

山东大学

硕士学位论文

无线定位算法研究

姓名：黄清明

申请学位级别：硕士

专业：通信与信息系统

指导教师：刘琚

20070422

## 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：郝清明 日期：2007.5.27

## 关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：郝清明 导师签名：刘永成 日期：2007.5.27

## 中文摘要

无线定位,就是指利用现有的无线通信网络资源,通过估计移动终端与各基站之间的信号参数,并在网络或者移动终端中借助一定的定位算法,确定移动终端的位置。自从美国 FCC(联邦通信委员会)于 1996 年发布 E-911 定位标准以来,无线定位技术就以其蕴涵的无穷商业潜力掀起了研究的热潮。近年来,越来越多的学者投入到无线定位技术的研究中,并发表了大量的研究论文和专利成果。

无线定位的实现分为两大模块:定位测量参数的估计及定位算法的实现。首先通过参数估计算法,从接收信号中提取相关参数,例如:到达时间(差)、到达角度等信息,然后利用相应的定位算法求解移动台的位置。由于实际通信环境的复杂性而引入的定位参数估计误差,以及求解表征移动台与基站之间几何位置关系的方程时引入的非线性误差,是影响定位成功率和精度的关键问题。

本文在广泛阅读国内外经典文献以及查阅定位方向的最新研究成果的基础上,对无线定位的关键技术进行了系统研究。针对其中的关键问题,提出了改进的方案。本文阐述了几种无线定位算法,重点对经典算法中的泰勒级数展开法和基于卡尔曼滤波的单一定位及混合定位做了研究和比较。通过研究仿真发现基于卡尔曼滤波的方法要优于泰勒展开法,并且混合定位的定位精度要高于单一定位的定位精度。

在非视距误差消除方面,本文阐述了两种基于卡尔曼滤波器的定位算法,对标准卡尔曼滤波器的迭代过程进行改进,可有效消除到达时间测量值中非视距误差的影响。“一种在 NLOS 环境下的混合定位算法”从消除 NLOS 误差的角度属于“一步法”,通过在卡尔曼定位算法中改变其迭代过程并引入数据融合技术及混合定位方法,使其对 NLOS 误差具有鲁棒性,达到了较高的定位精度;而“基于卡尔曼滤波的测量值重构及定位算法”属于“两步法”,将卡尔曼滤波器运用于定位参数估计中,通过分析 NLOS 误差的统计特性,将 NLOS 误差作为卡尔曼滤波器状态向量的一部分估计出来,进而实现测量值的重构,经过预处理的测量值输入到定位算法中也取得了很好的定位效果。经过性能分析与算法比较,本文提出的

两种定位算法适用于 NLOS 的复杂环境，定位成功率及精度都有很大提高。

此外，本文介绍了无线传感器网络定位技术的现状和发展，为今后的研究方向提供了一个参考。

**关键词：**无线定位；卡尔曼滤波器；非视距误差；混合定位。

## ABSTRACT

Wireless positioning, performed either in network or in mobile station, is to determine the geographic location of mobile station through the estimated measurements with the help of location algorithms and the communications resource. Since the E-911 location regulation submitted by the FCC in 1996, the wireless positioning technology has been promoted further as its inexhaustible commercial potential.

Nowadays, more and more scholars devote themselves to wireless positioning filed, and large numbers of research results and patents have appeared in resent years.

Two main modules are required in an entire location process: 1) estimation of the location parameters and 2) operation of the location algorithms. Firstly, the related parameters, such as the time or angle information, are distilled from the received signals with the help of the parameter estimation algorithms. And then, the parameters are inputted to the location module to yield the location estimation. The primary difficulties lie in the resistance against the estimating errors caused by the severe wireless channel, and the solution to the nonlinear equations which exhibit the geometric relation between the mobile station and the participant base stations.

Some systematic research work on the pirotal technology of wireless position has been done after referring to many classic or new naterials. Some positioning methods are improved for the key-difficulty. In this paper, some wireless positioning algorithms are proposed, and some comparisons have done between the classic Talor series algorithem and the hybrid/only motheds based on the Kalman filter. The simulation result shows that the methods based on he Kalman filter perform better than Talor series, and hybrid method has higher precision than only method.

To efficiently mitigate the NLOS error, two location algorithms are proposed through the modification on the standard Kalman iterative process. *Mobile Tracking Using Hybrid Measurements in NLOS Environments* introduce data fusion and hybrid positioning to iterative process, as an one-step method to mitigate NLOS error; *Tracking Based on Kalman Filtering for Measurements Restructuring and Mobile Location* as a two-step method, use the KF to estimate both the measurements and NLOS error, and

restructure the real measurements. Through the simulation and comparison with other methods, the two algorithms suit for the NLOS environment and have higher precision.

Further more, the development of positioning method in wireless sensor network is presented briefly, which introduced method to a new direction as a good example.

**Keywords:** wireless mobile location; Kalman Filter; NLOS (Non-Line of Sight) error; hybrid location.

## 英文缩写索引

AOA	Angle of Arrival	到达角
BS	Base Station	基站
CDF	Cumulative Distribution Function	累积分布函数
CEP/SEP	Circular/Spheric Error Probability	圆/球误差概率
CRLB	Cramer-Rao Lower Bound	克拉美罗下界
DOA	Direction of Arrival	到达方向
EKF	Extended Kalman Filter	扩展卡尔曼滤波器
GDOP	Geometric Dilution of Precision	几何精度因子
GIS	Geographic Information System	地理信息系统
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
JADE	Joint Angle Delay Estimation	联合角度-时延估计
KF	Kalman Filter	卡尔曼滤波器
LBS	Location Based Service	基于位置的服务
LKF	Linear Kalman Filter	线性卡尔曼滤波器
LOS	Line of Sight	视距
LS	Least Square	最小二乘
MAI	Multiple Access Interference	多址干扰
ML	Maximum Likelihood	极大似然
MS	Mobile Station	移动台
MSE	Mean Square Error	均方误差
NLOS	Non-Line of Sight	非视距
RMSE	Root Mean Square Error	均方根误差
RPE	Relative Position Error	相对定位误差
RSSI	Received signal strength indicator	接收信号强度
SNR	Signal to Noise Ratio	信噪比

SS	Signal Strength	信号强度
TDOA	Time Difference of Arrival	到达时间差
TOA	Time of Arrival	到达时间
UWB	Ultra-WideBand	超宽带
WLAN	Wireless Local Area Network	无线局域网
WLS	Weighted Least Square	加权最小二乘
WSN	Wireless sensor network	传感器网络



## 第一章 无线定位技术概述

### 1.1. 无线定位技术

定位，就是确定地球表面某种物体在某一参考坐标系中的位置<sup>[1]</sup>。无线定位通过测量无线电波从发射机到接收机的传播时间、时间差、信号场强、相位或入射角等参数来实施目标移动终端的二维或三维定位。

无线定位技术的研究始于 20 世纪 60 年代的自动车辆定位系统，随后该技术在公共交通、出租车调度以及公安追踪等范围内广泛应用。后来，随着人们对基于位置的信息服务的需求增多，无线定位技术得到更多研究者的关注，全球定位系统（GPS, Global Positioning System）的出现更使得无线定位技术产生了质的飞跃，定位精度得到大幅度的提高，可达到 10m 以内<sup>[2]</sup>。虽然直接利用 GPS 可以达到一种较为理想的定位效果，但是他需要专门的接收设备，对大多数用户来说并不是很方便。近年来，随着蜂窝移动系统的普及，定位技术开始用于蜂窝系统设计、切换、服务区确定、交通监控等方面。

移动通信中的各种电波传播参数，如到达时间（TOA, Time of Arrival）、达到时间差（TDOA, Time Difference of Arrival）、到达角度（AOA, Angle of Arrival）及信号强度（SS, Signal Strength）等都是可以直接利用的信息，于是利用这些移动通信系统本身的信息而发展起来的无线定位技术就成为近年来研究的热点。

蜂窝移动定位技术在公共安全服务（如：紧急医疗、紧急定位、紧急报警服务）、犯罪侦查、蜂窝系统设计、动态资源管理、位置敏感付费以及船舶管理、导航和智能交通系统（ITS）等多方面都有广泛的应用。尤其是在美国联邦通信委员会（FCC）强制要求所有的无线业务提供商必须在 2001 年 10 月前向 E-911 公共安全服务系统提供在 67% 的情况下、精度为 125m 的用户位置信息后<sup>[3-5]</sup>，蜂窝移动定位技术在世界范围内受到了高度的重视并进入深入研究。

### 1.2. 无线定位技术的研究现状

目前，无线定位可分为卫星无线定位和地面无线定位，卫星定位利用 GPS，

GLONASS<sup>[6]</sup>, 伽利略<sup>[7]</sup> (Galileo) 以及我国的北斗双星<sup>[8]</sup>等卫星系统的多个卫星实现移动目标的三维定位; 地面无线定位则通过测量无线电波的传播时间、信号场强、相位、入射角度等参数实现移动目标的二维定位。蜂窝无线定位属于地面无线定位系统。

GPS 系统技术成熟且已经投入民用, 具有定位精度高的优点。在手机中集成 GPS 接收机的方法利用 GPS 系统进行定位可达到较高精度, 但是需要对现有终端进行改进, 增加了手机成本和体积, 并且在室内环境或一些城市阴影地区 GPS 的性能将大大下降。

现有的蜂窝移动通信网中的无线定位系统按移动通信结构分为基于移动通信网络的无线定位、基于移动台的无线定位、混合定位等。当前的蜂窝无线定位系统中, 为了避免对移动终端增加额外开销, 多采用的是基于网络的定位方案, 由多个基站同时接收检测移动台发出的信号, 根据测量到的参数由网络对移动台进行定位估计。移动终端往往是普通手机, 这就需要对基站安装监测设备, 测量移动台发出的信号参数, 再通过适当的算法估计出移动台的大致位置。信号的传播很大程度上取决于移动通信信道特性, 但蜂窝移动通信系统的复杂信道环境却不可避免地会降低移动定位的精度, 使定位精度受到很大的影响。尤其是在闹市区, 由于障碍物阻挡引起的多径干扰和非视距误差以及蜂窝通信系统中“远近效应”引起的多址干扰都极大地影响移动定位的精度。因此, 克服各种误差影响, 提高定位精度, 是目前无线定位技术研究的热点。

目前主要的研究内容包括基本定位方法和定位算法的研究、非视距传播误差消除算法的研究、抗多径干扰时延估计及抗多址干扰算法的研究、数据融合技术的研究、定位技术实施方法和定位系统的性能估计研究等方面。

### 1.3. 无线定位的基本方法和性能评价

#### 1.3.1. 无线定位的基本原理

对移动台位置的估计通常需要两步: 第一步, 测量并估计 TOA、TDOA、AOA 或 SS 等参数; 第二步, 利用估计的参数, 采用相应的定位算法计算出 MS 的位置。根据所用参数的不同, 无线定位可分为下列三种方法。

## 1、 圆周定位

若已知移动台到基站 BS 的直线距离  $R$ ，则根据几何原理，移动台一定位于以基站 BS 所在位置为圆心，以距离  $R$  为半径的圆周上。如果已知移动台与三个基站之间的距离，以三个基站所在位置为圆心，移动台与三个基站的距离为半径画圆，如图 1.1 所示，则三个圆的交点即为目标移动台所在位置。

