



综述

超宽带室内定位算法综述

赵红梅, 赵杰磊

(郑州轻工业学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 在超宽带定位系统中, 多径效应、NLOS 等因素会导致一定程度的测量误差。详细介绍了基于超宽带的各类定位技术及其实现原理, 并着重于定位性能较好的 TDOA 技术, 从定位模型建立到定位解算方面系统地介绍了各类基于 TDOA 的定位算法, 详细阐述了各种算法的实现原理及设计流程, 并对各种算法在 LOS 和 NLOS 下的性能进行了比较分析。

关键词: 超宽带室内定位; TDOA; NLOS 误差修正; 算法分析

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018227

An overview of ultra-wideband indoor positioning algorithms

ZHAO Hongmei, ZHAO Jielei

Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

Abstract: The multipath effect, NLOS and other factors, will cause a certain degree of measurement error in ultra-wideband positioning system. Various positioning technologies and their implementation principles were introduced in detail. And focusing on the time difference of arrival (TDOA) technology with better positioning performance, from the model to solve for all kinds of localization algorithm based on TDOA were systematically introduced, including the implementation principle and design process of various algorithms, and the performance analysis of the various algorithms under LOS and NLOS.

Key words: UWB indoor positioning, TDOA, NLOS error correction, algorithm analysis

1 引言

近年来, 随着无线定位技术的快速更新, 各种基于移动定位的应用如目标追踪、环境监测、医疗保健、空间探索等也逐渐显露出发展的契机。在现有的无线通信技术中, 超宽带(ultra-wideband, UWB) 信号具有高传输率、低功耗、抗干扰性强

的优点^[1], 使得当其被应用到无线定位系统中时, 在定位精度上有着其他定位技术无法比拟的优势, 成为目前短距离无线定位的可靠选择^[1]。

无论是传统的 GPS 导航定位, 还是近来兴起的 Wi-Fi、蓝牙、ZigBee 等基于短距离的无线定位技术, 在如何提高定位精度的问题上, 国内外相关科研工作者针对不同的应用背景提出了多种

收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U1504604)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.U1504604)

不同的定位方法。在现有的 UWB 定位系统中,存在多种基于测距的定位方法。每种定位方法都对应着多种不同的解算定位的算法。如何提高定位精度以满足不同环境下的定位需求,一直是 UWB 无线定位技术的重点^[2]。

本文首先介绍了 UWB 定位模型的建立,然后主要从基于 TDOA 的 UWB 无线定位的角度,系统地阐述了在视距(light of sight, LOS)和非视距(none light of sight, NLOS)环境下现有定位算法的实现原理,并通过 MATLAB 仿真分析,对现有算法的定位精度、实时性进行了详尽的比较。

2 UWB 室内定位

美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)在 2002 年制定规范允许了民用 UWB 通信系统的使用,并把 UWB 信号定义为绝对带宽大于 500 MHz 或相对带宽大于 20% 的信号,频谱范围为 3.1~10.6 GHz,最大发射功率不超过 -41.3 dBm/MHz^[3]。目前 UWB 最典型的实现方式为使用占空比极低的脉冲作为信息载体的脉冲无线电(impulse radio, IR)。作为一项新兴技术,脉冲超宽带可满足室内定位高精度、低功耗和低复杂度的实现要求^[4]。

2.1 UWB 室内定位的优势

(1) 结构简单、实现成本低

较之传统的窄带信号收发信机在通信过程中以正弦载波为载体传递消息,需使用变频技术、功率放大技术及中频、射频电路,UWB 的发射端可以使用脉冲直接激励天线,将信号发射出去,能够有效降低成本和实现设备小型化^[5]。

(2) 设备功耗低

UWB 系统所发出的脉冲信号的持续时间很短,一般在 0.20~1.5 ns,其脉冲占空比极小,因此所消耗的能量微乎其微,也降低了设备所产生的电磁辐射对人的影响。同时极低的功耗使得超宽带信号不易被拦截,提高了信号传输的安全性。

(3) 抗干扰能力强

在超宽带系统中,系统发送的脉宽极窄的冲激脉冲占据了非常宽的带宽,使得 UWB 信号抗窄带干扰的能力很强。UWB 系统采用冲激脉冲调制和跳时编码调制,克服了系统本身的相互干扰且具备了多址功能。

(4) 多径分辨能力强

UWB 是利用极窄的脉冲进行信息传输的。由于其占空比低,在多径的情况下可以实现时间上的分离,能够充分利用发射信号的能量。

(5) 穿透能力强

实验证明,超宽带无线通信技术穿透树叶以及相当厚度的障碍物的能力非常强,对窄带系统的丛林通信模式也同样适用。因此,在室内和地下这样复杂的环境下,UWB 技术能够保证正常的通信和精确的定位^[6]。

2.2 与其他定位技术的比较

现今,室内无线定位技术的研究主要集中在射频(radio frequency, RF)信号的基础上,同时结合无线网络技术,如 ZigBee、Wi-Fi、蓝牙和射频识别(radio-frequency identification, RFID)等。不同室内定位技术之间的对比归纳于表 1 中。通过分析可以看出,几种室内定位系统各有利弊。超宽带信号与传统无线电信号有着根本的区别,这种新的信号形式,凭借自身的特性,应用在室内定位系统中,能够使系统在功耗、造价、精度、实时性、通信能力以及可扩充性能等方面得到大幅度提升,满足人们对室内定位的新要求。

2.3 UWB 室内定位技术

在 UWB 室内定位系统中,一般可划分为 3 个层次,即位置感知层、网络传输层、定位应用层。位置感知层由 UWB 基站和定位标签组成,用于获取标签有效信息;网络传输层则负责将位置感知层获得的与定位相关的信息通过有线或无线的方式传输给后台服务器;定位应用层主要包括定位引擎、应用软件,定位引擎用于实时解算定位



表 1 不同室内定位技术性能对比

技术	定位精度	相对成本	优点	缺点
Wi-Fi	2~50 m	低	成本低, 通信能力强	易受环境干扰
蓝牙	2~10 m	低	易集成、易普及	传输距离短、稳定性差
ZigBee	1~2 m	低	低功耗、低成本	稳定性差、易受环境干扰
红外线	5~10 m	高	定位精度较高	直线视距、传输距离短、易干扰
RFID	0.05~5 m	中	成本不高、精度较高	距离短
UWB	6~10 cm	高	精度高、穿透性强	成本较高

标签的位置信息, 而定位应用平台则用于实现人机交互, 为用户提供各种业务功能应用。

目前, 存在多种方法可以获取到移动标签(即位置感知层)的位置信息, 其中应用最广泛的是基于信号强度指示(signal strength indicator, RSSI)、基于到达时间(time of arrival, TOA)、基于到达时间差(time difference of arrival, TDOA)和基于到达方向(direction of arrival, DOA, 或 angle of arrival, AOA) [7-8]。

