

# UWB 无线定位技术比较

杜谦

武汉理工大学信息工程学院, 湖北武汉 (430070)

E-mail: [duqiann@163.com](mailto:duqiann@163.com)

**摘要:** UWB (超宽带) 定位技术具有功耗低、抗多径效果好、抗干扰能力强、安全性高、穿透能力强、定位精度高等众多特点, 正逐渐成为未来无线定位技术中极具潜力的技术, 具有十分广阔的应用前景。文中对无线定位的原理进行了探讨, 对常见的无线定位技术进行了归类, 对影响定位精度的主要因素进行了分析研究, 对 UWB 系统中的各种定位准确性技术评价指标进行了分析对比, 重点就 UWB 最常用的 TOA, TDOA 定位技术、定位算法及其性能评价指标进行了对比分析。

**关键词:** UWB; 无线定位; TOA/TDOA; 比较分析

**中图分类号:** TN929.5

## 1. 引言

无线定位技术在航空航天、移动通信网络、智能交通、地质勘探、战场定位等领域有着广泛的应用。

UWB (超宽带) 定位技术具有功耗低、抗多径效果好、抗干扰能力强、安全性高、穿透能力强、定位精度高等特点, 正逐渐成为未来无线定位技术的热点, 具有十分广阔的应用前景。

目前关于无线定位技术及方法有很多种, 研究主要集中在三个方面: 定位精度、定位的稳定性、定位技术的可实现性。这些研究成果各有其侧重点, 很多定位方法是在某一个方面的改进。本文就无线定位技术、定位算法及其性能评价进行归类, 重点就 UWB 常用的 TOA, TDOA 定位技术、定位算法及其性能评价指标进行了对比分析。

## 2. UWB 无线定位技术比较

### 2.1 常见无线定位技术

依照定位采用的信号的不同, 无线定位技术可分为: 红外线、超声波、射频信号。红外线适合短距离传播, 其穿透性差, 容易被室内的灯光干扰, 定位精度不高; 超声波受多径效应和非视距传播影响较大, 不适合用于室内环境; 射频信号普遍用于室外定位系统中, 应用于室内定位存在局限性。

依照现有的无线定位采用的系统及方案的不同, 无线定位系统的种类可分为: 卫星定位系统 (GPS 全球卫星定位系统、GLONASS 格洛纳斯卫星定位系统、Galileo 伽利略卫星定位系统、北斗卫星定位系统); 地面无线电定位系统 (蜂窝网无线定位系统、Wi-Fi 定位解决方案、蓝牙定位解决方案、UWB 定位解决方案等)。

依照进行定位估计位置的主体的不同, 可将定位方案分为<sup>[1]</sup>: 基于移动台的定位、基于网络的定位和混合定位。基于移动台的定位过程是移动台 (MS, Mobile Station) 利用接收到的多个已知位置的基站 (BS, Base Station) 发射信号携带的与移动台位置有关的特征信息, 再由 MS 根据有关定位算法定出 MS 的估计位置。基于网络的定位过程是由多个固定位置 BS 同时检测 MS 发射的信号, 网络根据有关的特征信息进行定位, 并将结果送 MS。

## 2.2 无线定位的基本原理

依照所检测的特征测量值的不同,可以将基本的定位方法分成四种:基于场强测量的定位方法、基于传播时间测量的定位方法、基于信号到达角度的定位方法以及混合定位方法<sup>[2]</sup>。

1) 基于场强测量的定位方法(RSSI, Received Signal Strength Indicator)是利用接收信号强度与MS至BS距离成反比的关系,通过测出接收信号的场强值、已知的信道衰落模型及发射信号的场强值估算出MS与BS之间的距离,根据多个距离值即能估计出MS的位置,如图1所示。

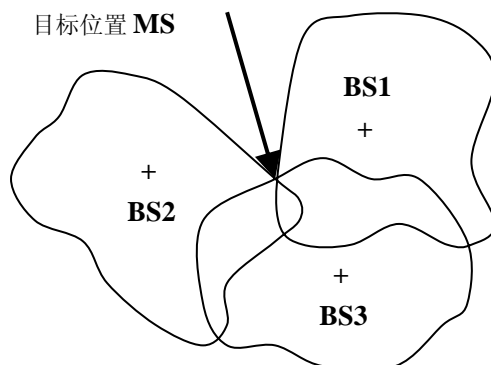


图1 基于场强测量的定位方法示意图

2) 基于传播时间测量的定位方法通过测出电波从发射机到接收机的传播时间,就可以知道它们之间的距离。从而,可以通过某种方法算出未知点的估计位置。基于信号传播时间的定位方法又可以分为基于信号到达时间(TOA, Time of Arrive)和信号到达时间差(TDOA, Time Difference of Arrive)两种定位方法。

