



基于UWB的天线阵列单基站定位方法研究

李娟^{1,2} 崔学荣¹ 吴春雷^{1,2}

(1. 中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院 青岛 266555;
2. 中国海洋大学信息科学与工程学院 青岛 266100)

摘要: Ultra-wideband (UWB) 技术由于具有功耗低、抗多径效果好、安全性高、系统复杂度低、能提供精确定位精度等优点, 所以被认为是最适合进行室内无线定位的技术。为了解决现有的多参考基站定位机制的局限与不足, 提出了一种基于脉冲幅度比值的 UWB 天线阵列单参考基站的高精度 UWB 定位方法, 来克服多参考基站系统在安装部署、时间同步等方面不足; 在 IEEE802.15.4a 的 CM1 信道中与传统的四基站 TDOA 定位方法进行了仿真对比发现在大部分情况下并未明显降低定位精度。但是该方法可以降低对系统时钟精度的要求, 降低系统成本及复杂度, 降低安装与部署的难度, 因此具有较大的应用前景。

关键词: 超宽带; 定位; 单基站; 到达角度; 天线阵列

中图分类号: TN914 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1020

Study on the UWB location method based-on the mono-station antenna array

Li Juan¹ Cui Xuerong¹ Wu Chunlei^{1,2}

(1. Department of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266555, China;
2. Department of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Ultra-wideband (UWB) technology is considered to be the most suitable for indoor wireless location because of the characters such as low power consumption, resistance to multipath effects, high safety, low complexity, precise positioning accuracy, etc. In order to solve the limitations and shortcomings of the existing multi-reference base station positioning mechanism a high-precision UWB positioning method based-on the pulse amplitude of mono-station antenna array is proposed to overcome the shortcomings of multiple reference base stations such as the difficulties of system installation and deployment and lack of time synchronization; In the CM1 channel of IEEE802.15.4a, the provided method is compared to the traditional four base-stations TDOA location method, and the conclusion is made that in most cases the mono-station method does not reduce the positioning accuracy significantly. However, this method can reduce the requirements on system clock accuracy, reduce system cost and complexity and reduce the difficulty of installation and deployment.

Keywords: UWB; location; Mono-Station; AOA; antenna array

1 引言

随着无线通信技术的发展, 21世纪的世界将很快从网络时代进入无线互联时代。超宽带 (ultra-wideband, UWB) 技术由于功耗低、抗多径效果好、安全性高、系统复杂度低、能提供精确定位精度等优点, 在众多无线定位技术中脱颖而出, 成为 IEEE 第一个无线定位的物理层标准^[1]。

目前, UWB 定位技术的理论研究与应用开发在美国与欧洲均受到广泛的关注。在美国, 已经有了广泛的军事

应用, 而民用市场也正在发展之中。目前一个典型的 UWB 定位系统需要用 4 个以上参考基站来确定一个 UWB 标签的三维位置。为提高定位精度, 所有基站使用时钟电缆互联以保持精确的纳秒级别的时间同步。定位参考基站接收定位标签所发送的 UWB 脉冲, 测量脉冲到达的时间 (time of arrival, TOA)^[2-3] 或不同基站之间的到达时间差 (time difference of arrival, TDOA)^[4] 或到达角度 (angle of arrival, AOA)^[5] 及到达信号强度 (received signal strength, RSS) 等, 则可以确定定位标签到各个参考基站的距离或角

度^[6-7],从而可以通过标签与参考基站之间的位置关系,即确定定位标签的三维位置^[8]。

在文献[9]中,作者提出了一种360°的覆盖范围的6个阵列单元组成的天线阵列。每个阵列单元的峰值振幅模式波束宽度为69°,增益3.5~6.0 dBi,在2.9~6.0 GHz下驻波比<2,但是如何实现基于单基站的UWB的精确定位,却没有给出详细的实现方法。

在传统的多基站^[10]定位系统中存在2个主要的问题:

1)高精度的时钟同步要求:如果采用TOA定位,则要求参考基站之间以及参考基站与目标节点之间精确的时钟同步;如果是采用TDOA定位则要求参考基站之间精确的时钟同步。