2.3.1 RSSI 定位方法

UWB 信号在特定信道里传播时, 其信号强度遵从一定的衰减模型。基于 RSSI 的定位方法是通过测得 UWB 脉冲信号的信号场强, 依照信道衰落模型及得到的发射信号的信号强度值, 计算移动标签与 UWB 基站之间的距离。路径损耗模型如下:

$$\bar{p}(d) = p_0 - 10n \lg \left(\frac{d_i}{d_0} \right) \quad (1)$$

其中, n 是路径损耗指数, $\bar{p}(d)$ 是距离发射信号在距离 d_i 处接收信号的平均功率, 单位为 dBm, p_0 是距离发射信号 d_0 处接收信号的平均功率, d_0 为参考距离。

由于路径损耗模型是确定的, 即信道衰落所产生的路径损耗是已知的, 代入式 (1), 即可得出标签与基站之间的距离 d_i , 再利用三边测量法, 以每个基站为圆心、 d_i 为半径构建 3 个圆周方程, 其交点即待测标签的实时位置。

由于发送节点具备通信能力, 因此 RSSI 是一种低功率、低成本的测距技术。在理想环境下, RSSI 表现出良好的测距特性^[9]。然而在室内环境下, RSSI 易受阴影衰落、多径效应等多种因素影响产生扰动, 基于 RSSI 的定位会引入较大的误差。虽然可用极大似然估计、加权质心等定位算法进行误差修正, 但在实际应用中结果很不稳定^[10]。

2.3.2 AOA 定位方法

基于 AOA 的定位方法是指基站通过天线阵列测出 UWB 信号的入射方位, 以此来计算基站与标签之间的角度, 最后利用三角测量法得出标签的位置坐标。AOA 方法只需要 2 个基站即可确定移动台位置。定位模型如图 1 所示。

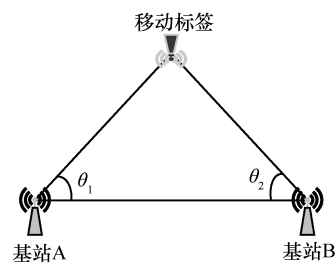


图 1 AOA 定位示意图

图 1 中, θ_1 为移动标签发射的 UWB 信号到达基站 A 的角度, θ_2 为移动标签发射的 UWB 信号到达基站 B 的角度。假设基站 A、B 坐标分别为 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) , 移动标签坐标为 (x, y) 。则有:

$$\tan(\theta_i) = \frac{y_0 - Y_i}{x_0 - X_i}, i=1, 2 \quad (2)$$

计算式(2),即可得移动标签位置坐标。

基于 AOA 的定位方法对 UWB 信号的方向和角度计算要求极高,因此极易受到外界因素如非视距、环境噪声等影响,导致测量精度降低。此外,该技术对硬件设备要求较高,通常需要采用具有较强方向性的天线或阵列天线来接收信号^[11]。

2.3.3 TOA 定位方法

基于 TOA 的定位方法根据 UWB 信号在基站与标签之间的传播速度和时间来计算两者之间的距离进而实现定位。假设基站与标签之间时间同步,标签 A 在发送 UWB 信号的同时发送一个同步消息,告知接收基站 B 发送时间为 t_0 , 基站 B 在接收信号的同时接收同步消息,并记录接收信号的时间 t_1 , 则两者之间的距离为:

$$d = c \times (t_1 - t_0) \quad (3)$$

其中, c 为光速,即 UWB 信号在介质中的传播速度。

以二维定位为例,假设基站 A 的坐标为 (X_1, Y_1) , 基站 B 的坐标为 (X_2, Y_2) , 基站 C 的坐标为 (X_3, Y_3) , 移动标签坐标为 (x, y) 。则基于 TOA 的定位原理如图 2 所示。

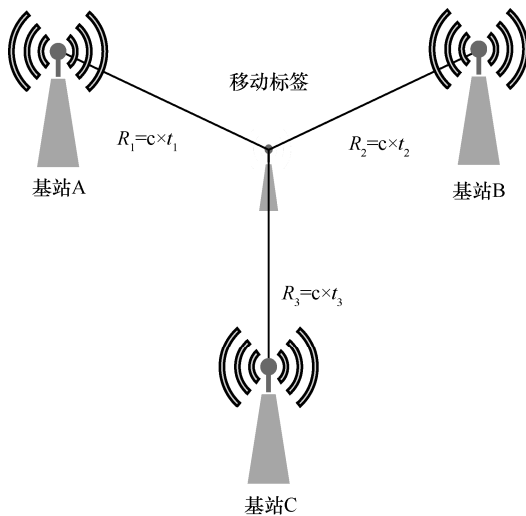


图2 TOA 定位原理

其中, R_1 为基站 A 与移动标签之间的距离, R_2 为基站 B 与移动标签之间的距离, R_3 为基站 C

与移动标签之间的距离, t_1 、 t_2 、 t_3 分别表示 UWB 信号在各基站到移动标签之间的传播时间。根据已知信息可列出以下方程组:

$$\begin{cases} ((X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2) = R_1^2 \\ ((X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2) = R_2^2 \\ ((X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2) = R_3^2 \end{cases} \quad (4)$$

对式(4)进行矩阵求解,可得出移动标签的位置坐标:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(X_1 - X_3) & 2(Y_1 - Y_3) \\ 2(X_2 - X_3) & 2(Y_2 - Y_3) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_1^2 - X_3^2 + Y_1^2 - Y_3^2 + R_3^2 - R_1^2 \\ X_1^2 - X_3^2 + Y_2^2 - Y_3^2 + R_3^2 - R_2^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

基于 TOA 的定位方法,其定位精度严格依托时间分辨率。CHAN 算法等经典的定位算法,求解 TOA 定位精度虽然可以满足无线传感器网络在一定场合的应用,但是由于测得的时间受环境因素或硬件影响(例如时钟精度),会使 TOA 测量值出现较大偏差,使得方程组无法求解,造成定位算法的性能显著下降,因此 TOA 的定位精度还有待于进一步的提升。此外,根据时间建立的距离方程普遍存在非线性问题^[12]。

2.3.4 TOF 定位方法

飞行时间法(time of flight, TOF)是一种双向测距技术,它通过测量 UWB 信号在基站与标签之间往返的飞行时间来计算距离^[13]。测距原理如图 3 所示。