### (1) 基于信号到达时间的定位法(TOA)

TOA 定位原理: 信号在空间是以光速  $c$  传播, 测量 MS 与两个 (或多个) BS 间的信号的传输时延, 从而分别得出 MS 与 BS 之间的估计距离, 以各 BS 位置为圆心, 以 MS 与该 BS 的距离为半径画圆, 可得到两个 (或多个) 圆, 这些圆的交点理论上就是 MS 的位置, 如图2所示。

TOA 要求 BS 在时间上精确同步, 否则将影响定位精度。在实际中由于多径干扰、噪声干扰, 上述圆并不相交于一点, 而是一个区域。故 TOA 定位技术在实际应用中受限。

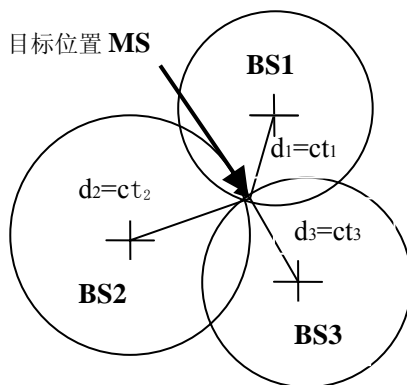


图2 基于信号到达时间的定位方法示意图

## (2) 基于信号到达时间差的定位法(TDOA)

TDOA 定位原理：通过找出由一系列距离差决定的多个双曲线的交点来确定 MS 的位置，如图 3 所示。距离差是指信号从 MS 到两个 BS 的 TOA 差与信号传播速度的乘积。假使 MS 信号与在第  $i$  个 BS 和第  $j$  个 BS 的 TOA 分别为  $\tau_i$  和  $\tau_j$ ，则它们的距离差为： $R_{ij}=R_i-R_j=c\tau_{ij}=c(\tau_i-\tau_j)$

式中， $c$  为信号传播速度， $\tau_{ij}$  为信号到达第  $i$  个 BS 和第  $j$  个 BS 的 TDOA。

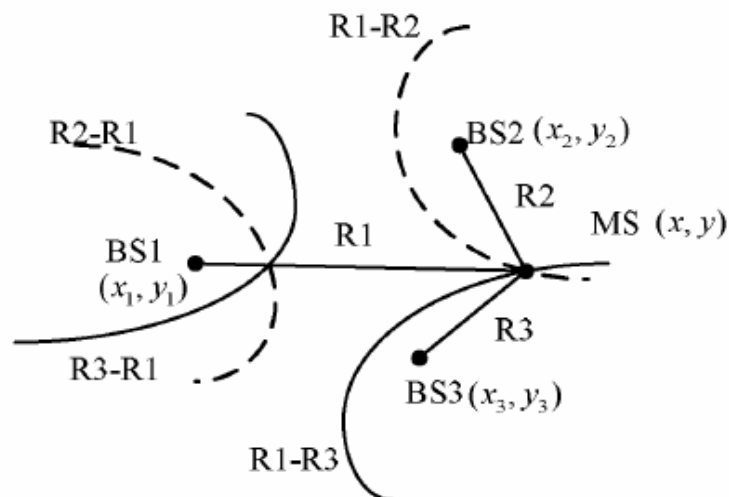


图 3 基于信号到达时间差的定位方法示意图

TDOA 定位有两种常用方式，一种是直接检测两个精确的 TOA 值计算 TDOA，再利用双曲线方法定位，这样做主要可以减少 TOA 检测时的系统误差。第二种 TDOA 检测直接对接收到两个信号进行信号处理，计算信号之间的时间差。经典的 TDOA 检测算法是直接或间接利用信号互相关函数检测方法，如广义互相关函数和基于高阶累积量算法。广义互相关法 (GCC)，即将信号建模为一般平稳信号。基于信号的平稳性作相关估计，又有循环平稳互相关 (CCC)，根据估计表达式的形式，又可以细分为谱相关比法 (SPEC CORR)、谱相关校正法 (SPEC COA) 等。

3) 基于信号到达角度(AOA, Angle of Arrive)的定位方法主要是在 BS 通过已知点接收机天线阵列测出移动台发射电波的入射角，构成一条从 BS 到 MS 的径向连线，即方位线。利用多个 BS 提供的 AOA 测量值，可以画出多个方位线，其交点就是移动台的估计位置。如图 4 所示。

