 t_3 的时间间隔 t_{replyT} 值。

4) 主基站和从基站接收到 Final 后,分别记录下接收时间 a_3 、 b_3 ,并分别计算出 a_2 到 a_3 的时间间隔 t_{roundMA} 、 a_1 到 a_3 的时间间隔 t_{synMA} 、 b_3 到 b_1 的时间间隔 t_{synSA} 。从基站 SA 通过以太网将 t_{recSA} 和 t_{synSA} 传输给主基站。通过式 (5) 便可在主基站处计算出时间差 $t_{\text{doaSA,MA}}$ 。

$$\begin{cases} k_{\text{MA,SA}} = \frac{t_{\text{synMA}}}{t_{\text{synSA}}} \\ t_{\text{doaSA,MA}} = t_{\text{replyMA}} - t_{\text{recSA}} k_{\text{MA,SA}} + t_{\text{MA,SA}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $k_{\text{MA,SA}}$ 为时钟漂移比例系数, $t_{\text{MA,SA}}$ 为事先测得的主基站 MA 到从基站 SA 之间的电磁波传输时间。根据算法特性,无论定位区域内存在多少个从基站,都只需要 3 次 UWB 通信便可得到所有从基站与主基站的时间差信息,之后通过 TDOA 算法完成位置解算。

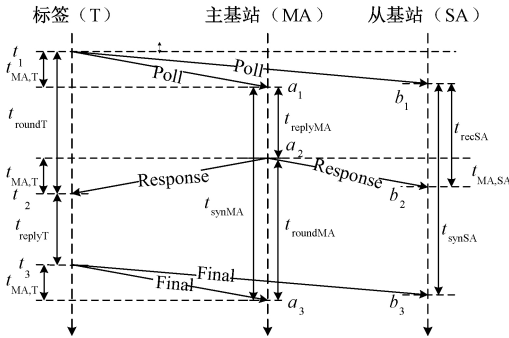


图5 CTT 通信过程

Fig.5 The communication process of CTT

2.2 TOF 与 TDOA 联合定位算法

从主基站 MA 与标签 T 的通信流程来看,MA 与 T 之间完成了一次 SDS-TWR 测距过程,于是便可通过式 (1) 测得 MA 与 T 之间的距离 $d_{\text{MA,T}}$ 。因为距离差 $\Delta d_{\text{SA,MA}} = c \times t_{\text{doaSA,MA}} = d_{\text{SA,T}} - d_{\text{MA,T}}$,此时可以计算从基站 SA 到标签 T 的距离 $d_{\text{SA,T}} = c \times t_{\text{doaSA,MA}} + d_{\text{MA,T}}$,当定位区域内存在多个从基站时,由于已经计算出定位区域内所有从基站到

主基站的时间差信息,因而可得到标签到定位区域内所有基站的距离,此时 TDOA 问题转化为 TOA 问题进行位置计算。

本文算法结合了 TDOA 的时间差测量过程和 TOF 的测距过程,仅使用了 3 次 UWB 通信,所以将其命名为 CTT 算法。

文献[12,16]对 TDOA 的误差产生做了详细地说明,由于双曲线的几何性质会充当误差放大器,当双曲线渐近线上的标签越远离的时候,位置的不确定性就会增大,进而会产生较大的误差抖动。而在 TDOA 上引入一个 TOF 测距值之后,TDOA 产生的误差将会被 TOF 产生的圆形切割,以此限制了 TDOA 的误差抖动范围。图 6 所示为引入主基站 MA 到标签 T 的距离 $d_{\text{MA,T}}$ 对 TDOA 测量结果的抑制情况,图中空心圆点就是对单个标签 T 的测量值分布情况。

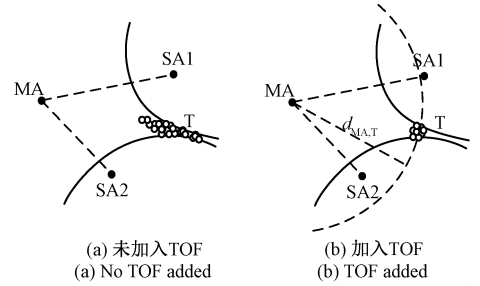


图6 TOF 抑制 TDOA 误差的原理

Fig.6 The principle of TOF suppressing TDOA error

另一方面,因为 $d_{\text{SA,T}}$ 是由两个测量值累加而成,所以由此产生的累积误差会导致 $d_{\text{SA,T}}$ 精度低于直接用 SDS-TWR 算法测量的结果,这就使得本文算法的精度可能会比基于 TOF 的 TOA 算法低。