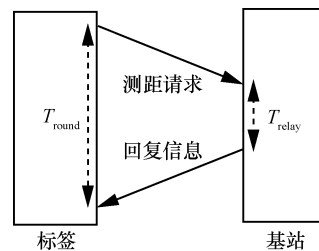


图3 TOF 测距示意图

移动标签首先向定位基站发送测距请求,基站收到测距请求进行处理,经过一小段时间处理



后向移动标签回复确认信息, 分别记录 UWB 信号发送和接收的时间戳, 由此可计算出信号总的飞行时间 T_{round} 和处理时间 T_{relay} 。那么标签到基站之间的距离可以表示为:

$$d = \frac{(T_{\text{round}} - T_{\text{relay}})}{2} \times c \quad (6)$$

依据标签到不同基站之间的距离方程, 如式 (3) 联立方程组, 求解即可得到标签位置坐标。

基于 TOF 的定位方法与基于 TOA 的定位方法在本质上是相同的, 而 TOF 测距不依赖基站与标签的时间同步, 故没有时钟同步偏差带来的误差, 但 TOF 测距方法的时间取决于时钟精度, 时钟偏移会带来误差。为了减少时钟偏移量造成的测距误差, 通常采用正反两个方向的测量方法, 即远端基站发送测距信息, 标签接收测距信息并回复, 然后再由标签发起测距信息, 远端基站回复, 通过求取飞行时间平均值, 减少两者之间的时间偏移, 从而提高测距精度^[14]。

2.3.5 TDOA 定位方法

基于 TDOA 的定位方法又称为双曲线定位, 其原理是通过测量 UWB 信号从标签到两个基站之间传播时间的差值, 得到标签到两个基站之间的固定距离差。TDOA 算法是对 TOA 算法的改进, 它并不是直接利用信号到达时间, 而是利用多个基站接收到信号的时间差来确定移动目标的位置。因此与 TOA 相比并不需要加入专门的时间戳来进行时钟同步, 定位精度相对有所提高。TDOA 信号传输模型如图 4 所示。

图 4 中, t_1 、 t_2 分别为 UWB 信号自标签到基站 A、B 的传播时间, 设移动标签坐标为 (x, y) , 基站 A 的坐标为 (X_1, Y_1) , 基站 B 的坐标为 (X_2, Y_2) 。则以此可构建以两个基站所在坐标为焦点、距离差为长轴的双曲线:

$$\sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} - \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} = c \times (t_1 - t_2) \quad (7)$$

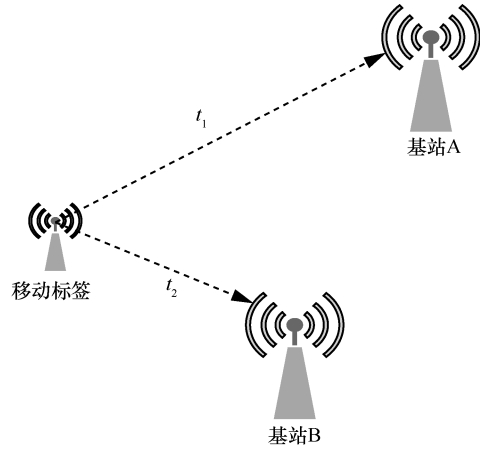


图 4 TDOA 原理

假设空间布有 N 个基站, 同时利用多个 TDOA 测量值可以构成关于标签位置的双曲线方程组, 求解此方程组即可得到标签坐标。

$$\begin{cases} \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} = R_{2,1} \\ \sqrt{(X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} = R_{3,1} \\ \vdots \\ \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} = R_{i,1} \end{cases} \quad (8)$$

式 (8) 中为了简化计算, 选择一个基站作为参考, $R_{i,1} (i=1, \dots, N)$ 代表某一基站到标签的距离与此基站到标签的距离之差。求解方程组, 即可得到标签位置坐标。

根据 TDOA 定位技术的原理, 测量参数主要是从接收机 (即定位基站) 上获得的, 因此接收信号的接收机必须保持高精度的时钟同步, 如果时钟没有保持足够的精确的同步, 测量结果将会失去实际意义, 将会对定位的结果产生很大的误差。因此, 保持接收机之间时钟的同步是该系统的重点, 也是影响整个系统定位精度的关键点^[15]。

3 基于 TDOA 的定位算法

UWB 系统采用极窄脉冲进行信息传输, 多径情况下的时间分辨率极高, 采用 TOA、TDOA、TOF 等基于时间的定位方法无须对超宽带信号进

行预处理。为了得到更为准确的定位精度，UWB定位系统一般采用TDOA方法进行位置信息的获取。针对这种方法所建立的双曲线定位模型，相关研究人员提出了多种定位算法。

3.1 LS及WLS定位算法

3.1.1 LS定位算法

基于TDOA的定位算法的本质是对双曲线定位方程组的求解，如式(8)所示，原方程组是非线性的，可以先将之化为线性方程组 $Ax=b$ ，再进行求解。由于定位方程组是非线性的，而且TDOA的测量难免存在误差。当基站数目 $N=4$ 时，利用最小二乘法求解，可得：

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (9)$$

其中：

$$A = \begin{bmatrix} X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & R_2 - R_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 & R_3 - R_1 \\ X_4 - X_1 & Y_4 - Y_1 & R_4 - R_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$b = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (R_2 - R_1)^2 - (X_2^2 + Y_2^2) + (X_1^2 + Y_1^2) \\ (R_3 - R_1)^2 - (X_3^2 + Y_3^2) + (X_1^2 + Y_1^2) \\ (R_4 - R_1)^2 - (X_4^2 + Y_4^2) + (X_1^2 + Y_1^2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$\hat{x}$ 即 $[\hat{x} \ \hat{y} \ R_1]^T$ ，是最小二乘法得到的最优估计解，则标签位置坐标的估计值为 $(\hat{x}, \hat{y})^{[16]}$ 。

3.1.2 WLS定位算法

有时为了提高定位精度，可以对LS定位算法进行加权处理，提高冗余数据的利用率。WLS算法与LS算法的基本原理一致，只是在LS算法的基础上加入了加权矩阵 W 。若将得到的TDOA测量值用 $t_{i,1}$ 表示，则距离差为 $R_{i,1}$ ，设真实值为 $R_{i,1}^0$ ，测量误差为 $n_{i,1}$ ，则 $R_{i,1} = R_{i,1}^0 + n_{i,1}$ 。由于存在误差导致矩阵方程两边不等，即：

$$\psi = b - Ax \quad (12)$$

若设基站与标签间真实距离为 R_i^0 ，由原定位方程组可得：

$$\psi_i = v n_{i,1} R_i^0 + \frac{1}{2} v^2 n_{i,1}^2 \quad (13)$$

写成矩阵形式为：

$$\psi = v B n + 0.5 v^2 n \odot n \quad (14)$$

其中， $B = \text{diag}\{R_2^0, R_3^0, R_4^0\}$ ， v 为电磁波传播速度， $\odot$ 表示数积。

理论表明，当加权矩阵为正定矩阵，即 $W = \Psi^{-1}$ （ Ψ 为噪声 ψ 的协方差矩阵）时，WLS算法的误差矩阵可达到最小，能达到最佳估计性能^[17]。然而由于式(14)中存在真实距离 R_i^0 ，所以噪声的协方差矩阵一般很难确定，因此实际求解时，加权矩阵 W 无法利用先验信息生成。