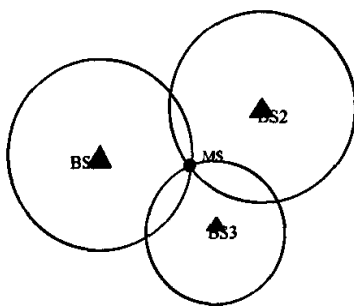


图 1.1 圆周定位方法

在实际无线电定位方法中，通过测量从目标移动台发出的信号以直线到达基站的时间（TOA），可以得到相应的距离，即可得到移动台的坐标位置，由于 TOA 与距离  $R$  的关系，三圆相交定位法又称为 TOA 定位法。实际上，早期采用的场强定位法，将场强信息转化为距离信息，也是采用圆周定位的原理。

## 2、 双曲线定位

若已知移动台 MS 到两个 BS 的距离差，根据双曲线的定义，MS 必定位于以这两个 BS 为焦点的双曲线上。测量移动台到三个 BS 的距离差即可得到两组独立的双曲线，这两条双曲线的交点即是 MS 的位置，如图 1.2。

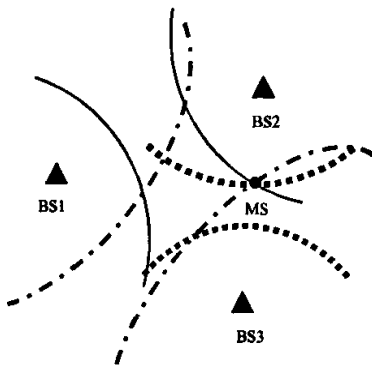


图 1.2 双曲线定位

在实际应用中，距离差一般由移动台发出的无线电波到达不同基站的时间差（TDOA）来获得，因此双曲线定位又称为 TDOA 定位。

3、 方位角定位（AOA 定位）

BS 测得电波从 MS 到 BS 的到达角 AOA，即可确定 MS 与 BS 之间的一条直线。如果测得 MS 对两个 BS 的到达角，则两条直线交点即可确定 MS 的位置，如图 1.3 所示。表 1.1 给出了以上三种基本定位方法的比较。

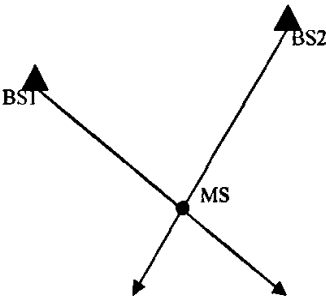


图 1.3 AOA 定位

表 1.1 三种基本定位方法比较

定位方案	几何意义	需要的最少基站数	对同步的要求
TOA	圆周	3	MS 与 BS 之间要求同步
TDOA	双曲线	3	BS 之间要求同步
AOA	方位线	2	不要求同步

1.3.2. 影响定位精度的因素

由于移动通信系统的通信环境复杂多变，因此各种依赖于通信信号测量的定位技术都受到各种因素的影响，严重影响了定位精度。

1. 多径传播

影响蜂窝无线定位的基本因素之一就是多径传播问题。在移动信道中，由于反射物体和散射体的存在会产生一个不断变化的环境，使得信号能量在幅值、相位和时间延迟方面产生弥散。这些效应导致发射信号经过不同的路径到达接收天线时的形式各异，显示出不同的时间和空间方位。不问的多径分量的随机幅值和

相位引起信号强度的扰动，从而产生小尺度衰落和信号畸变，使接收信号的信噪比严重下降，最终影响定位精度。多径传播是造成定位误差的主要原因，因此多径干扰的抑止是定位的关键技术之一。

## 2. NLOS (None Line of Sight) 传播

导致定位错误的另一个重要因素是移动台和基站之间的信号为非视距传播(NLOS)信号。视距(LOS, Line of Sight)传播是得到准确的信号特征测量值的必要条件。但是在城市和近郊，移动台和多个基站之间实现 LOS 传播通常是很困难的，更多的情况是通过反射和折射的方式进行传播的，从而影响了到达场强，接收电波的到达方向，以及电波传播时间。在这样环境下，即便没有多径干扰且系统能提供足够高的定时精度也同样会导致定位测量误差。

## 3. CDMA 多址接入干扰

由于 CDMA 系统个的各用户均使用同一频段，这种高容量也带来了远近效应和多址干扰。多址干扰会严重影响定位测量信号估计。在 CDMA 系统中通常采用功率控制来克服远近效应，但由于无线定位需要多个基站同时监测移动台发射的信号，功率控制只对服务基站起作用，对非服务基站，移动台的信号仍然受到严重的多址干扰，因而影响常规接收机的性能。研究表明，多址干扰会严重影响 TOA 和 TDOA 的定位精度。

## 4. 参与定位的基站数的限制

一般的定位技术需要至少两个或三个以上基站的参与。但是，在基站稀疏的环境下很难同时存在多个基站参与移动台定位，即使在基站稠密的城市环境中，也可能由于建筑物的遮挡而无法接收到视距传播的信号。另外，由于 CDMA 系统采用了功率控制技术来克服远近效应，当移动台靠近服务基站时，其它基站就很难接收到移动台发出的定位测量信号。

所以，如何克服这些不利因素的影响，提高定位精度以达到各种商业增值服务所要求的技术指标，是决定无线定位能否得到广泛应用并不断发展的前提，因此也是研究的热点。

### 1.3.3. 衡量定位算法优劣的性能指标

除了通用的估计精度指标，如：均方误差（MSE, Mean Square Error）、均方根误差（RMSE, Root Mean Square Error）、累积分布函数（CDF, Cumulative Distribution Function）等，针对定位技术领域对定位结果的评价，也有特殊的评价指标：

#### 1 克拉美罗下界（CRLB, Cramer-Rao Lower Bound）<sup>[9,10]</sup>

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。文献[6]中给出了 TDOA、TOA 及 AOA 定位的 CRLB 表达式。

#### 2 圆/球误差概率（CEP/SEP, Circular Error Probability/Spheric Error Probability）

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。

#### 3 几何精度因子（GDOP, Geometric Dilution of Precision）

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，即由 BS 与 MS 的位置关系造成的误差越大。所以，GDOP 是设计定位算法时经常需要考虑的指标，还可以作为组网时选择 BS 位置的参考。

#### 4 相对定位误差（RPE, Relative Position Error）

RPE 定义为定位精度与定位范围最大圆半径之比，把定位精度与定位范围联系起来考虑，是有实际意义的。

## 1.4. 本文贡献及结构安排

本文在广泛阅读国内外经典文献以及查阅定位方向的最新研究成果的基础上，对无线定位的关键技术进行了系统研究。研究定位系统的两大模块：定位测量参数估计及定位算法实现，并针对其中的关键问题，提出了新的定位方案。由

于实际通信环境的复杂性而引入的定位参数估计误差，以及求解表征移动台与基站之间几何位置关系的方程时引入的非线性误差，是影响定位成功率和精度的关键问题。

本文阐述了几种无线定位算法，重点对经典算法中的泰勒级数展开法和基于卡尔曼滤波的单一定位及混合定位做了研究和比较。通过研究仿真发现基于卡尔曼滤波的方法要优于泰勒展开法，并且混合定位的定位精度要高于单一定位的定位精度。

在非视距误差消除方面，本文阐述了两类基于卡尔曼滤波器的定位算法，对标准卡尔曼滤波器的迭代过程进行改进，可有效消除到达时间测量值中非视距误差的影响。“一种在 NLOS 环境下的混合定位算法”从消除 NLOS 误差的角度属于“一步法”，通过在卡尔曼定位算法中改变其迭代过程并引入数据融合技术及混合定位方法，使其对 NLOS 误差具有鲁棒性，达到了较高的定位精度；而“基于卡尔曼滤波的测量值重构及定位算法”属于“两步法”，将卡尔曼滤波器运用于定位参数估计中，通过分析 NLOS 误差的统计特性，将 NLOS 误差作为卡尔曼滤波器状态向量的一部分估计出来，进而实现测量值的重构，经过预处理的测量值输入到定位算法中也取得了很好的定位效果。经过性能分析与算法比较，本文提出的两种定位算法适用于 NLOS 的复杂环境，定位成功率及精度都有很大提高。

此外，本文介绍了无线传感器网络定位技术的现状和发展，为今后的研究方向提供了一个参考。

兼顾研究的深度与广度，本文的内容安排如下：

第一章，述无线定位技术的研究背景、现状、以及基本原理等相关基本知识体系。

第二章，介绍无线定位系统的第一模块：定位参数估计，给出 TOA、TDOA、AOA 等测量参数的估计方法。

第三章，介绍无线定位系统的第二模块：定位算法实现，给出各种定位方案的数学模型，及经典定位算法，重点介绍基于卡尔曼滤波的定位算法，非视距误差特点及其消除方法。

第四章，阐述本文提出的两种基于卡尔曼滤波的 NLOS 环境下的定位算法，并给出性能分析，通过与经典算法的比较得出本文提出的两种算法适用于 NLOS

环境下，且具有较高的定位精度。

第五章，主要讨论了无线传感器网络定位的特点及基本算法，作为无线定位算法的推广，分析了无线传感定位技术的发展方向以及我们下一步的研究方向。

第六章，总结本文的主要内容，并根据目前的研究成果，对未来研究进行了展望。



## 第二章 无线环境下定位参数估计

无线定位方案一般分为两大模块实现：首先对无线电波进行测量和捕获，并对与定位相关的参数进行估计；然后借助一定的定位算法，输入相关定位参数信息从而获得移动台的位置信息。其中，参数估计是定位的先决条件。然而在实际通信环境中，各种干扰严重影响了定位所需的测量值，如何从被污染的测量值中剔除误差的影响，使其尽可能的接近并反映真实值，是定位成功并保证一定精度的关键之一。本章根据定位所需参数种类的不同，介绍不同参数信息的提取以及估计方法。

### 2.1. TOA 测量值估计算法

基于时间的定位算法都是根据传播信号的到达时间 TOA 或到达时间差 TDOA 的估计值来进行位置估计。因此，TOA 或 TDOA 的测量精度对移动台定位精度有很大的影响。一般而言，由于多径传播的影响和带宽的有限性，利用传统的估计方法很难实现 TOA 的精确估计<sup>[11]</sup>。为此，人们再克服多径影响的高分辨率参数估计算法方面做了很多工作，如 MLS-Prony 算法<sup>[1]</sup>、Root-MUSIC 算法<sup>[1]</sup>、TLS-ESPTIT 算法<sup>[12]</sup>以及利用扩展卡尔曼滤波器实现的时延和多径联合估计方法<sup>[13]</sup>等。

### 2.2. TDOA 估计

TDOA 的估计方法<sup>[14~16]</sup>一般有两种：一种是求两个基站的信号到达时间 TOA 之差来获得 TDOA；另一种是采用相关技术，将一个基站接收到的信号与另一个基站接收到的信号进行相关运算以获得 TDOA 值。在实际应用中，如果可以进行绝对的 TOA 测量，就可以采用第一种方法。粗略的看，通过将 TOA 转变为 TDOA 后进行定位与直接用 TOA 进行定位相比，并没有什么优点。但是，当两个基站由多径引起的误差因有相同的反射体而具有相关性时，这种方法将提高估计精度。两个 TOA 值中，误差越相似，将 TOA 转换成 TDOA 所获得的增益就越高。但是，这种方法只有在能够通过传输时间估计 TOA 的情况下才有用，如果移动台与基站