3 时间性能分析

图 7 所示为当前一些主流的定位算法的通信过程。图 7(a) 的 C-TWR (combine TWR) 是 TOA 实现的一个典型,是对 SDS-TWR 算法的改进,通过对 Poll 帧和 Final 帧合并,减少了通信次数,其测距精度可以达到 SDS-TWR 的水平,在此作为 TOA 定位算法的实现形式。

图中 7(b)、(c) 是 TDOA 的两种实现算法。文献[8]所述的 T-TDOA (transmitter time difference of arrival) 算法类似 GNSS,可以在小范围内以 UWB 定位基站实现卫星功能,由基站间进行协调以一定的时间间隔连续发送定位帧来完成 TDOA 时间差的计算。

R-TDOA (receiver time-difference of arrival) 由主基站周期性在定位区域内广播同步帧实现基站之间的同步^[9],通过线性插值法^[11]来计算出时间差信息,使用

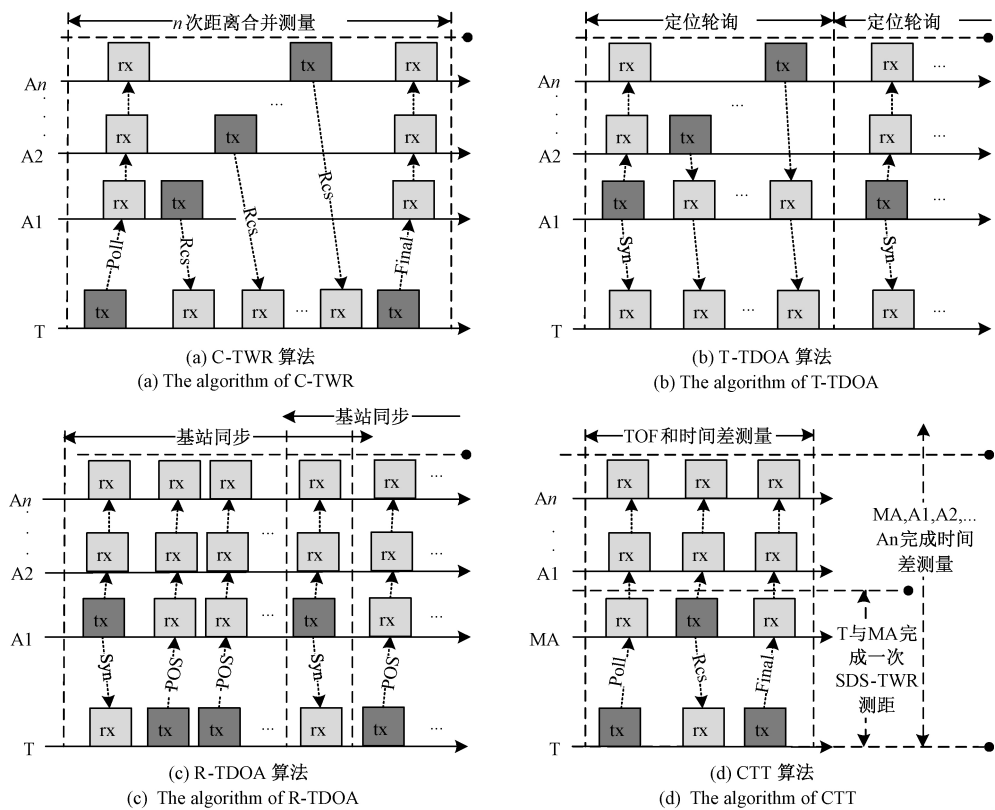


图 7 几种 UWB 定位算法的通信流程

Fig.7 The communication process of several UWB positioning solutions

TDMA 的调度算法可以充分利用系统的信道容量。

几种算法的对比参数如表 1 所示, n 表示当前参与定位的基站数目, ε 表示一次通信的时间, 考虑每次定位之间的调度代价, 实际的定位频率和容量会较低。C-TWR 通信次数随着基站增加呈线性增长, 在测距需求增加时所需要的调度代价和通信代价均会提升, 以此可以看出 TOA 算法在多用户调度和系统扩展方面存在着显著的缺陷。TDOA 的两个算法容量都很大, T-TDOA 理论容量达到无限但是解算数据位于移动标签, 且定位区域内部刷新频率随着基站的轮转周期来。R-TDOA 需要主基站周期性地发送同步帧以达到基站之间的同步, 主基站同步范围有限, 这也限制了定位系统的区域性扩展能力。

表 1 几种 UWB 定位算法对比

Table 1 Comparison of several UWB positioning schemes

名称	解算位置	通信次数	定位频率	容量
C-TWR	主基站	$n+2$	$<1/\varepsilon (n+2)$	$<1/\varepsilon (n+2)$
T-TDOA	移动标签	n	$<1/\varepsilon n$	无限
R-TDOA	主基站	$\approx 1^*$	$<1/\varepsilon$	$<1/\varepsilon$