在式(13)中，若忽略右边的第二项，则 ψ 可看作高斯随机向量，则：

$$\Psi = E[\psi \psi^T] = v^2 B Q B \quad (15)$$

其中， Q 为TDOA协方差矩阵。

在实际应用中，可用测量值 R_i 替代 R_i^0 ，近似计算 ψ ，以此确定加权矩阵 W ，则求解原方程组，可得：

$$\hat{x} = (A^T W A)^{-1} A^T W b \quad (16)$$

3.2 Chan氏定位算法

由于在加权最小二乘算法中，加权矩阵 W 无法通过先验信息获得，而是采用了近似的方法，且在化为线性方程组的时候，引入了中间变量 R_1 ，所以简化后的定位方程组仍然是非线性的。假设 x 、 y 与 R_1 不相关，定位问题就由求解非线性方程转换为非线性的最优化问题。为了提高定位解算的可靠性，可采用Chan氏定位算法，即多步加权最小二乘算法对定位误差进行修正^[18]。

在Chan氏定位算法中，首先利用WLS进行初步估计，得到结果 x_a ，由于噪声的存在，使得：

$$A = A^0 + \Delta A, b = b^0 + \Delta b \quad (17)$$

又因 $b^0 = A^0 x^0$ ，由式(12)可得：

$$\psi = \Delta b - \Delta A x^0 \quad (18)$$

令 $x_a = x^0 + \Delta x_a$ ，则 Δx_a 及其协方差矩阵为：

$$\Delta x_a = v(A^{0T} \Psi^{-1} A^0)^{-1} A^{0T} \Psi^{-1} B n$$



$$\text{cov}(\mathbf{x}_a) = E(\Delta \mathbf{x}_a \Delta \mathbf{x}_a^T) = (\mathbf{A}^{0T} \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{A}^0)^{-1} \quad (19)$$

$\mathbf{x}_a$ 中的元素可被表示为:

$$\mathbf{x}_{a,1} = x^0 + e_1, \mathbf{x}_{a,2} = y^0 + e_2, \mathbf{x}_{a,3} = R_1^0 + e_3 \quad (20)$$

其中, e_1, e_2, e_3 为 $\mathbf{x}_a$ 的估计误差。建立下列方程组:

$$\boldsymbol{\psi}' = \mathbf{b}' - \mathbf{A}' \mathbf{x}'_a \quad (21)$$

其中, $\boldsymbol{\psi}'$ 为 $\mathbf{x}_a$ 的误差矢量, $\mathbf{b}'$ 、 $\mathbf{A}'$ 、 $\mathbf{x}'_a$ 分别表示如下:

$$\mathbf{b}' = \begin{bmatrix} (x_{a,1} - X_1)^2 \\ (x_{a,2} - Y_1)^2 \\ x_{a,3}^2 \end{bmatrix}, \mathbf{A}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{x}'_a = \begin{bmatrix} (x - X_1)^2 \\ (y - Y_1)^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$\boldsymbol{\psi}'$ 的协方差矩阵为:

$$\boldsymbol{\psi}' = [\boldsymbol{\psi}' \boldsymbol{\psi}'^T] = 4 \mathbf{B}' \text{cov}(\mathbf{x}_a) \mathbf{B}'^T \quad (23)$$

$$\mathbf{B}' = \text{diag}\{x^0 - X_1, y^0 - Y_1, R_1^0\}$$

因此, 用 WLS 方法解此方程组, 得:

$$\mathbf{x}'_a = (\mathbf{A}'^T \boldsymbol{\psi}'^{-1} \mathbf{A}')^{-1} \mathbf{A}'^T \boldsymbol{\psi}'^{-1} \mathbf{b}' \quad (24)$$

则最终的位置估计为:

$$\mathbf{x}_p = \pm \sqrt{\mathbf{x}'_a} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

3.3 基于 Taylor 级数展开的定位算法

基于 Taylor 级数展开的定位算法是一个需要较好初始迭代值的迭代算法, 拥有精度高、顽健性强等优点。在每一次迭代中通过求解位置估计误差的局部最小二乘解来更新估计位置^[19]。

将式 (8) 在选定的初始位 (x_0, y_0) 处进行泰勒级数展开, 忽略二阶以上分量, 则式 (8) 可转化为:

$$\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{b}_i - \mathbf{A}_i \boldsymbol{\delta} \quad (26)$$

其中:

$$\boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} R_{2,1} - (R_2 - R_1) \\ R_{3,1} - (R_3 - R_1) \\ \vdots \\ R_{i,1} - (R_i - R_1) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} (X_1 - x)/R_1 - (X_2 - x)/R_2 & (Y_1 - y)/R_1 - (Y_2 - y)/R_2 \\ (X_1 - x)/R_1 - (X_3 - x)/R_3 & (Y_1 - y)/R_1 - (Y_3 - y)/R_3 \\ \vdots & \vdots \\ (X_1 - x)/R_1 - (X_i - x)/R_i & (Y_1 - y)/R_1 - (Y_i - y)/R_i \end{bmatrix} \quad (27)$$

式 (26) 的加权最小二乘解为:

$$\boldsymbol{\delta} = (\mathbf{A}_i^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{A}_i)^{-1} \mathbf{A}_i^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{b}_i \quad (28)$$

其中, $\mathbf{Q}$ 为 TDOA 测量值的协方差矩阵。在下一递归求解中, 令: $x'_0 = x_0 + \Delta x$, $y'_0 = y_0 + \Delta y$ 。重复以上过程, 直到 Δx 、 Δy 足够小, 满足一个设定的门限:

$$|\Delta x| + |\Delta y| < \varepsilon \quad (29)$$

在实际应用中, 为了减少 Taylor 级数展开的定位算法的迭代次数, 降低算法复杂度, 一般常用 LS、WLS 等定位算法得到初始估计值作为 Taylor 级数展开定位算法的迭代初值^[20]。

3.4 PSO 算法

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法是一种基于群体迭代的智能优化算法。通过初始化一群随机粒子, 调整每一次迭代时每一个粒子在每一维上移动一定的距离来寻找最优解。其程序设计流程如图 5 所示。