之间不同步且没有参考时间,利用这种方法估计 TDOA 就比较难,而需要采用后一种估计方法。

在实际应用中,TOA 定位需要严格的全网时钟同步,而 TDOA 只需要基站间时钟同步就可以,是一种常用的定位方法。

## 2.3. AOA 估计

AOA 估计也叫 DOA (Direction of Arrival) 估计或 DF (Direction Finding) 在移动通信网络中,如果基站配备有智能天线,通常在上行链路中测量移动台信号到达基站的角度。

AOA 估计误差的主要来自三个方面<sup>[5,17-19]</sup>:

(1) 天线阵列放置偏差,测量角度时由于多径引起的背景噪声,非视距误差。其中由于移动台和基站之间没有直视路径而引起的非视距误差是移动定位中的关键问题。

(2) 对于窄带的信号的 DOA 估计,大多采用最大似然 (ML, Maximum Likelihood) 和基于子空间的方法。ML 属于多维非线性优化方法,计算量巨大;基于子空间的方法需要进行奇异值分解和谱峰搜索,计算量也比较大,且耗时,难以达到实时要求,无法用于实时跟踪定位。

(2) 传统的基于子空间的方法如 MUSIC, 和 Capon 提出的 MVE (Minimum Variance Estimator), ESPRIT 等,难以区别相位相关的多径信号。尤其是基于信号源数少于天线阵源的假设,在实际环境中难以达到。

针对以上问题,近年来研究者提出了很多改进方法,例如在 MUSIC 或 ESPRIT 等算法中引入空间平滑方法,利用空间平滑后的协方差矩阵代替原有的协方差矩阵即可使该类基于特征子空间的算法适用于多径环境。

## 2.4. SS(信号强度)估计

由于信号强度随着传播距离的增大而衰减,因此根据信号衰减值并结合一定的信号衰减模型就可以估计出信号传播的距离。基站测量来自移动台的信号强度,并根据已知的移动台发射信号强度估计出信号强度衰减值,从而将这一衰减值转

化为相应的传播距离，根据圆周模型估计移动台的位置。这一方法相对简单，不需要增加额外的硬件成本，但是也有很多问题亟待解决：在多径衰落环境中信号强度的估计精度不高，实际应用中不同环境下衰落模型的多样化以至信号衰减与传播距离的对应关系比较复杂。

## 2. 5. JADE (Joint Angle Delay Estimation,联合角度时延估计)

联合角度一时延估计<sup>[20]</sup>就是利用信道冲激响应的估计来确定多径参数中的波达方向角度和时延。

由于在 DOA 估计中的阵列流形与 JADE 中的空时流形具有对偶关系，因此在 DOA 估计中常用的 MUSIC、ESPRIT 等方法都可以推广到 JADE 中来。所不同的是：

(1) 在 JADE 中，“观测数据”是信道冲激响应估计，而 DOA 估计中则为阵列输出。

(2) 在 JADE 中，空时流形矩阵用角度和时延二者参数化，而在 DOA 估计中阵列流形只用角度参数化。

(3) 在 JADE 中，“信号”由路径衰落充当，而在 DOA 估计中则为窄带通信信号本身。

另外，DOA 估计要求天线阵元数目多于路径数目，在 JADE 中并不做此要求，JADE 的参数可辨识条件是  $Q < MPL$  (其中， $Q$ ：路径数目， $M$ ：天线阵元个数， $P$ ：一个码元间隔内的采样点数， $L$ ：信道冲激响应包含的码元个数)。

### 第三章 无线定位的典型算法

在第二章中，我们可以根据相关的参数估计方法获得一定精度的定位参数，完成了定位的第一个步骤。由多个 TOA/TDOA/AOA 或其他测量值就可以构成一组关于移动台位置的圆周/双曲线/方位线方程组，这些方程组一般由非线性方程构成，求解比较复杂，目前，已经提出了多种具有不同精度和计算复杂性的算法。本章我们介绍几种相应的定位算法，结合上一章估计出的参数实现移动台定位。在本章中，首先介绍各种定位方案的基础知识及数学模型；然后介绍几种经典的定位算法。

#### 3.1. 各种定位方案的数学模型

##### 3.1.1. 定位问题的最小二乘 (LS, Least Square) 表示

在无线定位系统中，对移动台进行定位估计采用最广泛的算法是最小二乘 (LS) 算法，该算法广泛应用于使用距离（或能够转化为距离值）的定位系统中。在蜂窝网络中，只要根据某种测量值建立了相应的特征方程，就能求解出移动台的位置。

设根据测量值建立的方程为：

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (3-1)$$

其中， $\mathbf{Y}$  是已知的  $n \times 1$  维向量， $\mathbf{X}$  是  $m \times 1$  维未知向量， $\mathbf{A}$  是  $n \times m$  矩阵。如果  $n > m$  则系统方程数大于未知数数目，可以利用最小二乘法获得  $\mathbf{X}$  的最优估计。

最小二乘的思想是使得误差的平方和最小，即

$$f(\mathbf{X}) = (\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{Y})^T (\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{Y}) \quad (3-2)$$

对以上的代价函数求最小值，如果  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$  是非奇异的，可得

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Y} \quad (3-3)$$

在实际应用中，可以根据每个测量值的精度，在最小二乘中采用不同的权值，

合理选择加权矩阵  $W$ ，可有效提高定位精度。理论可以证明，当  $W$  取测量值误差方差矩阵的逆矩阵时可使估计误差的方差最小，但实际应用中如何定义  $W$  加权矩阵还有待进一步研究。

### 3.1.2. TOA 定位模型

#### 1、圆周模型 (CLOP, Circular Line of Position) [21]

TOA 定位的圆周模型如图 1.1 所示。由 MS 与各 BS 的位置关系得：

$$r_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad (3-4)$$

将上式两边平方再移项，得：

$$X_i x + Y_i y - 0.5r^2 = \frac{1}{2}(X_i^2 + Y_i^2 - r_i^2), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3-5)$$

把  $x$ 、 $y$ 、 $r^2$  看作未知数，则以上为线性方程。但对于  $x$ 、 $y$ 、 $r$  之间的关系  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ，实际算法中要加以考虑。

下面我们来推导测量误差协方差矩阵  $\Psi$ 。

设  $r_i = r_i^0 + n_i$ ，其中  $r_i^0$  为 MS 与第  $i$  个 BS 之间距离的真实值， $n_i$  为相应误差。

因为在测量方程中， $r_i$  以平方形式出现，所以，将其两边平方，得

$$r_i^2 = (r_i^0 + n_i)^2 \approx r_i^{0^2} + 2r_i^0 n_i \quad (3-6)$$

误差项为

$$\varepsilon_i = r_i^2 - r_i^{0^2} \approx 2r_i^0 n_i \quad (3-7)$$

则测量误差协方差矩阵  $\Psi$  为

$$\Psi = E[\varepsilon \varepsilon^T] = BQB \quad (3-8)$$

其中， $\varepsilon = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \dots \ \varepsilon_N]^T$ ， $B = \text{diag}(2r_1^0, 2r_2^0, \dots, 2r_N^0)$ ， $Q = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_N^2)$ ， $\sigma_i^2$  是第  $i$  个测量值测量误差的方差。

#### 2、相交线模型 (LLOP, Linear Line of Position) [22]

由 TOA 测量方程，得

$$r_1 = \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \quad (3-9)$$

$$r_2 = \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} \quad (3-10)$$

将上述两方程两边平方再相减，得到两个圆周的相交线方程：

$$(X_2 - X_1)x + (Y_2 - Y_1)y = \frac{1}{2}((X_2^2 + Y_2^2) - (X_1^2 + Y_1^2) + r_1^2 - r_2^2) \quad (3-11)$$

上式为关于  $x, y$  的线性方程，其几何意义如图 3.1。三个 BS 可得到两个这样的线性方程，求解它们组成的方程组，即可求得 MS 坐标  $(x, y)$ 。

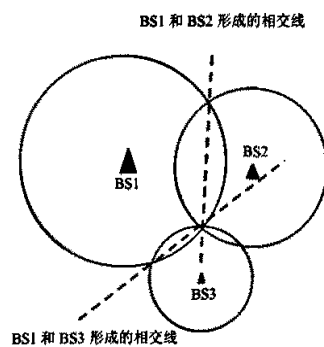


图 3.1 TOA 定位的 LLOP 模型

但在实际的算法应用中，必须考虑到由各种误差造成的两个圆不能相交的情况。这在几何上存在以下两种可能，如图 3.2。

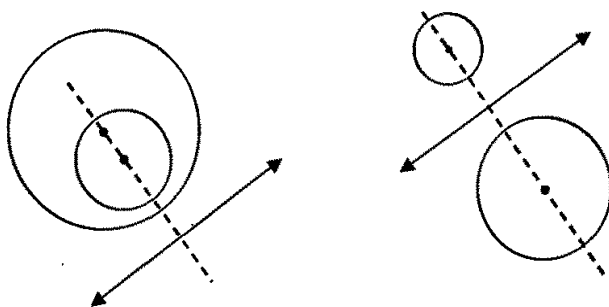


图 3.2 圆周没有交点的两种情况

从 LLOP 模型的推导过程我们可以看出，从图形及几何关系上考虑与从方程的变换形式上考虑是等价的。经变换得到的线性方程仍可以用来做 LS。所以，我们既可以对原始的圆周测量方程做 LS，也可以对原方程进行变形后再做 LS。研究

对原方程进行变形和简化的新方法，也可能找到新的 TOA 定位模型。

### 3.1.3. TDOA 定位的双曲线模型

TDOA 定位的双曲线模型如图 1.2 所示。TOA 和 TDOA 的测量方程分别为

$$r_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad (3-12)$$

$$r_{i,1} = r_i - r_1 = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \quad (3-13)$$

利用这两个基本方程得到：

$$r_{i,1}^2 + 2r_{i,1}r_1 = K_i - 2X_{i,1}x - 2Y_{i,1}y - K_1 \quad (3-14)$$

其中  $K_i = X_i^2 + Y_i^2$ ，整理得：

$$X_{i,1}x + Y_{i,1}y + r_{i,1}r_1 = \frac{1}{2}(K_i - K_1 - r_{i,1}^2) \quad (3-15)$$

将  $x$ ， $y$ ， $r_1$  看成未知数，则化为线性方程组。

下面我们来推导 TDOA 定位中，测量误差协方差矩阵  $\Psi$ 。

TDOA 测量值的误差矢量为：

$$\mathbf{e} = c\mathbf{B}\mathbf{n} + 0.5c^2\mathbf{n} \bullet \mathbf{n} \quad (3-16)$$

其中  $\bullet$  代表 Schur 乘积， $\mathbf{B} = \text{diag}\{r_2^0, r_3^0, \dots, r_N^0\}$ ， $\mathbf{n} = [n_{21} \ n_{31} \ \dots \ n_{N1}]^T$ 。

则误差协方差矩阵为

$$\Psi = E[\mathbf{e}\mathbf{e}^T] = c^2\mathbf{B}\mathbf{Q}\mathbf{B} \quad (3-17)$$

其中， $\mathbf{Q} = \mathbf{H}\sigma_{TOA}^2\mathbf{H}^T$ ， $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$ ， $\mathbf{H}$  的这种表示说明各 TDOA

