

基于民用移动通信信号的经典 TDOA 定位算法研究

朱睿 余德源 孙利军 魏鸿斌 成静静

(中国联通广东省分公司 广州 510660)

摘要 为更好地突出无源雷达系统安全可靠、抗干扰性强、隐蔽性强等应用优势,文中首先构建了一种基于民用移动通信信号的无源雷达系统,并分析了无源定位误差的来源以及定位精度评价标准。其次,分析了适用于该系统中的 Chan 氏算法、Taylor 级数算法两种经典的 TDOA 定位算法实现过程。最后,在不同基站配置情况下,对两种经典 TDOA 定位算法的定位精度卡拉美罗下界进行了仿真和对比。仿真结果表明,当测量误差的均方差较低时,为更好地逼近卡拉美罗下界,技术人员可应用以上任意一种 TDOA 定位算法进行测量误差处理,以有效地提升 TDOA 定位算法的性能。

关键词: 民用移动;通信信号;TDOA 定位算法

中图分类号 TP306.1

Research on Classic TDOA Positioning Algorithm Based on Civilian Mobile Communication Signals

ZHU Rui, YU Deyuan, SUN Lijun, WEI Hongbin and CHENG Jingjing

(China Unicom Guangdong Branch, Guangzhou 510660, China)

Abstract In order to better highlight the application advantages of passive radar system such as safety, reliability, strong anti-jamming and strong concealment, this paper firstly constructs a passive radar system based on civil mobile communication signals, and analyzes the sources of passive positioning errors and positioning accuracy evaluation standards. Secondly, the implementation process of two classic TDOA positioning algorithms, Chan's algorithm and Taylor series algorithm, which are suitable for this system, is analyzed. Finally, under different base station configurations, the Calamero lower bound of positioning accuracy of the two classical TDOA positioning algorithms is simulated and compared. The simulation results show that when the mean square error of the measurement error is low, in order to better approach the lower bound of Calamero, technicians can apply any of the above TDOA positioning algorithms to deal with the measurement error, so as to effectively improve the performance of the TDOA positioning algorithm.

Key words Civilian mobile, Communication signals, TDOA positioning algorithm

0 引言

在信息时代,电子技术逐渐普及,导致有源雷达出现辐射导弹、电子干扰等问题,因此构建和应用基于民用移动通信信号的无源雷达系统显得尤为重要^[1]。该无源雷达系统应用了全球移动通信系统(Global System for Mobile Communications, GSM)基站信号,运动目标对象通常会对该基站信号产生一定的反射信号,并通过实时检测和接收这些反射信号来实现对当前目标空间位置信息的精确化获取,保证目标定位实现效果。在无源定位技术中,可应用 TDOA 定位算法^[2]。TDOA 定位算法可以实时接收和处理接收站采集的信号,并结合信号到达时间等数据,精确化地

定位辐射源的当前空间位置。在 TDOA 定位算法中,主要应用了 Chan 氏算法和 Taylor 级数算法。为提升 TDOA 定位算法的性能,本文重点介绍和分析了 Chan 氏算法和 Taylor 级数算法在不同基站配置下的定位精度卡拉美罗下界^[3],并结合测量误差的均方差,实现对卡拉美罗下界的逼近,提升 TDOA 无源定位的性能。

1 基于民用移动通信信号的无源定位技术概述

1.1 基于民用移动通信信号的无源定位系统构建

基于民用移动通信信号的无源定位系统的模型如图 1 所示。该系统应用了多种移动基站和接收站,可以精确定

作者简介:朱睿(1981—),本科,中级工程师,研究方向为终端、大数据;余德源(1992—),本科,高级工程师,研究方向为终端、大数据;孙利军(1984—),本科,中级工程师,研究方向为 5G 无线网络;魏鸿斌(1990—),本科,中级工程师,研究方向为 5G 无线网络;成静静(1984—),硕士,高级工程师,研究方向为 5G 无线网络。

位空中目标的坐标。一旦发现存在目标进入现象,该系统就会将辐射信号直接反射到在目标基站上。同时,接收站可实时接收和获取所需的反射波信号。结合用户的实际应用需求,其还能实时采集和关联目标反射信号、直达波信号,方便用户快速读取信号回拨后产生的时延值^[4]。