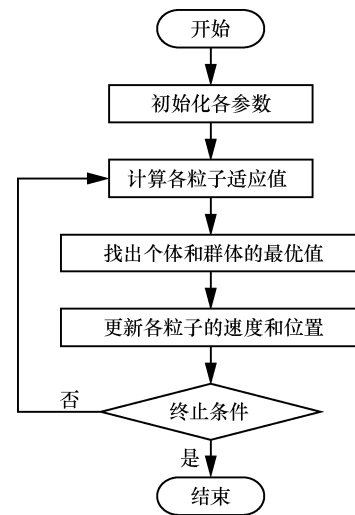


图 5 PSO 程序流程

在定位系统中, 可将 TDOA 距离误差作为适

应度函数 f , 如式 (30) 所示。

$$f = \frac{1}{n} \sum_{i=2}^n |\hat{R}_{i,1} - R_{i,1}| \quad (30)$$

其中, n 代表定位基站数目, i 代表第 i 个基站, $R_{i,1}$ 代表 TDOA 测量值, $\hat{R}_{i,1}$ 代表由 PSO 得出的 TDOA 测量值。为了找到最优解, 需要 f 达到最小。

将每个粒子的适应值与所到达的最优位置的适应值 p_i^d 进行比较, 若更好, 则令其成为当前最好的位置, 与全局经历过的最好位置的适应值进行比较, 若较好, 则将其作为当前全局最好的位置。

每个粒子的速度和位置在每次迭代中由式 (31) 和式 (32) 进行更新。

$$v_i^d = \omega v_i^d + c_1 r_1 (p_i^d - x_i^d) + c_2 r_2 (p_g^d - x_i^d) \quad (31)$$

$$x_i^d = x_i^d + \alpha v_i^d \quad (32)$$

其中, $i=1, 2, \dots, m$, 代表第 i 个粒子, m 为粒子数目; $d=1, 2, \dots, D$, 代表第 d 个维度, D 为最大维度, 二维定位 D 取 2; c_1 和 c_2 代表学习因子, 为非负常数; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 范围变化的随机数; α 为约束因子, 目的是控制速度的权重。

迭代的终止条件设为最大迭代次数或粒子群目前为止搜索到的最优位置满足目标函数的最小容许误差^[21-22]。

4 算法分析

为了验证上述算法的定位性能, 本文分别分析了在同等条件下不同算法的均方根误差 (root mean square error, RMSE)。假定在具有 5 个基站的 UWB 定位系统中, 将参与 TDOA 测量的基站按顺序排号, 则第 i 个基站的位置坐标可表示为 (X_i, Y_i) , 假设移动标签的位置坐标为 (x, y) 。所有结果都是由 1 000 次独立计算过后的算法平均得出。

4.1 评价标准

评价算法的定位精度, 一般使用均方误差

(mean square error, MSE)、RMSE、克拉美罗下限等作为评价标准, 而其中最常用的是 MSE 和 RMSE^[23]。

MSE 表征参数估计值与参数真值之差平方的期望值, 可以评价数据的变化程度, MSE 的值越小, 说明预测模型描述实验数据具有更好的精确度。假设移动标签的真实位置坐标为 (x, y) , 定位算法估计位置坐标为 $(\hat{x}, \hat{y})$ 。则 MSE 数学表达式为:

$$\text{MSE} = E[(\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2] \quad (33)$$

RMSE 则是均方误差的算术平方根, 其数学表达式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{E[(\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2]} \quad (34)$$

本文采用 RMSE 作为数据测量误差的评判标准。

4.2 LOS 环境下 TDOA 算法仿真

本次仿真基于 TDOA 定位方法, TDOA 的测量误差即指 UWB 信号从标签到达两个基站之间的传播时间差的真值 (单位为 ns) 与其实际测量值之间的差值。本文为了计算方便, 特将其换算成了距离误差。即 TDOA 测量误差 $\times$ 光速。假设参考基站坐标为 (20, 100), 其他基站坐标依次为 (400, 0), (0, 400), (-400, 0), (0, -400)。设待定位的标签位于 (x, y) , 图 6 表示上述算法随 TDOA 测量距离标准差的变化曲线图。从图 6 可知, 在 TDOA 标准差变大时, 以 LS 作初值的 PSO 算法和 LS 算法相比, 虽然定位精度有所提升, 但变化不太大。且由于 PSO 的算法复杂度明显高于 LS, 用于静态定位时, 尚占一定优势, 若用于连续定位, 则不论算法复杂度还是定位精度都不如 WLS 等算法。而由图 6 及图 7 所示, Chan 算法、基于 LS 迭代的 Taylor 算法、基于 Chan 算法迭代的 Taylor 算法在 TDOA 标准差变化时, 定位精度无明显变化, 且由于基于迭代的 Taylor 算法的复杂度明显高于 Chan 算法, 因此可知在 LOS 环境下, Chan 算法的定位效果最优。

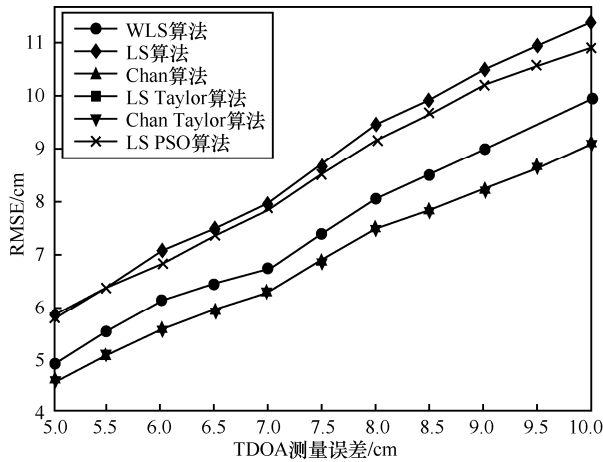


图6 LOS环境下不同算法性能比较

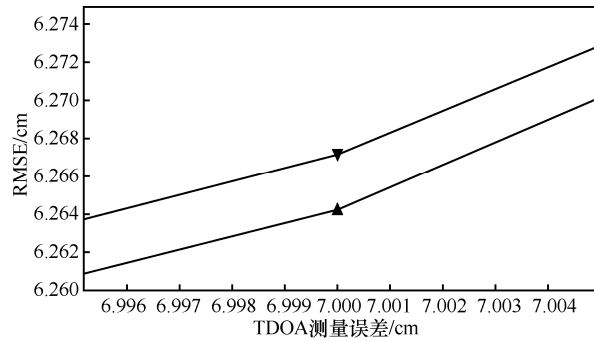


图7 Chan算法与Taylor算法对比

4.3 NLOS环境下TDOA算法仿真

在UWB定位系统中,多径效应引起的误差可通过加权等算法进行修正补偿,但在NLOS环境下,UWB信号在发射端与接收端的传播受到极大影响,基于TDOA定位的准确度显著降低。可采用卡尔曼滤波算法减弱满足一定概率分布的NLOS误差带来的影响,但NLOS的误差分布一般并不固定,采用人工神经网络等智能算法来削弱NLOS误差,可以提高算法的适配性^[24]。