由其它 BS 与第一个 BS 之间的到达时间差得到。

### 3.1.4. AOA 定位的方位线模型

AOA 定位的方位线模型如图 1.3 所示。AOA 测量方程为：

$$\tan(\beta_i) = \frac{y - Y_i}{x - X_i}, \quad i = 1 \dots N \quad (3-18)$$

求解上述非线性方程组，可以得到 MS 位置。

由于非视距传播对 AOA 定位影响很大等原因，单纯的 AOA 定位往往精度较低。但 AOA 与 TOA 或 TDOA 结合的混合定位可以达到较高精度，在这里 AOA 可被看作辅助信息，既可以提高定位精度，又可以在 BS 数目较少时帮助定位。

### 3.2. 典型的定位算法

由以上各种定位方案的基本模型发现各种定位算法最后都将归结到非线性方程的求解上，现有的各种定位算法，可分为具有解析表达式解的算法和递归算法两种。

#### 3.2.1. 具有解析表达式解的算法

这类算法包括 Fang, Chan, Friedlander, SX, SI 等<sup>[23-26]</sup>，算法的特性总结如下：

##### 1. Fang 算法

Fang 算法是一种 TDOA 算法，利用 3 个基站对 MS 进行二维位置定位。为简化计算，首先以基站 1 作为坐标原点，基站 2 为坐标轴上某一点建立坐标系。该方法通过对双曲线方程进行线性近似，获得对移动台位置的估计。

##### 2. Chan 算法

Chan 算法也是一种 TDOA 算法。该算法的特点是计算量小，在噪声服从高斯分步的环境下，定位精度高。但在非视距 (NLOS) 环境下，Chan 算法的定位精度显著下降。当有效测量基站为 3 时，假定  $r_1$  已知，则移动台的坐标  $(x, y)$ ，可以用已知测量值以及  $r_1$  表示，最后将  $(x, y)$  代入  $r_1 = \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2}$  中，可以解得  $r_1$ ，进而求得移动台的坐标  $(x, y)$ 。当有效测量基站数为 4 个以上时，该方法能够利用网络提供的所有 TDOA 测量值并取得更好的计算效果。此时，TDOA 测量值多于未知量数目，因此，初始非线性方程组首先转换为线性方程组，然后采用加权最小二乘算法得到初始解，再利用附加变量等已知的约束条件对第一步的初



始解进行优化,从而使估计位置得到改进。

### 3. Friedlander 算法

Friedlander 算法主要利用了最小二乘 (LS) 和加权最小二乘 (WLS) 误差判据来求解定位问题。该算法将服务基站设为坐标原点,从而简化了计算。该算法对测量方程组线性化后采用 LS 或 WLS 求解。仿真结果表明,在基站数目为 4 时,采用 LS 和 WLS 的结果是一致的;当基站数多于 4 个时,采用 WLS 得到的结果要优于 LS。

### 4. 球面相交 (SX) 与球面插值 (SI) 算法

这类方法可以得到定位估计的次优解。该类方法并不是对测量误差最小化,从而求得定位估计的最小二乘解,而是对测量方程中产生的某一残差求最小化。由于在求解过程中假定  $r_1$  已知且  $(x, y)$  和  $r_1$  相互独立,并通过消去  $r_1$  求解,忽略了三者之间的相互联系,使后续计算中相关参量的自由度下降,因而获得的位置估计是次优的。

#### 3.2.2. 递归算法

除了有解析表达式的算法外,还有泰勒序列展开 (Taylor) 法及分类征服 (DAC) 等递归算法可以进行位置估计<sup>[1]</sup>。

##### 1. Taylor

基于初始估计,在每一次递归中通过求解 TDOA 测量误差的局部最小二乘解来改进估计。需要有一个与实际位置比较接近的初始估计位置来保证算法收敛,且计算量较大。

##### 2. DAC (分类征服)

其基本思想是将 TDOA 测量值进行分组,每组大小等于未知量的数目,分别在每一组求解出未知量,再将各组的解进行适当组合得到最终解。当 TDOA 噪声较小时该算法比直接利用所有的测量值进行定位估计计算复杂性显著下降,能够达到最优性能。但是,该算法要求的各种条件在实际蜂窝网络中难以同时满足,因此与其他算法相比,该算法的实际意义不大。

### 3.3. 基于卡尔曼滤波的定位方法

以上介绍的各种定位方法均属静态定位的方法，即利用某个时刻的到达时间或到达角度测量值估计出该时刻 MS 的位置坐标。由于 MS 在移动过程中的位置是连续变化的，故 MS 在某一时刻的位置与其在上一时刻的位置有关，所以我们采用跟踪定位的方法来提高定位精度。

#### 3.3.1. 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波器 (Kalman Filter, KF) 由于其良好的跟踪性能，已经被广泛应用于雷达定位与导航中。随着对无线定位研究的兴起，人们开始研究把卡尔曼滤波器应用于对移动台的定位中<sup>[27~31]</sup>。

卡尔曼滤波是一种线性最小方差估计，算法具有递推性，适用于对多维随机过程进行估计，卡尔曼滤波器主要由两个方程实现：

状态方程：

$$s(k+1) = As(k) + w(k) \quad (3-19)$$

测量方程：

$$z(k) = Gs(k) + v(k) \quad (3-20)$$

其中， $s(k)$  是状态向量， $A$  是转移矩阵， $w(k)$  是扰动向量， $w(k)$  的协方差矩阵为  $Q(k)$ ， $z(k)$  是测量向量， $G$  是测量矩阵， $v(k)$  是测量噪声， $v(k)$  的协方差矩阵为  $R(k)$ 。

状态转移方程将某一时刻和下一时刻的状态向量相联系，测量方程将测量向量和同一时刻的状态向量相联系。 $w(k)$  和  $v(k)$  反映了状态变化和测量噪声的随机性。因此，这两个方程建立了第  $k$  时刻的状态值、测量值和测量值历史信息之间的关系，给定状态向量和估计误差协方差的初始值之后，通过迭代，就可以根据测量值序列估计出相应时间点上的状态值。

具体迭代过程见式(3-21)~(3-23)。

预测方程：

$$\begin{cases} \hat{s}(k+1/k) = A\hat{s}(k/k) \\ P(k+1/k) = AP(k/k)A^T + Q(k) \end{cases} \quad (3-21)$$

估计方程:

$$\begin{cases} \hat{s}(k/k) = \hat{s}(k/k-1) + K(k)e(k) \\ P(k/k) = [I - K(k)G]P(k/k-1) \end{cases} \quad (3-22)$$

新息方程:

$$\begin{cases} e(k) = z(k) - G\hat{s}(k) \\ K(k) = P(k/k-1)G^T[GP(k/k-1)G^T + R(k)]^{-1} \end{cases} \quad (3-23)$$

其中,  $\hat{s}(k/k)$  和  $\hat{s}(k/k+1)$  分别表示状态估计向量和状态预测向量,  $P(k/k)$  和  $P(k+1/k)$  分别表示估计误差和预测误差的协方差矩阵,  $Q(k)$  是状态噪声的相关矩阵,  $R(k)$  是测量噪声的相关矩阵,  $e(k)$  是新息向量,  $K(k)$  是卡尔曼增益, 上标  $T$  表示矩阵的转置。

我们之所以选择用卡尔曼滤波器实现 MS 的跟踪定位, 原因在于卡尔曼滤波器具有以下优点:

(1) 它不仅利用了当前时刻的测量值, 而且还利用了上一时刻的估计值, 这个附加信息使得估计误差可以大大的减小。

(2) 利用上一时刻的位置信息作为参考点, 在 BS 个数少于某种定位方案要求的最少 BS 个数时也可以完成定位, 放宽了对 BS 数目的限制。在这里, 上个时刻的估计位置可看作附加信息。

(3) 状态向量既可以是 MS 各个方向上的位置和速度向量, 又可以是单个坐标上 MS 的位置坐标。定位时, 既可以用卡尔曼滤波器对 TOA、TDOA、AOA 测量值进行处理, 直接估计出 MS 位置, 又可以先用静态定位的方法估计出位置, 再用卡尔曼滤波器对估计的位置进行平滑。

(4) 用卡尔曼滤波器还可估计出 MS 的速度。

### 3.3.2. 卡尔曼滤波器的状态方程和测量方程的设计

利用卡尔曼滤波方法实现定位，关键就是设计出卡尔曼滤波器两个方程中的矩阵和向量，使之既能较准确的对 MS 的运动状态和测量过程建模，又能符合卡尔曼滤波器的形式，通过卡尔曼滤波器的迭代算法得到较准确的定位结果。我们设计的卡尔曼滤波器形式如下。

状态方程中各矩阵、向量为：

$$s(k+1) = As(k) + w(k) \Rightarrow \begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ v_x(k+1) \\ v_y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ v_x(k) \\ v_y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_x(k) \\ w_y(k) \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

其中， $s(k)$  中的变量分别表示 MS 在第  $k$  个时刻  $x$  和  $y$  方向的位置坐标和速度， $\Delta$  是采样间隔， $w(k)$  的协方差矩阵为  $Q(k)$ 。

测量方程形式同  $z(k) = Gs(k) + v(k)$ ，其中  $z(k)$  在不同定位方法中分别用 TOA、TDOA、AOA 测量值或它们的组合来表示。下面我们分别给出各种单一定位方法的测量向量  $z(k)$ 、测量矩阵  $G$ 、测量噪声  $v(k)$  及其协方差矩阵的设计。

#### 1. TDOA 定位

利用 TDOA 测量值的线性 KF 方程<sup>[27]</sup>，其主要参数设计如下：

测量值向量：

$$z_{TDOA}(k) = u - r_1 \rho \quad (3-25)$$

测量矩阵：

$$G_{TDOA} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_M - x_1 & y_M - y_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

测量噪声向量：

$$v_{TDOA}(k) = cB(k)n(k) \quad (3-27)$$

$$\text{其中 } u = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \|s_2\|^2 - \|s_1\|^2 - r_{21}^2 \\ \dots \\ \|s_M\|^2 - \|s_1\|^2 - r_{M1}^2 \end{bmatrix}, s_i = \begin{bmatrix} x_i & y_i \end{bmatrix}^T \text{ 是第 } i \text{ 个基站的坐标, } p = \begin{bmatrix} r_{21} \\ \dots \\ r_{M1} \end{bmatrix},$$

$B(k) = \text{diag}\{\bar{r}_2(k), \bar{r}_3(k), \dots, \bar{r}_M(k)\}$ ,  $n_{\text{TDOA}}(k) = [n_{21}(k) \ n_{31}(k) \dots \ n_{M1}(k)]^T$ ,  $\bar{r}_i(k)$  是移动台与第  $i$  个基站之间的距离值,  $c$  是无线电传播速度,  $n_{i1}$  是第  $i$  个 TDOA 测量噪声。

$v_{\text{TDOA}}(k)$  的协方差矩阵为

$$C_{\text{TDOA}}(k) = c^2 B(k) R_{\text{TDOA}}(k) B(k) \quad (3-28)$$

$$\text{其中, } R_{\text{TDOA}}(k) = H \sigma_{\text{TDOA}}^2 H^T, H = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \sigma_{\text{TDOA}}^2 \text{ 是对角矩阵, 其}$$

维数为 TDOA 的个数 (实际是 TOA 的个数)。

## 2. TOA 定位

利用 TOA 测量值的线性 KF 方程<sup>[22]</sup>, 其主要参数设计如下:

测量向量:

$$z_{\text{TOA}}(k) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \|s_2\|^2 - \|s_1\|^2 - r_2^2 + r_1^2 \\ \dots \\ \|s_M\|^2 - \|s_1\|^2 - r_M^2 + r_1^2 \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