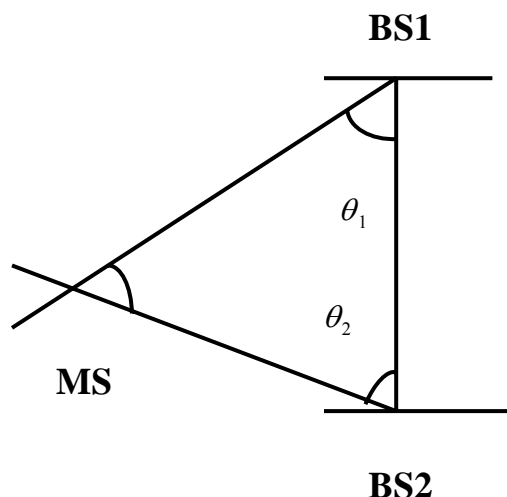


图4 基于信号到达角度的定位方法示意图

4) 混合定位方法就是利用上述两种或多种定位方法的某种组合进行定位。如 TDOA/TOA、TDOA/AOA、TOA/AOA、TOA/RSSI 等。

通过上述定位方法的分析比较可以发现：RSSI 定位法较为简单，但由于多径衰落和阴影效应的影响较大，使其定位精度较差，因此，该方法没有得到广泛的重视和应用；AOA 定位法定位精度较高，但系统设备复杂，成本较高。AOA 的方法不适用于 UWB 定位，UWB 信号具有非常宽的带宽，这使得其多径效应明显；TOA 定位法精度高，但对时间同步有较高要求；TOA 需要严格的 MS 与 BS 时钟同步，而 TDOA 只需 BS 间的时钟同步即可，故 TDOA 更常用；混合定位法具有不同的特点及不同的软硬件要求，从而达到不同的定位精度。

如果按是否使用测量值的历史时间信息，定位方法可以分为静态定位方法和跟踪定位方法。静态定位是使用当前时刻的测量值对该时刻的 MS 位置进行估计，而跟踪方法还可以利用前面时刻的测量值。利用更多的信息进行定位，不仅有利于提高定位精度，也有利于减少参与定位的 BS 数目；另外，跟踪方法还可以平滑跟踪曲线、估计 MS 运动速度。目前的定位方法大多数都是静态定位，如 Chan、Fang、泰勒级数展开等。由于卡尔曼滤波器（KF，Kalman Filter）在跟踪目标方面的卓越性能，跟踪的方法主要是由卡尔曼滤波器来实现。

## 2.3 影响定位精度的主要因素

影响定位精度的主要因素有多径传播、非视距传播和多址接入等<sup>[3]</sup>。

### 1) 多径传播

多径传播是引起各种信号测量值出现误差的主要原因之一。尤其在基于场强定位和基于信号到达角度定位中，多径传播是造成定位误差的首要原因。对 TDOA 和 TOA 定位方法来说，即使在 MS 和 BS 之间存在视距（LOS）传播，多径传播也会引起时间测量误差。目前已经提出了许多种抑制多径的方法，例如 MUSIC、ESPRIT、卡尔曼滤波器、边缘检测等技术。

### 2) 非视距传播（NLOS）

视距(LOS)传播是得到准确的信号特征测量值的必要条件，当两个点之间不存在直接传播路径时，只有信号的反射和衍射成分能够到达接收端，此时第一个到达的脉冲的时间不能代表 TOA 的真实值，信号到达角度也不能代表 AOA 的真实值，存在非视距误差。在没有

任何非视距误差信息的条件下, 正确估计目标的位置是不可能的。

目前消除非视距传播引起的 TOA 误差通常有以下几种方法: 一种是通过 TOA 测量值的标准差对 LOS/NLOS 传播环境进行判断, NLOS 传播的测距标准差比 LOS 传播高得多, 利用测距误差统计的先验信息就可以将一段时间内的 NLOS 测量值调节到接近 LOS 的测量值; 另一种方法是降低非线性最小二乘算法中 NLOS 测量值的权重, 这种方法需首先判断哪些 BS 得到的是 NLOS 测量值。

在 UWB 系统中, 一般采用的是前一种消除非视距传播影响的方法, 首先采用卡尔曼滤波器对 TOA 测量值进行处理, 然后通过 TOA 测量值的标准差对 LOS/NLOS 传播环境进行判断, 最后采用有偏卡尔曼滤波器消除非视距传播带来的影响。

### 3) 多址干扰

在多用户环境下, 其他用户的信号会干扰目标信号, 从而降低了估计的准确性。减小这种干扰的一种方法就是把来自不同用户的信号从时间上分开。

UWB 定位系统主要应用于室内环境, UWB 室内通信的信道特性和窄带室内无线信道相似, 复合路径和 NLOS 是 UWB 定位面临的主要挑战。对于基于角度定位的方法来讲, UWB 系统天线接收信号的角度存在大角度扩展, 针对这种情况可以采用接收信号的中心角度来代替接收信号的角度值。