4.3.1 RBF算法处理NLOS误差

径向基函数(radial basis function, RBF)是典型的前向神经网络,具有非线性连续有理函数的逼近功能。可以通过利用多个定位基站的TDOA测量值,对NLOS误差进行修正,使TDOA的测量值接近LOS环境下的测量值,提高NLOS环境下的定位精度^[25]。

RBF神经网络模型由输入层、隐含层、输出层组成,常采用聚类方法、梯度训练方法、正交最小二乘训练方法调整网络误差。如图8所示,输入层由5个定位基站提供的4个TDOA测量值组成,输入向量 $x=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$,隐含节点中的激活函数(基函数)选择高斯函数。输出层为修正后的TDOA值,输出向量 $y=[y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4]$ 。

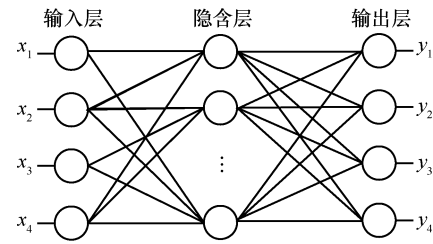


图8 修正TDOA测量值得RBF模型

本文采用梯度训练法反向调整网络误差,RBF网络中要学习的参数有3个,即各RBF的数据中心、方差和输出单元的权值。由链式偏微分法则,可得每次数据中心、方差和权值的调整量分别为:

$$\Delta c_i = \eta_1 \frac{\omega_i}{\sigma_j^2} \sum_{j=1}^N e_j G(x_j)(x_j - c_i) \quad (35)$$

$$\Delta \sigma_i = \eta_2 \frac{\omega_i}{\sigma_j^2} \sum_{j=1}^N e_j G(x_j) \|x_j - c_i\|^2 \quad (36)$$

$$\Delta \omega_i = \eta_3 \sum_{j=1}^N e_j G(x_j) \quad (37)$$

其中, G 表示高斯函数; i, j 分别是隐含层节点数量和样本数量的下标; c, σ, ω 分别表示网络数据中心、宽度以及权值, η_1, η_2, η_3 分别表示各自的学习速率; e 表示网络输出值与样本值之间的残差;梯度RBF网络隐含层神经元由激活函数和距离函数构成,越靠近数据中心的样本越可能被更大程度地激活,越偏离数据中心的训练样本,网络对其响应程度越小。算法流程如图9所示。

4.3.2 仿真结果

假定移动标签真实位置坐标为 $(-150, 200)$,NLOS误差服从均匀分布,TDOA测量误差(为

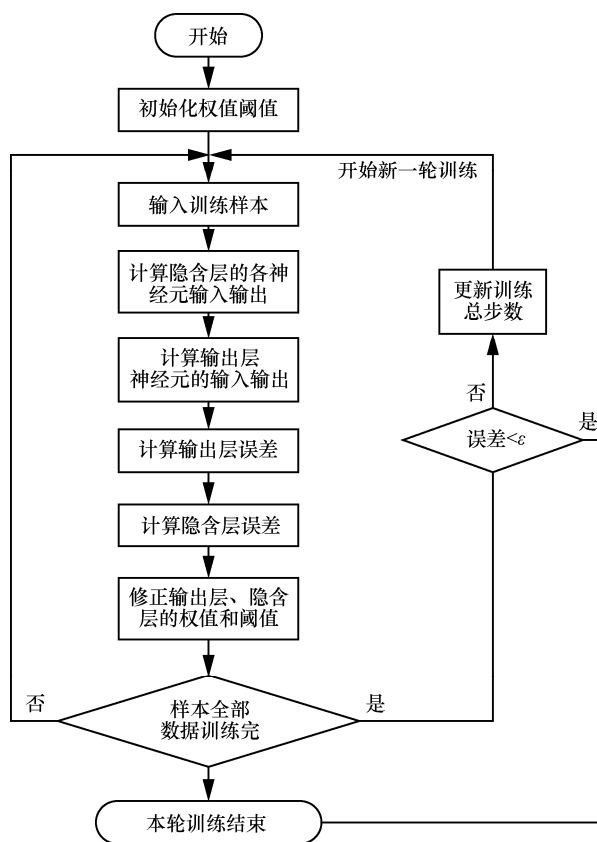


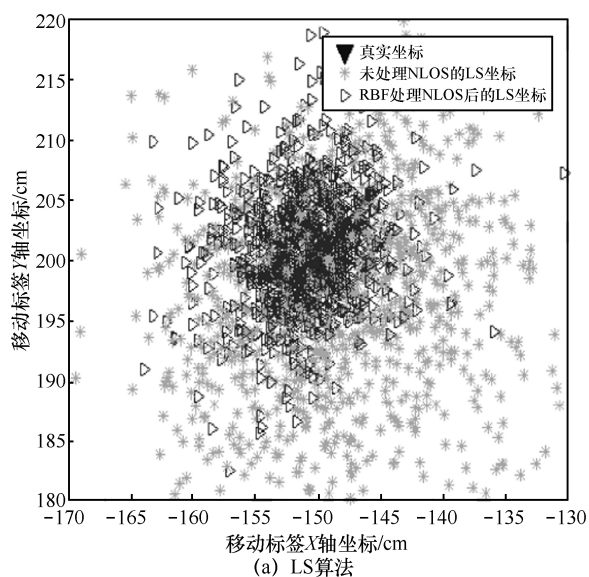
图9 RBF 算法流程

方便计算,按测量距离误差处理,即测量误差 $\times$ 光速)服从高斯分布,在经过 RBF 训练后,可在一定程度上减小 TDOA 的 NLOS 误差,各类算法在

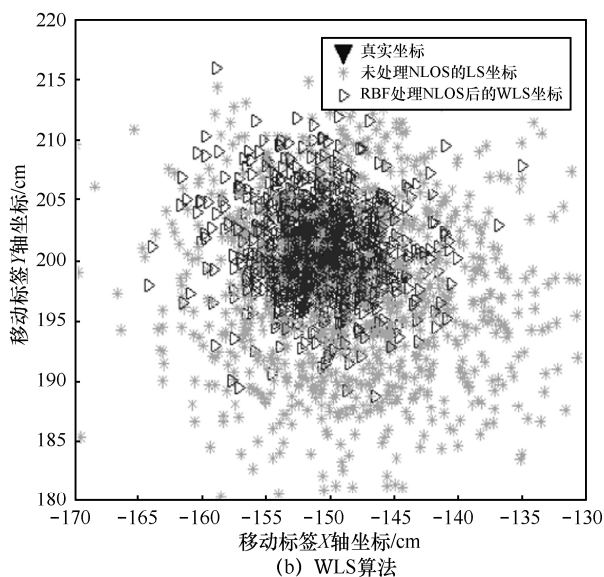
RBF 训练前后各进行 1 000 次解算定位后的仿真结果如图 10 所示。在经过 RBF 训练后的定位效果与 RBF 训练前相比,上述算法的性能有显著性提高。由图 11 可知,与 LS 相比,基于 PSO 的定位算法在 NLOS 环境下,不能得到最优解,整体定位效果并不好。而 WLS、Chan、Taylor 等算法在 NLOS 环境下定位表现良好,在测量误差(即测量距离标准差)较小时,定位精度较为稳定,而当测量误差较高时,定位精度随着测量误差变大而降低。而基于 Taylor 级数展开的定位算法虽然在定位精度上有小幅度的提升,但由于其定位精度与所需迭代的次数息息相关,算法的时间复杂度因之提升,与 WLS、Chan 算法相比在实时定位的应用上表现较差。而 Chan 算法在经过 RBF 训练后,与 LOS 环境下的定位效果基本一致,为整体性能最佳算法。