测量矩阵:

$$G_{\text{TOA}} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_M - x_1 & y_M - y_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-30)$$

测量噪声向量:

$$v_{\text{TOA}}(k) = cB(k)n_{\text{TOA}}(k) - c\bar{r}_1 n_1(k) \quad (3-31)$$

其中  $s_i = [x_i \ y_i]^T$  是第  $i$  个基站的坐标向量,  $B(k) = \text{diag}\{\bar{r}_2(k), \bar{r}_3(k), \dots, \bar{r}_M(k)\}$ ,  $n_{\text{TOA}}(k) = [n_2(k) \ n_3(k) \dots \ n_M(k)]^T$ ,  $n_1(k)$  为  $(M-1) \times 1$  维的向量, 其中元素均为  $n_i(k)$ 。

$v_{\text{TOA}}(k)$  的协方差矩阵为:

$$\mathbf{C}_{TOA}(k) = c^2 \mathbf{B}(k) \mathbf{R}_{TOA}(k) \mathbf{B}(k) + c^2 r_1^{02} \boldsymbol{\sigma}_1^2 \quad (3-32)$$

$$\text{其中, } \mathbf{R}_{TOA}(k) = \begin{bmatrix} \sigma_2^2 & & & \\ & \sigma_3^2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \sigma_N^2 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\sigma}_1^2 = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \dots & & \\ & & \dots & \\ & & & \sigma_1^2 \end{bmatrix}_{(N-1) \times (N-1)}$$

### 3. AOA 定位

由于 MS 位置与 AOA 测量值间具有线性关系:

$$0 \approx -x \sin \beta + y \cos \beta + r_1 n_\beta \quad (3-33)$$

其中  $\beta$  是 MS 与参考 BS 之间的 AOA 测量值,  $n_\beta$  是 AOA 测量误差。

根据上式建立测量方程, 可得到 AOA 定位中卡尔曼参数的设计<sup>[28]</sup>:

测量向量:

$$\mathbf{z}_{AOA}(k) = 0 \quad (3-34)$$

测量矩阵:

$$\mathbf{G}_{AOA} = [-\sin \beta / r_1 \quad \cos \beta / r_1 \quad 0 \quad 0] \quad (3-35)$$

测量噪声:

$$\mathbf{v}_{AOA}(k) = n_\beta \quad (3-36)$$

其协方差为:

$$\mathbf{C}_{AOA}(k) = \sigma_\beta^2 \quad (3-37)$$

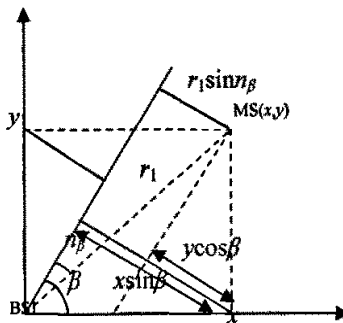


图 3.3 AOA 方程的线性近似

### 3.4. 非视距误差的消除

电波在传播过程中, 由于障碍物的阻挡, 只能以反射、折射、散射等方式传播。由于传播路径不是直线, 所以叫做非视距传播, 由此给测量值带来的误差称为非视距误差 (NLOS, Non-Line of Sight)。NLOS 会造成 TOA 及 TDOA 测量值产生超量时延, 对 AOA 发生弥散。将这种具有较大误差的测量值应用于移动台的定位估计, 使估计位置出现较大的偏差。由于在都市环境中 NLOS 传播普遍存在, 要提高都市环境下对 MS 定位的准确性, 就必须研究如何鉴别和消除 NLOS 误差。本章将分析 NLOS 环境中 TDOA 和 TOA 测量值的误差统计特性, 对现有鉴别和抑制 NLOS 误差的各种方法进行分析, 并给出两种降低 NLOS 误差影响从而提高定位精度的方法。

#### 3.4.1. 非视距误差模型及其特点

NLOS 误差对定位精度的影响很大, 且无法通过提高系统接收机的测量精度来消除。Nokia 的现场测量结果表明, GSM 系统中平均 NLOS 误差高达 500~700m<sup>[32]</sup>。

以 TOA 测量值为例, 若  $r_m(t_i)$  表示在  $t_i$  时刻从 MS 到第  $m$  个 BS 的距离测量值 (由 TOA 测量值乘以电波传播速度获得), 则  $r_m(t_i)$  等于真实距离  $L_m(t_i)$  与标准测量误差  $n_m(t_i)$  和非视距误差  $NLOS_m(t_i)$  之和, 如式(3-38)所示。

$$r_m(t_i) = L_m(t_i) + n_m(t_i) + NLOS_m(t_i) \quad (3-38)$$

其中,  $n_m(t_i)$  是测量误差, 服从  $N(\mu, \sigma)$  分布,  $NLOS_m(t_i)$  为非视距误差。

NLOS 为一种具有正均值的随机误差, 在不同的信道环境中可能服从指数分布、均匀分布、高斯分布活 Delta 分布, 具体表达式如下<sup>[33]</sup>。

指数分布:

$$D(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{\tau_{rms}} e^{-\frac{\tau}{\tau_{rms}}}, & \tau > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3-39)$$

均匀分布:

$$D(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{3}\tau_{rms}}, & 0 < \tau < 2\sqrt{3}\tau_{rms} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3-40)$$

Delta 分布:

$$D(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{2}[\delta(\tau) + \delta(\tau - 2\tau_{rms})], & \tau > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3-41)$$

其中,  $\tau_{rms}$  是服从对数正态分布的随机变量,  $\tau_{rms} = T_1 d^\varepsilon \xi$ ,  $d$  是收发机之间的距离, 以千米计,  $\xi$  是服从对数正态分布的随机变量 ( $10\log\xi$  是零均值、标准差为  $\sigma_\xi$  的服从正态分布的随机变量),  $T_1(\mu s)$ 、 $\varepsilon$ 、 $\sigma_\xi$  均为表示环境的参数。

另外, 还有 CDSM 模型(Circular Disk of Scatters Model)<sup>[32]</sup>、ESM 模型(Effective Scatter Model)<sup>[34]</sup>、考虑多径的散射环 (ROS)、散射盘 (DOS)、散射高斯模型<sup>[35]</sup>以及时变的非视距误差模型<sup>[36]</sup>。

根据非视距误差产生的原因及对上述误差模型的分析, 得到 TOA 中非视距误差的如下特点:

由于 TOA 测量值中 NLOS 误差的分布与电波传播路径上障碍物的分布有关, 所以 NLOS 误差具有随机性的特点<sup>[37]</sup>; 其次, NLOS 误差是电波在传播途中遇障碍物发生超量延迟所致, 所以 TOA 中的 NLOS 误差总是正值; 再次, 式 (3) 说明, TOA 测量值可以看作是真实的 TOA 与标准测量误差及 NLOS 误差之和, 由于这两种误差的产生原因不同, 因此是相互独立的, 基于这种独立性我们可以将两种误差加以鉴别并消除。

### 3.4.2. 非视距误差的消除

混合定位技术就是一种采用多种不同的电波测量值对 MS 进行定位估计, 以取得比单一定位技术更高定位精度的技术<sup>[28, 38, 39]</sup>。随着移动通信技术的发展, 可获得的测量值种类大大增加, 可以综合考虑不同种类测量值对非视距误差的依赖型不同, 从而利用数据融合技术加以消除。从消除非视距误差的步骤来看, 通常有两种方法: 一步法和两步法。

#### 1. 一步法



“一步法”综合考虑定位算法及信号非视距传播引入的超量误差，通过设计定位算法，增强定位结果对测量值中非视距误差的鲁棒性，从而减小非视距误差对定位结果的影响。

“一步法”不对测量值进行消除 NLOS 的预处理，相对较为简单，但是，它在实际应用中常遇到困难。首先，现有的“一步法”大多需要有较多 BS 参与定位，对分组后获得的多个定位结果进行冗余加权<sup>[40]</sup>，这在实际中有时难以做到。由于远近效应问题，蜂窝网络对移动台及基站进行功率控制，当 MS 发出定位请求时，能检测到信号的 BS 可能很少，有时甚至少于完成一次定位所需要的最少 BS 数，更不用说得到很多冗余的定位结果来进行取舍或加权平均了。其次，当 MS 对所有 BS 均不存在视距路径时，现有“一步法”的定位精度将大大降低。随着城市中高大建筑物的增多，这也将是很普遍的情况。这些问题无疑都限制了现有“一步法”的具体实现。

## 2. 两步法

“两步法”将参数估计与定位算法分别考虑，在第一步参数估计过程消除非视距误差，进行视距重建，在第二步中用 LOS 情况下适用的普通定位算法进行位置估计就可以达到一定的定位精度。首先，对非视距误差进行鉴别，其思想是通过考察非视距误差的统计特性，找出带误差的测量值与真实值之间的关系，消除 NLOS 误差，重建真实值。在这里只介绍一种典型的 Wylie 法<sup>[41]</sup>：

需要用到标准测量误差标准差的先验信息，还需考虑距离测量值的时间历史。分两步进行鉴别：

Step1、假设检验： $H_0 : \hat{\sigma}_m = \sigma_m$ ， $H_1 : \hat{\sigma}_m > \sigma_m$ 。

Step2、残差分析秩测试：先用各个时刻的测量值得到各个时刻 MS 位置的估计值，由位置估计值计算出距离（差），求实际测量的距离（差）与计算得到的距离（差）之间的残差。在各时刻对每个 BS 的残差进行排序，残差最大的次数最多的 BS 被认为是非视距的 BS。或者说，残差最大的次数越多的基站，有非视距误

差的可能性也就越大。然后利用 TOA 测量值的时间历史来重构真实的 TOA，估计误差较小但实时性较差。

“两步法”通常简便易行，且不需要再对定位模块进行改动就可达到克服 NLOS 误差的目的。用“两步法”消除非视距误差，最根本的就是要找到 NLOS 误差与真实测量参数之间的关系。

## 第四章 NLOS 环境下的定位算法

大多数经典算法在 LOS 环境中性能良好,能够满足 FCC 的 E-911 的定位精度要求;但是实际环境尤其是城市中大多是 NLOS 环境,干扰,多径等影响大大削弱了定位精度。本文提出了两种适用于 NLOS 环境的基于卡尔曼滤波的混和定位算法,从去除 NLOS 误差的角度上,第一种属于“一步法”,第二种属于“两步法”。

### 4.1. 一种在 NLOS 环境下的混合定位算法

NLOS 误差是影响无线定位精度的一大因素。为了充分利用各种测量信息及其时间历史,并适应 NLOS 环境,本文提出了一种使用混合测量值的移动台跟踪算法。首先,我们用 KF 对 MS 进行跟踪,将 TDOA、TOA、AOA 的测量方程线性化并统一形式,将其结合构成混合定位方法。其次,在混合定位方法中加入“测量值选择”和“位置推算”机制,增强算法对于 NLOS 误差的鲁棒性。实验表明,用 KF 实现的跟踪方法比静态定位的定位精度高,提出的方法在各种环境下均能有效消除 NLOS 误差。

#### 4.1.1. 基本思想

现有的定位算法中,主要利用到达时间(TOA)、到达时间差(TDOA)和到达角(AOA)的测量值信息,此外,到达频率差(FDOA)、场强等信息也可以用于定位。按照使用的测量值种类划分,可分为使用一种测量值的单一定位方法和使用两种以上测量值的混合定位方法。由于各种测量值具有不同的误差统计特性,各种单一定位方法也有不同的误差性能,于是使用多种测量值的混合定位方法可以实现对单一方法的优势互补,从而提高定位精度。此外,混合定位只需较少的基站即可实现定位,非常适用于 CDMA 网络中存在远近效应的情况。