## 2.4 定位准确性的评价指标

通用的估计精度评价指标有定位解的均方误差 (MSE, Mean Square Error)、均方根误差 (RMSE, Root Mean Square Error) 和误差的累计分布函数 (CDF, Cumulative Distribution Function) 等, 针对定位技术领域对定位结果的评价, 还有有特殊的评价指标: 克拉美罗下界 (CRLB, Cramer-Rao Lower Bound)、圆/球误差概率 (CEP/SEP, Circular Error Probability / Spheric Error Probability)、几何精度因子 (GDOP, Geometric Dilution of Precision)、相对定位误差 (RPE, Relative Position Error)。

1) 在二维定位估计中 MSE 定义如下:

$$\text{MSE} = E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2]$$

其中 (x, y) 为 MS 的实际位置,  $(\hat{x}, \hat{y})$  为 MS 的估计位置。

2) RMSE 定义如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2]}$$

3) CDF 指定位误差小于某个值时的概率, 即某个精度门限下定位次数在总定位次数中所占的比例。在 CDF 图中, 横轴表示定位精度, 纵轴表示小于某个定位误差的估计次数占所有统计次数的百分比。通过该曲线, 可以知道某个比例的统计次数所能够达到的定位精度。

4) CRLB 是无偏参数估计方差的下界。通常, 用 MSE 或 RMSE 对理论 CRLB 的逼近程度来判定定位估计的精度。

基于 RSS 方法的估计距离  $\hat{d}$  的 CRLB 可据下式:  $\sqrt{\text{Vard}(\hat{d})} \geq \frac{\ln 10}{10} \frac{\sigma_{sh}}{n_p} d$ , 其中 d

是两个结点之间的距离,  $n_p$  是路径损耗因数,  $\sigma_{sh}$  是零均值高斯随机变量的标准方差。

对于一个单径高斯白噪声 (AWGN, Additive White Gaussian Noise) 信道来说, 由 TOA 估



计推导得来的距离的估计值  $\hat{d}$  的可靠性可由下式:  $\sqrt{\text{Vard}(\hat{d})} \geq \frac{c}{2\sqrt{2\pi}\sqrt{\text{SNR}}\beta}$ , 其中  $c$

是光速, SNR 是信噪比,  $\beta$  是有效的信号带宽。对于带宽为 1.5GHz 的 UWB 信号, 当 SNR=0dB 时, 定位精度小于 2.25cm。对任意 UWB 信号 (500MHz—7.5GHz) 都能达到厘米级的定位精度。

5) CEP/SEP 是定位估计器相对其定位均值的不确定性度量。对于二维系统, CEP 定义为包含了一半以均值为中心的随机矢量的圆半径。对三维系统, CEP 用 SEP 代替, 即用球半径来代替圆半径。

6) GDOP 定义为定位误差 RMSE 与测距误差 RMSE 的比值, 表征了 MS 与 BS 的几何位置关系对测距误差的放大程度。GDOP 越大, 则 BS 与 MS 之间的几何位置关系对定位精度的影响越大。

7) RPE 定义为定位精度与定位范围最大圆半径之比, 即把定位精度与定位范围联系起来考虑。

## 2.5 UWB 定位技术 (基于信号到达时间 TOA, TDOA)

计算 UWB 系统的 MS 坐标的典型方法是根据 TOA、TDOA 等传输时间参数, 利用几何关系来计算圆或双曲线的交叉点, 从而确定位置坐标。TDOA 定位有两种常用方式, 一种是直接检测两个精确的 TOA 值计算 TDOA, 再利用双曲线方法定位, 这样做主要可以减少 TOA 检测时的系统误差。球形定位以及双曲线定位技术都需要无错测距信息才能应用。但是多径传播、NLOS 等因素都会引起测距过程中的误差。第二种 TDOA 检测直接对接收到两个信号进行信号处理, 计算信号之间的时间差。

在 UWB 系统的无线定位中, 准确地估计传输时延是采用 TOA 技术进行精确定位的关键, 时延估计精度直接影响定位误差的大小。传统的 TOA 估计方法有:

(1) 匹配滤波器法 (MF, Matched Filter), 该算法是利用理想的本地模板波形对接收信号进行滑动相关, 相关后的最大值对应的时间为所求的 TOA。但是由于最大值对应的是最强径, 而最强径可能不是首径, 所以匹配滤波器算法限制了 TOA 的估计精度, 而且速度较慢。