2)由于多个基站之间需要精确的时钟同步,所以目前采用的主要方法是通过有线连接多个不同的参考基站,因此给系统安装部署带来很大困难。

为解决这个问题提出了一种基于天线阵列的单参考基站的高精度UWB定位算法,来克服多参考基站系统在安装部署、时间同步等方面的不足。从而可以降低对系统时钟精度的要求,降低成本及系统复杂度,降低安装与部署的难度。

2 基于天线阵列的单基站定位原理

2.1 单基站定位基本原理

基于天线阵列的单基站超宽带无线定位算法是通过TOA和AOA联合定位技术弥补2种技术的缺点实现单基站、精确定位。系统由天线阵列、射频交换器、射频模块、基带模块及CPU组成,系统架构如图1所示。该方法使用带天线阵列的单个参考基站同时测量目标节点与参考基站之间的距离和目标节点所发射脉冲到达参考基站的到达角度,从而获得标签的三维位置。

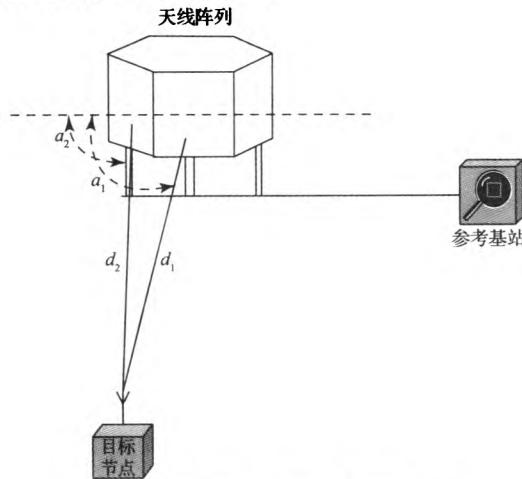


图1 基于天线阵列的单基站超宽带无线定位方法示意

其中参考基站与目标节点之间的距离测量与传统的系统一样,可以采用传统的方法。例如:通过测量脉冲从参考

基站到目标节点、再从目标节点反射回参考基站、减去参考基站与目标节点内部电路处理时间所用的总时长,从而确定标签与基站之间的距离。

2.2 AOA测量的基本原理

为了解决该问题,提出了采用脉冲幅度的测量来取代脉冲到达时间的测量,从而实现了高精度AOA的测量。如图1所示,系统工作时依次使UWB信号通过各个天线接收通道进入系统;UWB信号被天线接收后,通过6-1交換机进行放大、滤波、AD量化后送到主处理器进行处理;处理器主要完成信号的检测、方向估算和开关控制等功能;通过比较当前各个天线信号幅度中最大的2个天线的信号幅度,进而得到AOA。

为了说明通过信号幅度测量AOA的基本原理,假设天线阵列采用6单元圆形阵列,即由6面定向天线组成的天线阵列覆盖360°空间,天线阵列通过6到1的射频交換相连至参考基站,各天线幅度特性完全一致。实际使用中也可以采用四天线、八天线或十天线系统。6面定向天线阵列理想方向图如图2所示。

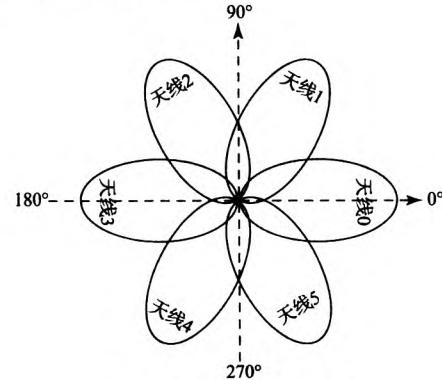


图2 天线阵列理想方向

假设按照图2所示的角度,即X轴正方向为0°,逆时针旋转为正方向,第0、1、2、3、4、5号天线波束的轴线角分别为0、60°、2×60°、3×60°、4×60°、5×60°。假设每个天线具有一致的幅度特性,其方向图对应的函数为F(θ),因此第n个天线对应的方向图为F(θn×60),各天线归一化增益示意图如图3所示。