CTT	主基站	3	$<1/3\varepsilon$	$<1/3\varepsilon$

注: * 一般情况下同步所需时间远小于用于定位的时间, 所以近似为 1

无关, 在每次定位的时候对参与定位的基站之间进行短时时钟同步来完成时间差的测量, 不需要主基站的周期性同步, 保证了系统的吞吐量和稳定性能。

4 精度测试实验

4.1 硬件说明

本实验采用 Decawave 公司的 DW1000 射频芯片^[8]作为 UWB 通信节点, 其基于 IR-UWB 通信技术, 典型带宽为 500 MHz。DW1000 支持 6 个通道, 其中心频率范围为 3.5~6.5 GHz, 调制方式采用脉冲位置调制 (PPM) 和二进制相移键控 (BPSK), 传输功率限定于 -41.3 dBm/MHz 以下, 通信速率有 110 Kbps, 850 Kbps 和 6.8 Mbps 三种。图 8 所示为通信帧的结构 (IEEE802.15.4-2011 标准)。

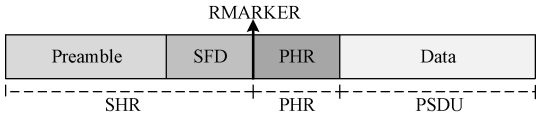


图 8 DW1000 的帧格式

Fig.8 The frame format of DW1000

CTT 算法和 R-TDOA 的定位速度均与定位基站数量

包括前导码、帧起始分界符(SFD)、物理层头(PHR)和数据区。如图 8 所示,芯片能够准确地记录 PHR 到来第一个字节的时间戳信息,这种情况记为 RMARKER 事件。另外,DW1000 还具有延迟传输机制,根据当前的时间戳设置延迟时间,之后 RF 芯片可以准确地在设定好的时间戳处发送 PHR 的第一个符号。利用这些机制可以确保 DW1000 高精度地实现 TOF 测距过程以及时间同步。

表 2 为 3 种配置情况下的 DW1000 实测数据,本次实验使用模式 1。

表 2 DW1000 的 3 种配置模式

模式	通信速度	通道	前导码	Prf	一帧时间/ μs
1	110 Kbps	4	2048	16	2 957
2	850 Kbps	4	256	16	308
3	6.8 Mbps	4	128	16	123

4.2 基站布置以及实验安排

本实验使用 3 个基站来完成二维定位。选取了视线清晰的一间房子。图 9 所示为实验布置示意图,以 cm 为单位,设置主基站的坐标为(0,0),两个从基站 A1、A2 坐标分别为(600,0)和(0,600)。在房间里面选取若干采样点。每个测量点使用 C-TWR、R-TDOA、CTT 三种算法测量 400 次,分别计算 MAE 和标准差,以此对比实际情况中各种情况的精度。