5 结束语

本文介绍了传统 UWB 定位的各种技术,针对定位精度较高的 TDOA 技术,从基本原理到实现算法方面进行了较为全面的阐述。首先通过推导将定位问题抽象为非线性方程组的求解问题,其次引入冗余变量将非线性方程组化为线性方程



(a) LS算法



(b) WLS算法

图10 不同算法在经 RBF 训练前后的定位效果对比

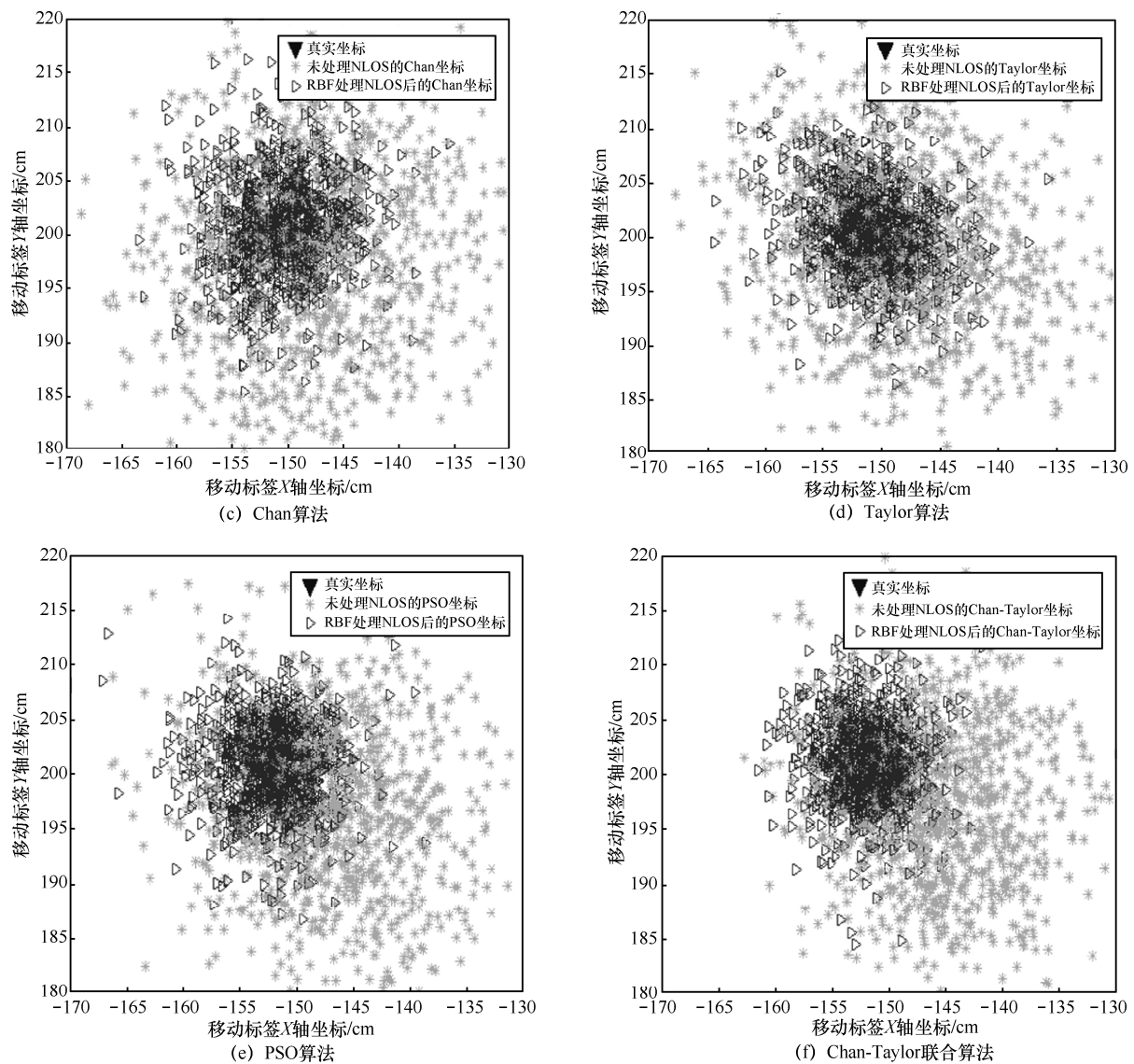


图 10 不同算法在经 RBF 训练前后的定位效果对比 (续)