通过图2和图3,可以看出在每个30°的区间内,均有2个相邻天线的接收信号最强,如表1所示,根据这2个最强的天线即可得到到达角度。

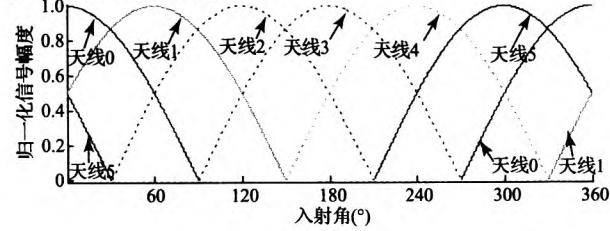


图3 天线的归一化增益示意

表1 各角度区间内信号最强的2个天线

区间(°)	接收信号最强的2个天线
0~30	天线0信号最强,其次是天线1
30~60	天线1信号最强,其次是天线0
60~90	天线1信号最强,其次是天线2
90~120	天线2信号最强,其次是天线1
120~150	天线2信号最强,其次是天线3
150~180	天线3信号最强,其次是天线2
180~210	天线3信号最强,其次是天线4
210~240	天线4信号最强,其次是天线3
240~270	天线4信号最强,其次是天线5
270~300	天线5信号最强,其次是天线4
300~330	天线5信号最强,其次是天线0
330~360	天线0信号最强,其次是天线5

3 基于脉冲幅度比值的AOA估计

为了分析方便,以高斯型的方向图为例进行分析,假设UWB信号入射方向角为 θ ,此时第n个天线方向图可表示为式(1)。

$$F_n(\theta) = e^{-k(\theta-\theta_0)^2} \quad (0 \leq n \leq 5), \quad (1)$$

式中: θ_0 为天线波束的轴线间距,例如6单元圆形阵列中 θ_0 为60°,即 $\pi/3$;k是与半功率波束宽度(antenna beam width,即相对最大辐射方向场强下降到 $1/\sqrt{2}$ 倍处的夹角,也称为3 dB波束宽度)有关的一个常量。

设半功率波束宽度为 α ,则根据第0个天线即可计算得到k:

$$F_0\left(\frac{\alpha}{2}\right) = e^{-k(\alpha/2)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

例如,某天线的半功率波束宽度为90°,即 $\alpha=\pi/2$ 则:

$$e^{-k(\pi/4)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

所以:

$$k = -\frac{16 \ln(1/\sqrt{2})}{\pi^2} = -0.5618 \quad (4)$$

为了推导接收信号幅度与入射角度的关系,假设接收信号幅度最大的天线序号为n号,次强的天线序号为(n-1)号。假设天线阵列距离目标节点的距离足够远,此时UWB信号到达2个天线处的幅度是近似相同的,

假设为A,则n号天线和(n-1)号天线接收到的信号幅度分别为:

$$F_n(\theta) = Ae^{-k(\theta-\theta_0)^2} \quad (5)$$

$$F_{n-1}(\theta) = Ae^{-k(\theta-(n-1)\theta_0)^2} \quad (6)$$

设信号幅度比值R为式(7):

$$R = \frac{F_n(\theta) - F_{n-1}(\theta)}{F_{n-1}(\theta)} \quad (7)$$

将式(5)和式(6)代入式(7)得:

$$R = \frac{Ae^{-k(\theta-\theta_0)^2} - Ae^{-k(\theta-(n-1)\theta_0)^2}}{Ae^{-k(\theta-(n-1)\theta_0)^2}} \quad (8)$$

即:

$$R + 1 = \frac{e^{-k(\theta-\theta_0)^2}}{e^{-k(\theta-(n-1)\theta_0)^2}} \quad (9)$$

将式(9)两边取对数得:

$$\begin{aligned} \lg(R+1) &= \lg\left(\frac{e^{-k(\theta-\theta_0)^2}}{e^{-k(\theta-(n-1)\theta_0)^2}}\right) = \\ &-k(\theta-\theta_0)^2 - (-k(\theta-(n-1)\theta_0)^2) = \\ &k\theta_0^2 - 2nk\theta_0^2 + 2k\theta_0^2 \end{aligned} \quad (10)$$

所以由式(10)可以得到:

$$\theta = \frac{\lg(R+1)}{2k\theta_0} - \frac{\theta_0}{2} + n\theta_0 \quad (11)$$

4 仿真验证

为了比较定位精度,在仿真时计算出各种定位算法的均方根误差(RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum ((x - \hat{x}_i)^2 + (y - \hat{y}_i)^2 + (z - \hat{z}_i)^2)} \quad (12)$$