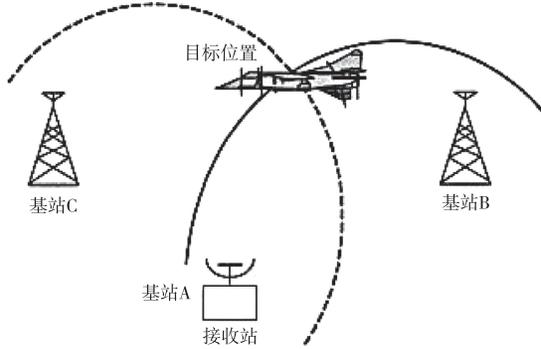


图1 基于民用移动通信信号的无源定位系统模型

1.2 无源定位误差来源

影响无源定位技术精确度的因素主要包含以下几种。(1)非视距传播。非视距传播指目标与接收站之间存在障碍物,导致测量人员存在视线被遮挡的问题。在进行TDOA定位时,测试人员需要精确地测量和估算电磁波从辐射源传播到接收站花费的时间,一旦出现非视距传播问题,就会导致TDOA定位值远超过实际时间差值,降低目标定位结果的精确性。(2)多径传播。多径传播指在不同路径下,同一接收机可能会实时接收同一个电磁波。因存在多径传播问题而出现的定位误差被称为“多径误差”。一旦出现多径误差,通常需对多径信号的幅度、相位等参数产生不良影响。为避免多径误差,技术人员可应用多重信号分类算法来消除多径误差。(3)噪声干扰。在目标定位参数测量过程中,很容易出现噪声干扰,且目标在观测站中的几何分布也会对无源定位结果的精确性产生不良影响。(4)目标在观测站中的几何分布。目标在观测站中的几何分布能影响无源定位结果的精确度,同一目标在多个接收站中呈现的几何分布存在一定的差异,接收站数量的不同也会对无源定位性能产生不良影响。(5)接收站位置的不确定性。一旦接收站出现位置不确定性,就很容易导致目标定位结果的精确性逐渐下降。

1.3 定位精度评价标准

1.3.1 均方误差和均方根误差

在均方误差的计算中,通常会涉及表征参数估计值与真实值偏差平方值。通过计算两者的期望值,即可获得均方误差。通过降低均方误差,可以最大限度地提高TDOA定位算法的精确度。均方根误差指预测值与真实值之间存在的偏差平方与观测次数比值的平方根。应用均方根误差,可以有效衡量观测值与真实值之间的偏差。

1.3.2 克拉美罗下界

克拉美罗下界指技术人员严格按照参数估计的相关要

求,计算出最终的无偏估计方差,并结合该计算结果,设置相应的下界。然后,确定待测参数,并利用测量矢量原理,对均方误差计算的下界进行矩阵逆处理。

2 经典TDOA定位算法分析

2.1 Chan氏算法

Chan氏算法是一种经典的TDOA定位算法,其实现过程如下。将目标到达各个基站的距离看作未知数,并对该未知数进行转化,获得线性方程组,如式(1)所示:

$$(r_{i,1}^*)^2 + 2R_{i,1}^* = x_i^2 + y_i^2 - 2(x_i - x_1)x - 2(y_i - y_1)y - x_1^2 - y_1^2 \quad (1)$$

其中, x_i, y_i 分别代表基站*i*的横纵坐标值; $R_{i,1}^*$ 代表基站*i*发射信号与基站1发射信号的到达时差; $r_{i,1}^*$ 代表多个基站所对应的距离差。

通过求解该方程组,可以粗略估计和确定目标位置坐标。通过计算目标位置到基站之间的距离,可以得到较为精确的目标位置坐标,提高目标位置定位精度^[5]。当双曲线出现多个交点时,需确定各个交点的位置,以精确地定位目标坐标。技术人员需构建3个基站,以精确定位目标坐标。

2.1.1 目标位置坐标计算

当基站的有效数量为3个时,技术人员可采用广义相关的方式,关联处理回波信号与直达波信号,获得3个有效达到测量值,并将3个测量值代入式(1)进行计算。然而,在计算之前需要已知 R_1 (目标到基站1之间的距离),其计算如式(2)所示:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2 - r_{2,1}^2 - 2r_{3,1}R_1 \\ x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2 - r_{3,1}^2 - 2r_{3,1}R_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

应用 R_1 可表示出应用式(2)计算得到的 x 和 y 值,并将该结果直接带入 R_1 计算式中,从而获得相应的一元方程,精确地计算出 R_1 ,并据此计算目标位置坐标 $[x, y]$,如式(3)所示:

$$R_1 = \|x - x_1\| \quad (3)$$

2.1.2 目标位置坐标计算

当基站有效数量大于3时,TDOA定位算法对应的测量值数目不小于式(1)中的未知值。此时,需充分发挥和利用TDOA定位算法的冗余特性,精确计算出目标的位置坐标^[6]。具体操作方法如下。经过测量,当无源定位系统的部署位置与目标位置相差较远时,可使用“ R ”表示目标与各个基站的距离,再应用最小二乘法对式(1)进行求解,并将最终计算结果设置为约束条件,对式(1)进行二次求解,以精确地计算出目标的位置坐标。