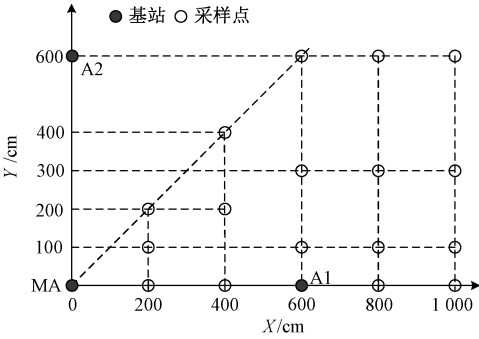


图 9 实验布置示意图

Fig.9 Experimental arrangement

4.3 实验结果

3 组测量点的数据如图 10 所示,可以看到 3 种不同的算法的测量点分布情况,阴影部分为定位区域内部。

由图 10 可以看出,在测量点(600,600)与 3 个基站围成的正方形区域之中(阴影部分),三者的定位散布均较小并且偏离也不大,都能达到较高的定位性能。但在该正方形区域外部 R-TDOA 算法就逐渐开始出现大的数据抖动和数据偏移,在测量点(1000,100)处其中心点甚至偏移到了(800,130)的地方,直接产生了 200 cm 的误差。在(200,200)、(600,600)、(800,600)、(800,100)四

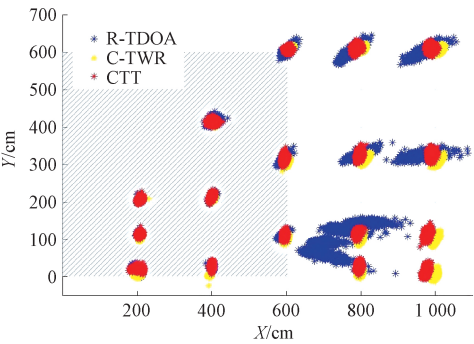


图 10 测量结果分布

Fig.10 The distribution of measurement results

个点处绘制了与之相对应的双曲线如图 11 所示,可以看出在远离基站的时候,双曲线的渐近线会趋于平行,这产生的强烈的误差放大直接导致了 R-TDOA 的数据精度的急剧下降。相比之下 C-TWR 算法在区域内外稳健,CTT 虽然在区域外部有一些较小偏移,但是数据抖动的情况和 C-TWR 大体相当。

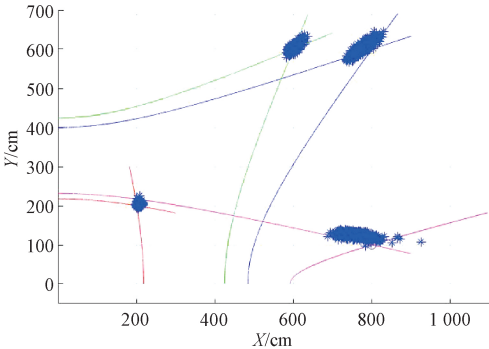


图 11 R-TDOA 下部分点的双曲线图形和分布

Fig.11 The hyperbolic graph and distribution of partial points under R-TDOA

对实验数据进行进一步分析,分别计算三种算法各个测量点到真实点距离的平均绝对误差(MAE)以及 x 值和 y 值的标准差。3 种算法的 MAE 值如图 12 所示。

MAE 值可以较好地反映测量点偏移真实点的误差情况,图 12 中小图是从(2,0)到(6,6)的 MAE 细节显示,从图中可以看出,其中 C-TWR 算法的 MAE 的平均值最小,仅为 11.46 cm,数据十分平稳;CTT 算法 MAE 的平均值为 17.48 cm,低于 C-TWR 算法,但是数据也很平稳;R-TDOA 的 MAE 的平均值为 57.3 cm,在正方形区域内部 R-TDOA 能保持一个较好的精度,但是在外部则产生了较大的定位偏移。在实验上表明 CTT 算法在精度上接近于 C-TWR,能够有效避免 R-TDOA 算法由于双曲线性质而产生的误差放大现象。