式中:(x,y,z)和(\hat{x},\hat{y},\hat{z})分别是第*i*($i=1,\dots,N$)次仿真的真实位置和估计位置的坐标。仿真时参数设置如下:

1) 4个参考基站的坐标分别设置为:(0,0,0),(L,0,0),(0,L,0),(0,0,L),其中L为3D区间的边长;

2) 目标节点的真实位置为(L/2,L/2,L/2),其中L为3D区间的边长;

3) N=1 000,即每种算法,每个边长L都进行了1 000次仿真。

在IEEE802.15.4a的CM1信道中与传统的4基站的TDOA定位结果对比,如图4所示。

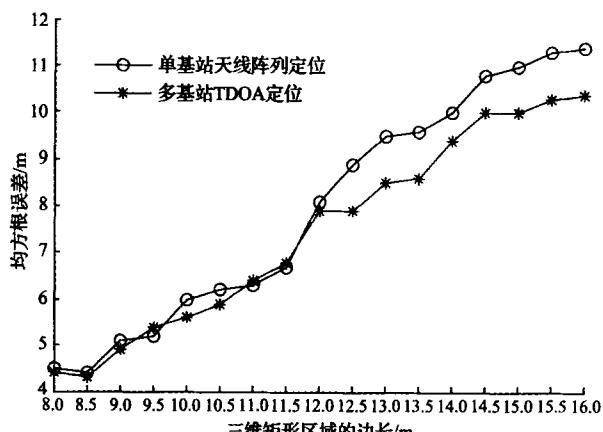


图4 2种定位方法在CM1信道下定位RMSE的对比

对比发现在距离较短时,2种定位方法精度几乎相同;仅在距离较大时,基于脉冲幅度的单基站天线阵列定位方法的精度才略低于基于多基站的TDOA定位。但是单基站在安装部署方面的方便性和复杂性均要明显优于其他的多基站定位方法。

5 结 论

通过以上方法,使用脉冲幅度的测量替代了以往脉冲到达微量时间差的测量,可以避免因使用微量时间差的测量来计算信号到达角度所需要的高精度时钟,从而简化了基站的设备要求,同时因为幅度的测量比较简单且精度较高,亦可提高系统的定位精度。

参考文献

- [1] 詹建.新一代移动通信测试技术探讨[J].电子测量技术,2012,35(7):119-124.
- [2] GIORGETTI A, CHIANI M. Time-of-arrival estimation based on information theoretic criteria[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(8): 1869-1879.
- [3] 张钦宇,张乃通. UWB无线传感器网络中基于匹配滤波检测的TOA估计[J]. 软件学报, 2009, 20(11): 3010-3022.
- [4] FUJIWARA R, MIZUGAKI K, NAKAGAWA T, et al. TOA/TDOA hybrid relative positioning system based on UWB-IR technology[J]. IEICE Transactions on Communications, 2011, E94B(4): 1016-1024.
- [5] LEE Y U. Weighted-average based AOA parameter estimations for IR-UWB wireless positioning system[J]. IEICE Transactions on Communications, 2011, E94B(12): 3599-3602.
- [6] CUI X R, ZHANG H, GULLIVER T A. Threshold selection for ultra-wideband TOA estimation based on neural networks[J]. Journal of Networks, 2012, 7(9): 1311-1318.
- [7] TAPONECCO L, DAMICO A A, MENGALI U. Joint TOA and AOA estimation for UWB localization applications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(7): 2207-2217.
- [8] ZHANG H, CUI X R, GULLIVER T A. Remotely-sensed TOA interpretation of synthetic UWB based on Neural Networks[J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 2012, 2012(1): 1-13.
- [9] QING X M, CHEN ZH N, SEE T S P. Sectored antenna array for indoor mono-station UWB positioning applications [C]. 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009: 822-825.
- [10] 梁境峰,李光灿,杜勇,等. TSA线性阵列的脉冲辐射特性分析[J]. 电子测量技术,2012,35(8):38-41.

作者简介

李娟,1979年出生,工学博士研究生,讲师,主要研究方向为UWB无线定位、卫星定位、位置服务、车联网。
E-mail:lijuanlijuan@sina.com

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>