(2) MEP (Multiscale Energy Products) 法, 该算法是一种使信号通过一组多尺度能量累积滤波器, 从而进行边缘检测的 TOA 估计算法。该算法不需要较高的采样率, 速度较快, 但是精度不高。

(3) 主成份分析 (Principal Component Analysis, PCA) 的 TOA 估计算法, 该算法基于接收信号相关矩阵的谱分解, 不需要对信道响应进行估计, 也不需要训练序列, 但复杂度高, 计算量大, 不便于实时实现。

(4) 基于卡尔曼滤波的 TOA 估计算法, 该算法利用 Kalman 预测器的预测功能预测下一时刻的 TOA, 然后以预测值为中心对接收信号进行加窗处理, 对窗口内的接收信号进行主成份分析。这样, 原来需要对一帧长的接收信号进行 TOA 估计, 现在变为只需对窗口内的接收信号进行估计, 估计范围得以大大减小, 计算量和运算时间大幅下降。

卡尔曼滤波是以最小均方误差为准则的最佳线性估计或滤波。它用线性递推的方法, 对多个测量数据和多个参数进行处理, 给出无偏最小均方差估计。在每次递推运算时, 无须考虑多个过去的输入信号, 只考虑前一个输入信号就行了, 即认为信号现在的状态只依赖于前

一个,而不依赖前所有信号的状态。这样就不需要将过去的测量值都存起来备用,便于用计算机对信号的实时处理。其原理是通过  $k$  时刻就可给出  $k+1$  时刻的预测值,并保证该预测值的均方误差最小。

定位算法分为非迭代算法和迭代算法<sup>[4]</sup>。非迭代定位算法比较有代表性的有直接方法,定位问题的最小二乘法等。迭代算法比较有代表性的有泰勒序列展开法。泰勒序列展开法不仅具有精度高、鲁棒性强等特点,而且是求解非线性方程的有效方法,但是该算法对初始值的依赖性较大,它需要提供比较准确的初始值才能够保证比较快的收敛速度。为了避免收敛的问题,后续又提出了很多不同的方法,例如球形插值和双精度极大似然方法。这些双曲线定位的方法都有一个共同的缺点,就是存在多组解(泰勒级数展开法除外),而且要求已知 TOA 估计误差的方差和分布(直接路径的 OTA 除外)。另外一种定位方法采用的是非线性优化理论。如:高斯-牛顿法,Levenberg-Marquardt 法,quasi-Newton 法包括 DFP 公式和 BFGS 公式都可以用于迭代定位。

基于非线性优化理论的方法不需要已知 TOA 估算误差的分布和方差,也不需要目标的初始位置作出准确地估计,很适合在众多实际应用场合使用。

### 3. 结语

基于 UWB 的无线定位技术具有广阔的应用前景。本文就基于 UWB 常用的 TOA, TDOA 定位技术、定位算法及其性能评价进行了对比分析。在测试方法及其测试结果的可比性方面,在促进 UWB 定位技术的实用化方面,还有很多工作要做。选择优化的 UWB 的定位技术应用于各类不同的应用环境,是今后 UWB 定位技术的工作目标。

### 参考文献

- [1] [意]Maria-Gabriella Di Benedetto Giancola 著,葛利嘉等译.超宽带无线电基础[M].北京:电子工业出版社,2005
- [2] 田静.“超宽带系统中定位技术的研究”.吉林大学硕士学位论文[D].2007.6:23-25
- [3] 唐春玲.“UWB 定位系统研究”.西南大学硕士学位论文[D].2008.5:25-26
- [4] 王磊,张洪顺,柏熙.超宽带定位技术及应用.通信对抗[J].2007,98(03):34-35
- [5] MARTIN R F. UWB rules and design compliance issues [A]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility [C]. Boston,USA,2003.

## Comparison of UWB Wireless Location Technology

Du Qian

School of Information Engineering, Wuhan University of Technology (430070)

### Abstract

UMB location technology has many good characters. Such as low power consumption, anti-multipath, anti-disturbance, high standard of security, penetrating ability, high accuracy. UMB technology has become a potential technology in the future wireless location technology, which has a spectacular prospect for utilizing. This paper classified the quotidian wireless location technologies. A comparison between some location technologies in UWB system is made. Also this paper focuses on the comparison of TOA, TDOA location technology and algorithm in terms of their properties.

**Keywords:** UWB; wireless location; TOA/TDOA; analyze and comparison

**作者简介:** 杜谦, 男, 1962 年生, 副教授, 主要研究方向是计算机网络、多媒体技术。