如图 13(a)所示,从 x 的标准差来看,C-TWR 算法与

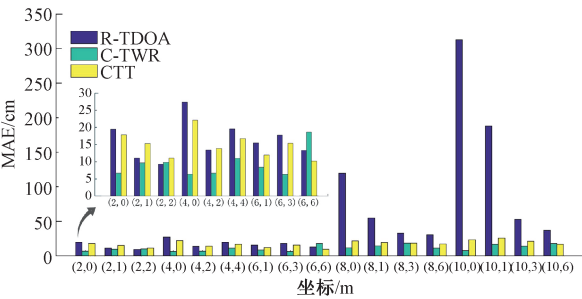


图 12 MAE 结果
Fig.12 The result graph of MAE

CTT 算法的标准差均 $<10\text{ cm}$,表现出数据稳定性高的特点,R-TDOA 从正方形内部到外部的过程中,方差逐步加大,在区域外部的方差值最多达到了 CTT 的 7 倍。如图 13(b)所示,从 y 的标准差来看,C-TWR 与 CTT 的标准差仍 $<10\text{ cm}$,R-TDOA 整体小于其在 x 轴的标准差情况,走势仍然相同,这个原因在于两个双曲线于交点的切线相交的角度问题。

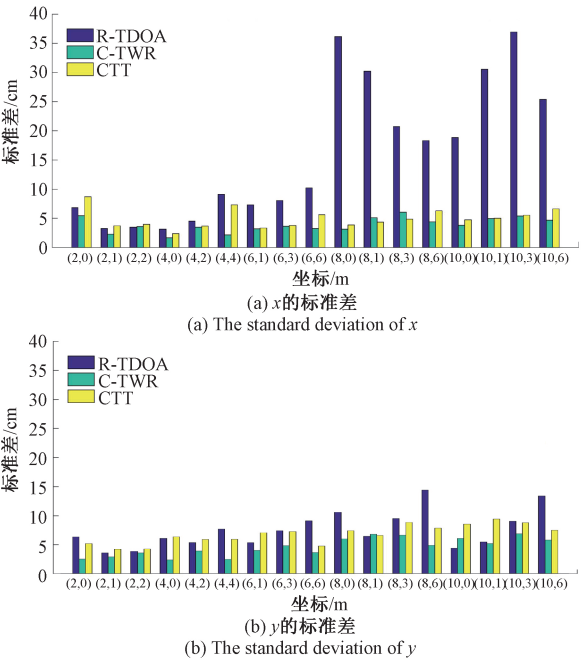


图 13 测量点的 x 和 y 值的标准差
Fig.13 The standard deviation of x and y values of the measurement point

本次实验的 3 种算法的单次定位时间以及单标签定位频率如表 3 所示。所有的定位算法均会因为调度消耗和丢帧情况而导致定位频率略低一些。由表 3 可知,CTT 在三基站情况下耗时仅为 C-TWR 算法 42.08%,并且这种优势随着参与定位的基站数目增加而进一步加大;时间性能虽然 CTT 低于 R-TDOA,但是由于两者处于

同一量级,不随基站的增加而增加。

表 3 定位时间对比

Table 3 Comparison of positioning time		
名称	定位时间/ms	定位频率/Hz
C-TWR	18.3	<40
R-TDOA	3.1	<280
CTT	9.5	<95

综合 MAE 值与标准差来看,CTT 算法可以达到 $<20\text{ cm}$ 级别的定位精度,略低于 C-TWR 算法,数据的稳定性与 C-TWR 类似。从时间性能上来看,CTT 可以达到接近 100 Hz 的定位频率,可以对较高速的物体进行定位,在时间性能上优于 C-TWR。

5 结 论

本文分析了当前主流 UWB 定位算法的时间性能和精度性能,详细分析了 TDOA 算法产生的误差,并提出了一种改进的 TOF 与 TDOA 联合定位算法 CTT。实验表明 CTT 有接近于 TOA 算法的精度和稳定性,仅三次的通信也避免了 TOA 算法定位时长随基站数目线性增长的问题,同时引入 TOF 测量抑制了 TDOA 算法由于双曲线性质导致的误差过大的问题,本文算法可以很简单地移植应用于三维定位中,无需对所有基站(包括不参与定位的基站)进行时钟同步,易于大范围扩展,具备着较强的多用户扩展性能。本文只对二维平面的定位进行了实验分析,后续将逐步完善对于三维定位以及存在冗余基站情况的性能对比和算法研究。

参考文献

[1] ALARIFI A, AL-SALMAN A M, ALSALEH M, et al. Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and Recent Advances [J]. Sensors, 2016, 16(5): 1-36.