如果按是否使用测量值的时间历史信息,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基站数目;另外,跟踪方法还可以平

滑跟踪曲线、估计移动台运动速度。因此,一般来说,跟踪方法的定位精度比静态定位的精度要高。目前的定位方法大多数都是静态定位,如 Chan<sup>[24]</sup>、Fang<sup>[23]</sup>、Taylor 级数展开<sup>[42]</sup>等。由于卡尔曼滤波器在跟踪目标方面的卓越性能,跟踪的方法主要是由 KF 来实现。

由无电线电波的散射、衍射、折射等非视距(NLOS)传播造成的误差是影响定位精度的重要因素。传统的定位方法,如刚才提到的 Chan、Fang、Taylor 等,都没有考虑 NLOS 误差的影响,在 NLOS 环境下定位精度将大大降低,达不到 FCC 的 E-911 要求。所以,出现了很多能消除 NLOS 误差的定位方法,如残差加权法<sup>[40]</sup>等。这些方法通过对冗余定位结果进行加权或取舍处理来减小 NLOS 的影响,因此需要有较多基站参与定位,并且必需存在 LOS 基站来保证定位精度,在实际环境中这样的要求不易满足。由于 NLOS 传播的普遍性及对定位精度的重要影响,NLOS 误差的鉴别和消除成为移动定位中的关键课题。

基于上述分析,我们提出一种基于 KF 的、对 NLOS 误差具有鲁棒性的混合定位方法。在设计 KF 时,先将 TOA、TDOA、AOA 的测量方程线性化,并给出统一的形式,再将各种单一定位的各测量向量、测量矩阵、测量误差协方差矩阵组合起来,形成混合定位方法中的对应向量或矩阵。KF 的跟踪性能使得轨迹平滑、定位误差较小,在混合定位的各矩阵和向量中选取其中的行向量,可以实现对定位方法和测量参数的自适应选择。

#### 4.1.2. 基于 KF 的混合定位

由于跟踪方法能够有效利用测量值和 MS 位置的历史信息,精度高于静态定位方法,因此本文利用 KF 作为跟踪器。在线性 KF 定位算法中,卡尔曼滤波器的状态方程可以如下设计:

$$\text{状态向量 } s(k) = [x(k) \ y(k) \ \dot{x}(k) \ \dot{y}(k)]^T, \text{ 状态矩阵 } A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$w(k) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ w_x(k) \\ w_y(k) \end{pmatrix}。其中 x(k), y(k) 表示移动台在 k 时刻的位置坐标, \dot{x}(k) 和 \dot{y}(k) 则$$

分别表示 k 时刻的运动速度,  $w(k)$  是与移动台运动速度的随机性有关的向量。

根据测量值种类的不同, 测量方程有着不同的设计。由于我们要利用多种测量值进行混合定位, 混合定位中涉及的测量方程都应该线性化和归一化, 并加以结合。

当多种测量值可以得到时, 由于混合定位可以利用更多的测量信息, 能够有效提高定位精度。将 TDOA、TOA 和 AOA 定位的测量方程线性化和归一化后, 混合定位的测量方程设计如下:

测量向量:

$$z(k) = [z_{\text{TDOA}}(k) \quad z_{\text{TOA}}(k) \quad z_{\text{AOA}}(k)]^T \quad (4-1)$$

测量矩阵:

$$G = [G_{\text{TDOA}} \quad G_{\text{TOA}} \quad G_{\text{AOA}}]^T \quad (4-2)$$

测量噪声向量:

$$v(k) = [v_{\text{TDOA}}(k) \quad v_{\text{TOA}}(k)]^T \quad (4-3)$$

测量噪声的协方差:

$$C(k) = \begin{bmatrix} C_{\text{TDOA}}(k) & 0 & 0 \\ 0 & C_{\text{TOA}}(k) & 0 \\ 0 & 0 & C_{\text{AOA}}(k) \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

可见, 混合定位中  $z(k)$  是 TDOA、TOA 和 AOA 定位中测量向量的结合,  $G$  和  $C(k)$  分别是三种单一定位算法中测量矩阵和测量噪声协方差矩阵的结合。

通过在以上混合定位的测量方程中选择适当的行向量, 可以实现 TOA、TDOA、TOA/AOA、TDOA/AOA、TOA/TDOA、TOA/TDOA/AOA 六种定位。由于具有跟踪特性, 利用各定位参数的时间历史, 所以可以得到比静态定位更高的定位精度, 由图 4.3 可以看出, 这六种定位方法的误差性能均比泰勒级数展开实现的 TDOA 和 TDOA/AOA 定位的误差性能要好。

#### 4.1.3. 对 NLOS 误差鲁棒的混合定位算法

在 LOS 情况下,上述混合定位算法性能很好,但是在 NLOS 环境下,被 NLOS 误差污染的测量值距离真实值出现很大随机偏差,混合定位方法精度大大降低。通过对较好的测量参数进行选择,舍去 NLOS 误差严重的测量参数,可以增强算法对 NLOS 误差的鲁棒性。

在原有的混合定位的基础上,我们加入对测量参数的选择和位置推算机制。在每个时刻,网络得到各 BS 的 TOA、TDOA 和 AOA 测量值,然后对每一个采样时刻得到的各测量值进行判断和综合,确定本次定位用到的测量值的种类和数量。对于不准确的测量值,只需在测量向量  $\mathbf{z}(k)$ 、测量矩阵  $\mathbf{G}$ 、测量噪声的协方差矩阵  $\mathbf{C}(k)$  中舍去相应的行向量即可。对每个时刻都进行这样的判断和选择,直到跟踪过程结束。

以测量方程的第  $i$  行为例,选择过程如下:

(1)根据一段时间内的测量参数绘制测量曲线;

(2)将测量曲线利用多项式拟合方法进行平滑处理并获得平滑曲线;

(3)求出两条曲线的差值  $b_i(k)$ ,代表并根据这一差值与某一门限值相比较作为测量参数选择的标准。根据 NLOS 误差具有正值性且方差较大的特点,将门限设定为:

$$threshold = \alpha \cdot std_i\_m \quad (4-5)$$

其中  $std_i\_m$  是第  $i$  行测量方程对应测量值的标准差,  $\alpha$  是根据环境参数选择的大于 1 的系数。当  $b_i(k) > std_i\_m$  时,则删除  $k$  时刻上的测量方程第  $i$  行,反之,保留第  $i$  行。

门限值的选取是 KF 收敛性和抗 NLOS 误差性能的关键,过低的门限值可能造成过多的测量值被舍弃,导致算法不收敛;反之,过高的门限值会降低算法的抗 NLOS 性能。本文中,门限的选取通过大量的实验获得,一旦  $\alpha$  值确定下来,就可以作为某种特定环境下的先验信息用于以后的定位计算。

但是当 NLOS 污染极为严重,多种测量值都被舍弃时,混合定位方程会由于参与定位的测量方程数目过少,性能急剧恶化。针对这一问题,本文进一步提出

了“移动台位置推算”策略。根据 KF 具有记忆性并能估计移动速度， $k$  时刻的位置可以根据  $k-1$  时刻的位置结合速度加以估计。

$$(x_k, y_k) = (x_{k-1}, y_{k-1}) + \text{sample\_period} \times (vx_{k-1}, vy_{k-1}) \quad (4-6)$$

其中， $\text{sample\_period}$  是 KF 的采样周期。

算法的流程如图 4.1 所示：

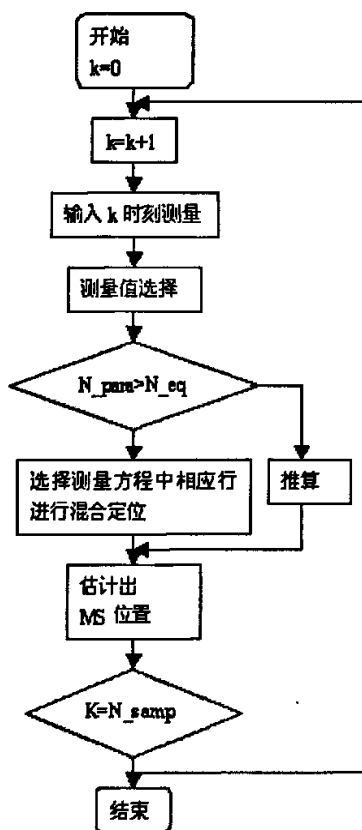


图 4.1 流程图

其中  $N_{\text{para}}$  是选择出的用于定位的测量参数的数目， $N_{\text{eq}}$  是保证定位精度的要求下参与混合定位所需的最少方程数， $N_{\text{samp}}$  是采样的个数。通过这种“选择+推算”的机制，大大提高了混合定位的抗 NLOS 性能。 $N_{\text{eq}}$  是引入推算机制的门限，通过实验，可以确定  $N_{\text{eq}}$  的数值，如图 4.2 可见，当某一时刻采用的方程个数小于 5 时，定位误差急剧增大，所以我们将  $N_{\text{eq}}$  的值设为 5。

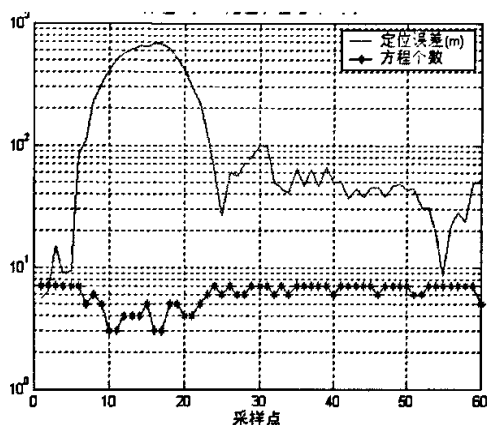


图 4.2 参与定位的方程数目与定位误差之间的关系

#### 4.1.4. 混合定位算法性能分析

通过实验，可以比较在 LOS 环境中，本文所提出方法与 Taylor 级数方法的性能。实验环境:4 个 BS 参与定位，其中 BS1 是服务基站且存在 LOS 路径；测量噪声为零均值标准差为 45 米的高斯噪声。

实验一，本文所提出的基于 KF 的混合定位算法的六种组合与基于 Taylor 级数的算法相比较，实验结果如图 4.3 所示，x 轴代表定位误差（单位:米），y 轴代表误差小于 x 轴上对应值的概率，通过各种算法定位误差的累积分布函数可以看出，四种利用线性 KF 实现定位的跟踪算法性能整体优于两种通过 Taylor 级数实现的 TDOA 和 TDOA/AOA 静态定位算法。可见，跟踪算法比静态算法更有优势。

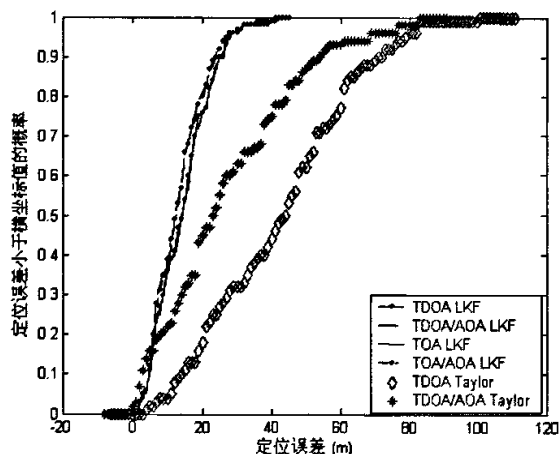


图 4.3 六种定位算法误差累积量性能比较



实验二，分析 AOA 测量值对于提高定位精度的作用。如图 4.4 所示，当 AOA 测量值标准差较小时（如图 4.4.a 中 1 度），在本文所提出的混合定位方法中利用 AOA 信息能够大大提高定位精度。当 AOA 测量值标准差较大时（如图 4.4.b 中 5 度），AOA 信息对提高定位精度帮助不大。实验表明：利用较为精确的测量值参与定位，混合定位的精度将远高于单一定位。