2.2 Taylor级数算法

Taylor级数算法是一种常用的TDOA定位算法,其主要参照Taylor级数,对目标位置坐标进行最小二乘估计。该算法具体实现流程如下。(1)基于Taylor级数,根据目标对象的大概位置,转变非线性方程,使其转变为相应的线性方程。

(2)调用最小二乘估计方法,可粗略估计目标位置的偏移量,并迭代计算目标位置坐标,确保估计值与真实值相近。

假设目标坐标的初始猜测值为非真实坐标值,即 $[x^0, y^0]$,同时应用Taylor级数算法,对该目标坐标进行展开,在忽略不计高次项的基础上应用最小二乘算法,确定目标位置的估计值计算,如式(4)所示:

$$\Delta=(G_a^T Q^{-1} G_a)^{-1} G_a^T Q^{-1} h \quad (4)$$

其中, Q 代表目标位置误差的协方差矩阵; G_a 代表目标位置误差测量矩阵; G_a^T 代表目标位置误差测量矩阵近似值。

在后期递归处理期间,首先需要设定门限,如果相邻目标位置估计值横纵坐标差之和小于门限值,则说明迭代操作结束。反之,需重新代入处理该迭代公式,并重新计算出新的 Δ 值,然后结合该 Δ 值进行最终目标位置坐标判定。完成迭代操作后,计算出 $[x^0, y^0]$ 值,即目标位置坐标估计值。

在计算目标位置估计值之前,技术人员需结合Taylor级数的展开情况,假设一个初始猜测值,并确保该猜测值与实际值接近,提高算法的收敛精确度,避免影响计算结果的精确性。此外,技术人员可以采用Chan氏算法中的最小二乘算法将最终计算出的目标位置估计值设置为目标对应的初始猜测值。

3 经典TDOA定位算法的性能数值仿真与分析

在仿真实验期间,为保证仿真结果的精确度,技术人员需构建好相应的坐标系。该坐标系以接收站为原点,运用了以下两种基站。(1)A类基站。该基站含有5个坐标,分别为: $[0, 0]$, $[-R, 0]$, $[R, 0]$, $[0, -R]$, $[0, R]$ 。(2)B类基站。该基站含有7个坐标,分别为 $[0, 0]$, $[\sqrt{3}R, 0]$, $\left[\frac{\sqrt{3}R}{2}, 1.5R\right]$, $\left[-\frac{\sqrt{3}R}{2}, 1.5R\right]$, $[-\sqrt{3}R, 0]$, $\left[-\frac{\sqrt{3}R}{2}, -1.5R\right]$, $\left[\frac{\sqrt{3}R}{2}, -1.5R\right]$ 。其中, $R=20$ km。结合以上两种基站坐标值,确定目标位置坐标为 $[25, 25]$ km,基于不同基站获得的测距

误差含有相同的均方差,分析各类基站网络结构下各定位算法的定位精度,发现在仿真条件保持不变情况下,B类基站网络结构拥有较高的算法性能。这是因为B类基站网络结构能多提供2组TDOA测量值,使用的信息量更大。

4 结语

为实现对民用移动通信信号的有效利用,本文构建了一种无源定位系统模型,并在不同基站配置情况下,分别仿真和分析了Chan氏算法与Taylor级数算法两种经典TDOA定位算法所对应的定位精度卡拉美罗下界。分析结果表明,当测量误差的均方差相对较低时,为更好地逼近卡拉美罗下界,技术人员可运用以上任意一种TDOA定位算法进行误差处理,以提升TDOA定位算法的性能,充分发挥和利用基于民用移动通信信号的无源雷达系统的优势,为推广和普及无源雷达系统提供技术支持。另外,本文不仅实现了对卡拉美罗下界的逼近和控制,还保证了基于民用移动通信信号的无源定位系统的应用效果,促进了移动通信行业的智能化、高效化、数字化发展。

参考文献

- [1] 李继明,张建辉,王晓涵,等.改进的鲸鱼优化算法与泰勒级数相结合的井下TDOA定位方法[J].实验技术与管理,2022,39(12):30-36,54.
- [2] 李蕊,邓亭强,窦修全.基于遗传算法优化的短波时差定位算法[J].电波科学学报,2023,38(6):1096-1104.
- [3] 苏石,中冲,王晨光.基于模糊集合改进的TDOA声源定位方法[J].计算机测量与控制,2024,32(4):271-278.
- [4] 赵越,李赞,李冰,等.TDoA定位盲区分析与节点部署策略研究[J].通信学报,2023,44(1):1-13.
- [5] 王森,王腾飞,姚铮,等.GNSS/5G观测融合定位算法[J].导航定位学报,2023,11(2):71-79.
- [6] 刘宝山,曾凌川,巩应奎,等.一种GNSS/5G抗差滤波联合定位算法[J].导航定位学报,2023,11(2):139-146.