[2] YASSIN A, NASSER Y, AWAD M, et al. Recent advances in indoor localization: A survey on theoretical approaches and applications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 19(2): 1327-1346.

[3] DARDARI D, CLOSAS P, DJURIC P M. Indoor tracking: Theory, methods, and technologies [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(4): 1263-1278.

[4] 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 Instrument, 2016, 30(11): 1743-1749.

[5] 方文浩,陆阳,卫星.基于区域判定的超宽带井下高

- 精度定位 [J]. 计算机应用, 2018, 38(7): 1989-1994.
- FANG W H, LU Y, WEI X. UWB high-precision localization in underground coal mine based on region determination [J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(7): 1989-1994.
- [6] KARAPISTOLI E, STRATOIANNIS D G, TSIROPOULOS G I, et al. MAC protocols for ultra-wideband ad hoc and sensor networking: A survey [C]. IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems, IEEE, 2012: 834-841.
- [7] MACOIR N, RIDOLFI M, ROSSEY J, et al. MAC protocol for supporting multiple roaming users in multi-cell UWB localization networks [C]. International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks", IEEE, 2018: 588-599.
- [8] CHOI B, LA K, LEE S. UWB TDOA/TOA measurement system with wireless time synchronization and simultaneous tag and anchor positioning [C]. IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications, IEEE, 2018: 1-6.
- [9] TIEMANN J, WIETFELD C. Scalability, Real-time capabilities and energy efficiency in ultra-wideband localization [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(12): 6313-6321.
- [10] 徐元, 陈熙源. 面向室内行人的 Range-only UWB/INS 紧组合导航方法 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2115-2121.
- XU Y, CHEN X Y. Range-only UWB /INS tightly-coupled integrated navigation method for indoor pedestrian [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 2115-2121.
- [11] RIDOLFI M, VAN DE VELDE S, STEENDAM H, et al. WiFi ad-hoc mesh network and MAC protocol solution for UWB indoor localization systems [C]. Symposium on Communications and Vehicular Technologies, IEEE, 2016: 1-6.
- [12] MAZRAANI R, SAEZ M, GOVONI L, et al. Experimental results of a combined TDOA/TOF technique for UWB based localization systems [C]. IEEE International Conference on Communications Workshops, IEEE, 2017: 1043-1048.
- [13] WEI Z, CHEN X, FANG L, et al. Joint positioning technique based on TOF and TDOA [C]. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE, 2018: 1-6.
- [14] 仲江涛. 基于 UWB 室内定位算法的研究与实现 [D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- ZHONG J T. Research and implementation based on UWB indoor positioning algorithm [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.
- [15] MCELROY C, NEIRYNCK D, MCLAUGHLIN M. Comparison of wireless clock synchronization algorithms for indoor location systems [C]. IEEE International Conference on Communications Workshops, IEEE, 2014: 157-162.
- [16] KAUNE R. Accuracy studies for TDOA and TOA localization [C]. International Conference on Information Fusion, IEEE, 2012: 408-415.

作者简介



高健, 2017 年于安徽大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为高精度定位系统。

E-mail: hfgjyn@163.com

Gao Jian received his B.Sc. degree from Anhui University in 2017. Now he is a M.Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interest includes high precision positioning system.



陆阳(通信作者), 2002 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网工程、分布式控制系统。

E-mail: luyang.hf@126.com

Lu Yang (Corresponding author) received Ph.D. from Hefei University of Technology in 2002. Now he is a professor and Ph.D. supervisor at Hefei University of Technology. His main research interests include internet of things engineering and distributed control system.



李庆巧, 2018 年于阜阳师范大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为高精度定位系统。

E-mail: 2858692250@qq.com

Li Qingqiao received his B.Sc. degree from Fuyang Normal University in 2018. Now she is a M.Sc. candidate at Hefei University of Technology. Her main research interest includes high precision positioning system.



卫星, 2009 年于中国科技大学获得博士学位, 现为合肥工业大学副教授, 主要研究方向为物联网工程、离散事件动态系统。

E-mail: weixing72510@163.com

Wei Xing received Ph.D. from University of Science and Technology of China in 2009. Now he is an associate professor at Hefei University of Technology. His main research interests include internet of things engineering and discrete event dynamic system.