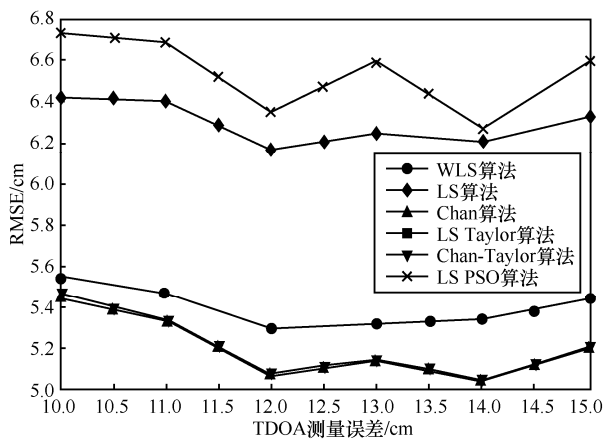


图 11 NLOS 环境下各算法仿真

组求解问题。为了降低冗余变量与待求解的高耦合性, 利用加权、迭代等数学方法对非线性问题进行优化。从仿真结果中可以看出, 在 LOS 环境下, Chan 算法的定位效果明显优于其他算法。在 NLOS 环境下, 由于定位空间较为复杂, Chan 算法的定位精度受限, 利用 RBF 神经网络算法对 NLOS 误差进行处理后, 可得到较为可观的定位效果, 然而实现实时定位的复杂度较高。该结论对后续进行三维定位的算法设计有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] SEGURA M, MUT V, SISTERNA C. Ultra wideband indoor navigation system[J]. *Iet Radar Sonar Navigation*, 2012, 6(5): 402-411.
- [2] WU S Y, HUANG Q, CHEN J, et al. Target localization and identification algorithm for ultra wideband through-wall radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010(32): 2624-2629.
- [3] 赵亮, 刘双平, 金梁, 等. 超宽带系统的功率谱密度限制问题研究[J]. *电信科学*, 2011, 27(2): 34-39.
ZHAO L, LIU S P, JIN L, et al. Research on the power spectral density limit in UWB systems[J]. *Telecommunications Science*, 2011, 27(2): 34-39.
- [4] 楚政, 谢飞. 超宽带无线通信技术的发展[J]. *电信科学*, 2007, 23(11): 10-13.
CHU Z, XIE F. Development of UWB[J]. *Telecommunications Science*, 2007, 23(11): 10-13.
- [5] 黄斌, 徐英欣. 新型超宽带微带阵列天线分析设计[J]. *电信科学*, 2010, 26(5): 96-99.
HUANG B, XU Y X. A novel UWB micro—strip antenna array[J]. *Telecommunications Science*, 2010, 26(5): 96-99.
- [6] 许波, 贺鹏飞, 段嗣妍. 无线体域网信道特性研究[J]. *电信科学*, 2011, 27(3): 78-84.
XU B, HE P F, DUAN S Y. Research on the channel characteristics of WBAN[J]. *Telecommunications Science*, 2011, 27(3): 78-84.
- [7] ZHAO G, NIU H. Research and application of indoor positioning based on UWB[C]//International Conference on Cyberspace Technology, Oct17-18, 2015, Beijing, China. [S.l.: s.n.], 2016: 5.
- [8] 李晓龙. 基于UWB的移动定位算法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.
LI X L. Research on mobile location algorithm based on UWB[D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2016.
- [9] ZHU D, YI K. A Hybrid TDOA/RSS localization algorithm based on UWB ranging in underground mines[M]//Electronic Commerce, Web Application and Communication, Communications in Computer and Information Science. Berlin: Springer, 2011.
- [10] 罗炬锋, 付耀先, 王营冠. 基于RSSI测距的WLS定位算法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(11): 34-38.
LUO J F, FU Y X, WANG Y G. WLS location algorithm using RSSI measurement[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science)*, 2011, 39(11): 34-38.
- [11] 马婧. 基于UWB信号的单基站定位算法研究及AOA定位研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
MA J. Research on single base station location algorithm and AOA location based on UWB signal[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [12] 朱国辉, 冯大政, 向平叶, 等. 传感器误差情况下的线性校正 TOA 定位算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2015, 37(3): 498-502.
- ZHU G H, FENG D Z, XIANG Y P, et al. Linear-correction TOA localization algorithm with sensor location errors[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(3): 498-502.
- [13] MAZRAANI R, SAEZ M, GOVONI L, et al. Experimental results of a combined TDOA/TOF technique for UWB based localization systems[C]//2017 IEEE International Conference on Communications Workshops, May 21-25, 2017, Paris, France. Piscataway: IEEE Press, 2017.
- [14] DONG F, SHEN C, ZHANG J, et al. A TOF and Kalman filtering joint algorithm for IEEE802.15.4a UWB Locating[C]//Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, May 20-22, 2016, Chongqing, China. Piscataway: IEEE Press, 2016: 948-951.
- [15] DJAJA-JOSKO V, KOLAKOWSKI J. A new method for wireless synchronization and TDOA error reduction in UWB positioning system[C]//International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications, May 9-11, 2016, Krakow, Poland. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [16] JIA T, WANG H, SHEN X, et al. Target localization based on structured total least squares with hybrid TDOA-AOA measurements[J]. *Signal Processing*, 2017(143): 211-221.
- [17] 李江华, 李龙文, 刘瑶. 一种混合定位算法线性化处理的抗NLOS的WLS算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(5): 816-819.
LI J H, LI L W, LIU Y. Linear mitigating NLOS propagation WLS algorithm for hybrid location[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(5): 816-819.
- [18] 汪子嘉, 于宏毅, 胡鹏. 基于最大似然准则的CHAN改进算法[J]. *计算机应用与软件*, 2014(9): 240-243.
WANG Z J, YU H Y, HU P. Improved chan algorithm based on maximum likelihood criterion[J]. *Computer Applications and Software*, 2014(9): 240-243.
- [19] WANG R, ZHENG S, CHEN H, et al. An cooperative localization method based on Taylor and Kalman algorithms[J]. *Chinese Journal of Sensors & Actuators*, 2014.
- [20] 杨俊峰, 张丕状. 基于Chan算法和Taylor级数混合算法的到达时差定位[J]. *核电子学与探测技术*, 2013, 33(4): 480-482.
YANG J F, ZHANG P Z. TDOA location based on Chan algorithm and Taylor series hybrid algorithm[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2013, 33(4): 480-482.
- [21] 赵青杉, 胡玉兰. 基于PSO的无线传感网络节点定位算法[J]. *计算机仿真*, 2012, 29(5): 174-177.
ZHAO Q S, HU Y L. Wireless sensor network node localization algorithm based on particle swarm optimization[J]. *Computer Simulation*, 2012, 29(5): 174-177.
- [22] 罗平, 向凤红, 毛剑琳, 等. 基于自然选择的线性递减权重PSO与Taylor算法的TDOA协同定位算法研究[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(4): 1144-1146, 1150.



- LUO P, XIANG F H, MAO J L, et al. TDOA co-location method based on natural selection linear decreasing weight PSO and Taylor algorithm[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(4): 1144-1146, 1150.
- [23] ANGELIS A D, DWIVEDI S, HÄNDEL P, et al. Ranging results using a UWB platform in an indoor environment[C]// International Conference on Localization and GNSS, June 25-27, 2013, Torino, Italy. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [24] LANDOLSI M A, MUGAIBEL A H, ALMUTAIRI A F. UKF-based channel estimation and LOS/NLOS classification in UWB wireless networks[J]. Journal of Engineering Research, 2016, 4(2): 86-102.
- [25] LAOUDIAS C. On the RBF-based positioning using WLAN signal strength fingerprints[C]//7th Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC), Dec 21-22, 2010, Dresden, Germany. [S.l.: s.n.], 2010: 93-98.

[作者简介]



赵红梅（1976-），女，郑州轻工业学院副教授、硕士生导师，主要研究方向为超宽带无线通信、电波传播以及天线设计。



赵杰磊（1993-），男，郑州轻工业学院电气信息工程学院硕士生，主要研究方向为超宽带室内定位技术。