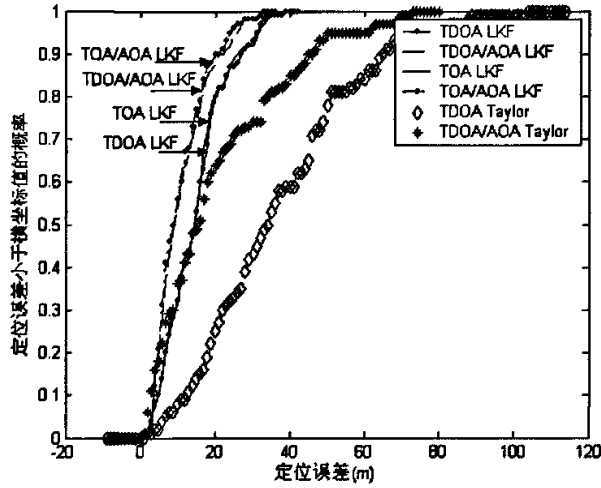


图 4.4.a 定位算法误差累积量性能比较（AOA 测量值标准差为 1 度）

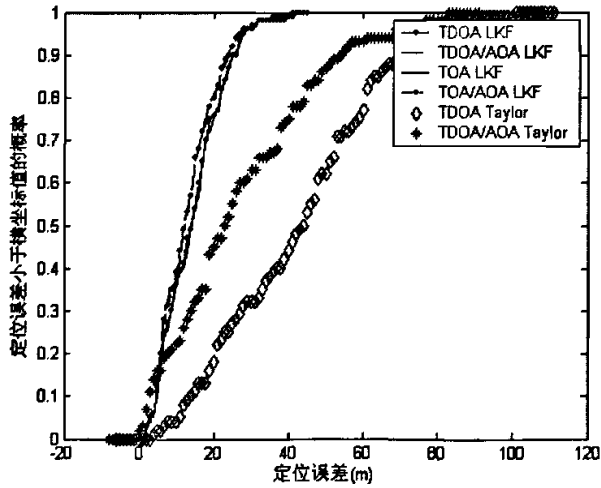


图 4.4.b 定位算法误差累积量性能比较（AOA 测量值标准差为 5 度）

#### 4.1.5. 混合定位方法的抗 NLOS 性能

仿真环境为四种典型 NLOS 误差环境，即闹市、市区、郊区、乡村，NLOS

误差服从指数分布, 小区半径分别为 0.2km、0.5km、1.5km、10km。图 4.5 给出了普通 KF 混合定位 (记为方法 1) 与本文提出的引入选择和推算机制的 KF 定位算法 (记为方法 2) 的跟踪轨迹比较。通过实验可以看出, “选择+推算”方法的跟踪轨迹与真实轨迹更加拟合。利用本文提出的算法进行定位, 即使在 NLOS 误差较大的时刻仍能够保证一定的定位精度。

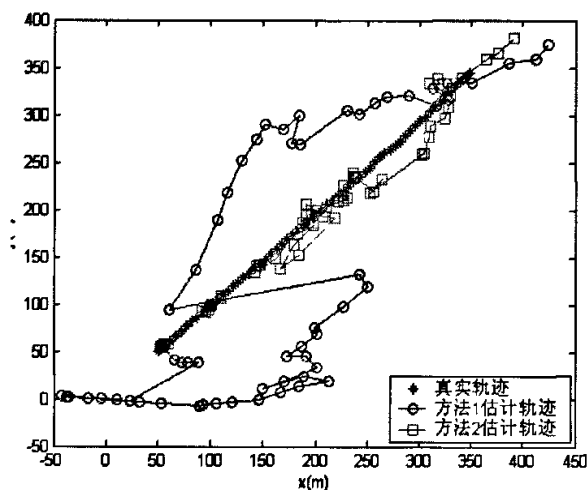


图 4.5 两种定位算法对运动轨迹的估计

经过 2000 次独立实验, 图 4.6 给出了两种算法的累积分布曲线。可见引入选择推算机制后的定位算法定位精度有很大提高。

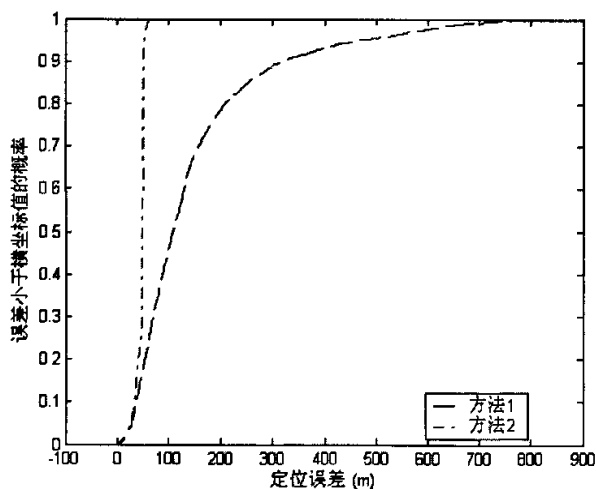


图 4.6 两种方法的误差累积量比较

表 4.1 给出了两种算法在四种标准环境中的定位误差, 例如, 在 NLOS 误差较

大的闹市，“选择+推算”定位算法的平均定位误差是 55.9808m。在 2000 次仿真实验中，误差小于 50.4970m 的概率是 67%，小于 52.3675m 的概率是 95%。可见普通 KF 混合定位的定位精度在 NLOS 环境中无法满足 E-911 的要求，而引入选择推算机制后，定位结果要优于普通混合定位算法，并能满足 E-911 的定位需求。

尽管在闹市区 NLOS 传播比乡村要严重的多，但是由于 NLOS 误差与 MS 和 BS 之间的距离有关，而闹市区的小区半径比乡村要小的多，在一定程度上抵消了 NLOS 传播的影响。因此在任何环境中，引入“选择+推算”机制的 KF 混合定位算法均能够满足 E-911 的要求。

表 4.1 本文提出的定位算法性能比较

Environment	Bad urban			Urban		
Location error (m)	Prob=67%	Prob=95%	Mean	Prob=67%	Prob=95%	Mean
No select	760.9317	4371.3	1214.6	163.6695	683.2431	230.5773
Select+reckon	50.4970	52.3675	55.9808	50.4700	59.3869	51.8361
Environment	Suburban			Rural		
Location error (m)	Prob=67%	Prob=95%	Mean	Prob=67%	Prob=95%	Mean
No select	205.4110	532.4123	229.4051	155.8572	320.2911	148.1415
Select+reckon	51.3949	75.6768	52.4575	51.4425	95.6901	54.6746

#### 4.1.6. 结论

本节提出了一种利用混合测量值的移动台跟踪定位算法，该方法通过将 TDOA、TOA 和 AOA 定位中的测量方程线性归一化并利用 KF 实现。实验表明本文提出的方法性能由于静态定位算法。而且，通过对混合定位算法加以改进并引入“选择推算”机制，以消除 NLOS 误差的影响。实验表明，本文提出的混合定位算法精度较高，抗 NLOS 性能较好，能够满足 FCC 的 E-911 要求。

#### 4.2. 基于卡尔曼滤波的测量值重构及定位算法

在蜂窝网无线定位技术中，非视距 (NLOS) 误差的存在使定位性能急剧下降。该文提出了一种针对 NLOS 环境的基于卡尔曼滤波 (KF) 的动态跟踪定位算法。算法首先利用有偏卡尔曼滤波器的对测量值进行重构，然后利用重构后的测量值

进行卡尔曼定位，并引入推算机制加以修正。实验结果表明，该方法在极为恶劣的 NLOS 环境下也能够获得很高的定位精度。

#### 4.2.1. 基本思想

无线定位的误差主要有两个来源：一是非理想的信道环境造成测量值的偏差，称之为测量误差；二是求解定位方程组时，由于非线性问题造成的误差。在测量误差中，遮盖物的存在及多径传输引起 NLOS 误差，而测量装置的热噪声、量化误差及设备精度引起标准测量误差或称为视距 (LOS) 误差。无论是均值或方差，NLOS 误差都要远远大于 LOS 误差。因此，对无线定位的基本定位算法和 NLOS 误差消除的研究是无线定位研究中的两大热点。

所以，能够消除 NLOS 误差的定位方法受到了广泛关注：其中一类称为“一步定位法”——在传统定位算法中加以改进，提高其对 NLOS 的鲁棒性，如残差加权算法等，这类方法通过对冗余定位结果进行加权或取舍处理来减小 NLOS 的影响，需要有较多基站 (BS) 参与定位，并且必须存在 LOS 基站来保证定位精度，这样的要求在实际中不易实现；另一类可以称为“两步定位法”——根据 NLOS 误差的性质，对测量的原始数据进行处理，实现 LOS 重构，再利用重构后的数据进行定位计算，如 Wylie 方法<sup>[36]</sup>等。

本文基于对 NLOS 误差特点的分析，提出一种基于 KF 的、能够有效消除 NLOS 误差的两步定位方案。第 1 步，利用有偏 KF 对被 NLOS 误差污染的测量值进行测量值重构：首先，根据 NLOS 误差的特性及测量值的历史信息，利用有偏的 KF 估计测量值及偏差，并对估计结果做出修正以消除 NLOS 误差；其次，对估计值进行多项式拟合平滑处理以消除标准测量误差。第 2 步，利用重构的测量值进行 KF 定位，并引入推算机制利用历史信息对定位结果进行修正。

本文提出的算法两处用到了卡尔曼滤波。在算法第 1 步中，利用有偏卡尔曼滤波进行 TOA 或 TDOA 测量值的估计，其测量向量是在 NLOS 环境中测得的未经处理的 TOA 或 TDOA 测量值，状态向量是测量值的 LOS 估计值及 NLOS 偏移值；在第 2 步中，利用卡尔曼滤波对移动台定位跟踪过程进行建模，其测量向量是消除 NLOS 误差的测量值，状态向量是移动台的位置坐标。第 1 步基于有偏 KF 的测

量值重构算法及第 2 步引入推算机制的 KF 定位算法将分别在第 3、4 小节中详细阐述。

#### 4.2.2. 基于有偏 KF 的测量值重构算法

##### 1. NLOS 误差模型

本文中 NLOS 误差模型采用服从指数分布的 Greenstein 模型<sup>[43]</sup>： $\tau_{rms} = T_1 d^\epsilon y$ 。

其中  $\tau_{rms}$  是均方根延时扩展，即 NLOS 误差， $T_1$  是在  $d=1\text{km}$  处延时扩展的中值， $\epsilon$  取值在  $[0.5,1]$  之间， $y$  是一个标准差为  $\sigma_y$  (4dB) 的对数正态分布随机变量。

由于 TOA 测量值中 NLOS 误差的分布与电波传播路径上障碍物的分布有关，所以 NLOS 误差具有随机性的特点；其次，NLOS 误差是电波在传播途中遇障碍物发生超量延迟所致，所以 TOA 中的 NLOS 误差总是正值；再次，式 (3-38) 说明，TOA 测量值可以看作是真实的 TOA 与标准测量误差及 NLOS 误差之和，由于这两种误差的产生原因不同，因此是相互独立的，基于这种独立性我们可以将两种误差分别予以消除。

本文分别针对 NLOS 误差的随机性、正值性和独立性，从不同角度对 NLOS 误差进行消除。

##### 2. 基于有偏 KF 的测量值重构算法

在测量值中，我们可以将 (3-36) 式重组为：

$$r_m(t_i) = r_{\text{LOS}_m}(t_i) + \text{NLOS}(t_i) \quad (4-7)$$

其中， $r_{\text{LOS}_m}(t_i) = L_m(t_i) + n_m(t_i)$ ，表示不含 NLOS 误差的视距测量值。由式 (3-19) 和 (3-20) 可以设计出测量值的 KF 模型。其中：

$z(k)$  表示 TOA 或 TDOA 测量值序列，即  $r_m(t_i)$ ； $r(k)$  表示视距测量值的估计值，即  $r_{\text{LOS}_m}(t_i)$ ； $\dot{r}(k)$  表示视距测量值  $r_{\text{LOS}_m}(t_i)$  导数的估计值； $b(k)$  表示 NLOS 误差的估计值，即  $\text{NLOS}_m(t_i)$ 。

由此可以设计出卡尔曼滤波方程式 (3-19)、(3-20) 中的相关参数：

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \Delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{pmatrix}, \quad s(k) = [r(k) \quad \dot{r}(k) \quad b(k)]^T, \quad G = [1 \quad 0 \quad 1], \quad w(k) = v(k) = 0,$$

其中 $\Delta$ 是采样间隔,  $\alpha$ ,  $\beta$ 分别是表征移动台运动和 NLOS 环境变化的常量, 可根据实验确定其值。

通过 KF 的迭代过程, 估计出  $k$  时刻的视距测量值  $r(k)$  和 NLOS 误差值  $b(k)$ , 并根据 NLOS 误差固有的特点和分布规律判断  $b(k)$  的值, 并对  $r(k)$  作相应修正。

若  $b(k) > 0$ , 即可认为在该点上出现了较大的 NLOS 偏差, 并已通过卡尔曼滤波的迭代过程将其消除; 若  $b(k) < 0$ , 则与非视距误差非负且偏差较大的特性矛盾, 可认为此时 NLOS 误差为零, 由于此时标准测量误差是一个较大的负数, 在两者的共同作用下使得估计出的偏差发生负向偏移, 此时将  $b(k)$  置零, 测量值就是视距测量值。

考虑到运动轨迹的连续和不可突变性, 测量值也应当是连续不可突变的。当相邻两个时刻的估计值差异超过某一特定门限时, 就发出了该时刻获得的测量值误差较大的信号。此时, 根据运动的连续性, 需要对  $k$  时刻的估计值加以修正, 而卡尔曼滤波器特有的速度估计性能提供了修正的有效方法, 即

$$r(k) = r(k-1) + \Delta \cdot \dot{r}(k-1) \quad (4-8)$$

通过这一步卡尔曼滤波, 测量值中的 NLOS 误差得到了抑制, 也实现了测量值的 LOS 重构。

经过前面方法处理的测量值, 由于测量噪声, 量化误差等标准测量误差的存在, 仍需要进一步的处理, 由于移动台运动过程中相邻时间点的测量值具有相关性, 可以根据相邻时间点的测量值对时刻  $k$  的测量值进行修正。标准测量误差服从均值为零的正态分布, 通过对测量值平滑处理可得以消除。随着采样技术及科学计算技术的迅速发展, 多项式拟合方法运算速度不断加快, 几乎可以达到实时处理, 又可以利用较长的数据序列。因此本算法采用了多项式拟合法利用较高阶数的多项式对测量值的估计曲线进行平滑处理, 以消除标准测量误差的影响。

#### 4.2.3. 引入推算机制的 KF 定位算法

经过以上方法处理的测量值消除了大部分的 NLOS 误差和 LOS 误差, 使用常规的定位算法就能取得较好的定位效果, 但是由于卡尔曼滤波定位能够利用大量的时间历史信息, 自身有着很好的抗测量误差及非线性误差能力, 所以本方案采

取基于卡尔曼滤波的定位算法。

## 1. 基于 KF 的定位算法

在线性 KF 定位算法中，卡尔曼滤波器的状态方程可以如下设计：

$$\text{状态向量 } s(k) = [x(k) \ y(k) \ \dot{x}(k) \ \dot{y}(k)]^T, \text{ 状态矩阵 } A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$w(k) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ w_x(k) \\ w_y(k) \end{pmatrix}. \text{ 其中 } x(k), y(k) \text{ 表示移动台在 } k \text{ 时刻的位置坐标, } \dot{x}(k) \text{ 和 } \dot{y}(k) \text{ 则}$$

分别表示  $k$  时刻的运动速度,  $w(k)$  是与移动台运动速度的随机性有关的向量。

根据测量值种类的不同, 文献[27]和[22]分别给出了利用 TDOA 和 TOA 测量值进行定位时卡尔曼滤波器测量方程的不同设计。

## 2. KF 定位中引入推算机制

由于运动轨迹的连续性, 相邻两个时刻的运动轨迹点距离应该保持在某一个门限之内, 这一门限与移动台的运动速度有关。当根据相邻两个时刻的移动台坐标的估计值计算出的距离值超过这一门限时, 即可认为产生了较大的定位误差。根据这一原则对定位后的结果即  $x(k)$ ,  $y(k)$  加以判别和修正, 将较大的提高定位精度。

因为卡尔曼滤波器本身具有记忆性并且可以估计出 MS 的速度, 所以可以利用上一时刻的位置估计结合速度估计来推算该时刻的 MS 位置。本文采取的修正策略是引入推算机制, 设

$$d(k) = \sqrt{(x(k) - x(k-1))^2 + (y(k) - y(k-1))^2} \quad (4-9)$$

若  $d(k) > \text{threshold}$ , 则说明相邻时间间隔内出现了较大的误差。其中  $\text{threshold}$  是一个与移动台运动速度有关的值, 可以根据先验信息获得。此时, 将该点处的测量值由前一时刻的估计值推算, 即

$$\begin{cases} x(k) = x(k-1) + \Delta \cdot \dot{x}(k-1) \\ y(k) = y(k-1) + \Delta \cdot \dot{y}(k-1) \end{cases} \quad (4-10)$$

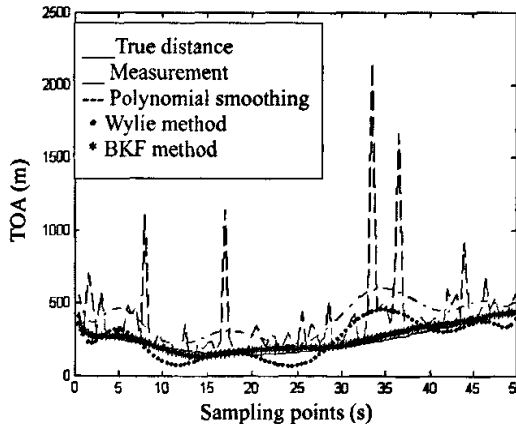
通过引入位置推算机制，KF 定位方法的定位精度得到了有效提高。

#### 4.2.4. 仿真及分析

仿真中使用了两个典型环境：(1) 闹市区 NLOS 环境，小区半径为 250m；(2) 山区环境，小区半径为 2500m。4 个基站参与定位，移动台从  $(-300, -100)$  以速度  $v[v_x, v_y]$  运动， $v_x, v_y$  是以 10m/s 为均值的随机变量，每 0.5s 采样一次，采 100 个 TOA 测量值，对测量值以本文提出的算法进行重构，并对 MS 定位。

实验 1：设 BS1(0, 0) 作为服务基站，将 MS 与 BS1 的 TOA 测量值  $r = c \cdot t_{TOA}$ ，分别用一般的多项式平滑法、Wylie 方法、本文提出的基于有偏 KF 的测量值重构算法（记为 BKF 算法）进行处理。实验独立运行 2000 次，并分析几种方法的性能。

如图 4.7 所示，一般用于 LOS 环境中的多项式平滑法已经不再适用于 NLOS 环境，Wylie 方法使估计曲线整体向下偏移，消除了一部分 NLOS 误差，但 Wylie 偏移量的数值无法自适应的由算法本身得到，而需要关于 LOS 的先验知识，随着测量值及环境的变化，偏移量也随之变化。因此在动态变化的环境中，准确的设计这一参数难度很大。而本文提出的 BKF 算法，在不同的环境中都能够以很高的精度再现真实值，无需有关 LOS 的先验信息，实现更为简单。



(a) 闹市

图 4.7.a 消除 NLOS 误差性能比较（闹市环境）



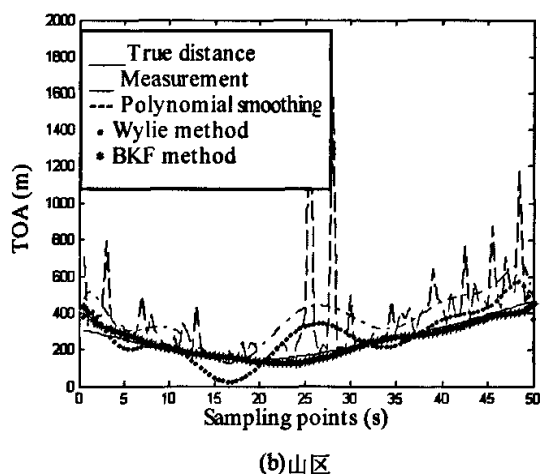


图 4.7.b 消除 NLOS 误差性能比较（山区环境）

比较两种算法的相对于真实值的均方误差，如图 4.8 所示，本文提出的 BKF 算法的均方误差曲线平缓、误差值明显小于 Wylie 算法，且性能较为稳定，在各种环境中均能获得很高的精度。

经过实验分析可知，BKF 算法与同属于“两步定位法”的 Wylie 方法相比，可获得较小的估计误差。与“一步定位法”相比，BKF 只要求参与定位的基站数不少于完成一次 TOA 定位的最少基站数（3 个），且当所有基站均不存在 LOS 路径时也同样适用。经过重构的测量值，即使使用普通的不考虑 NLOS 误差消除的定位算法来计算 MS 的位置，也可以达到较高的精度。

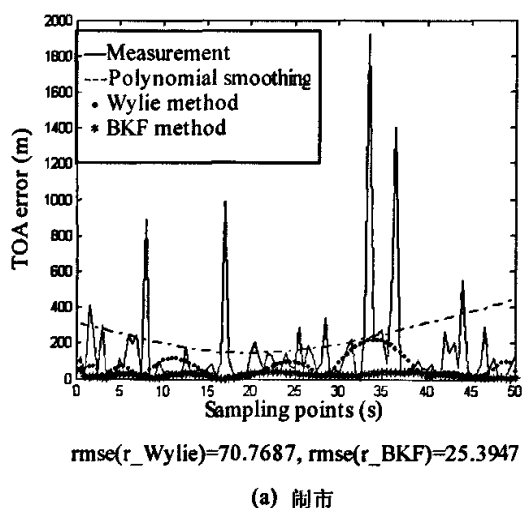
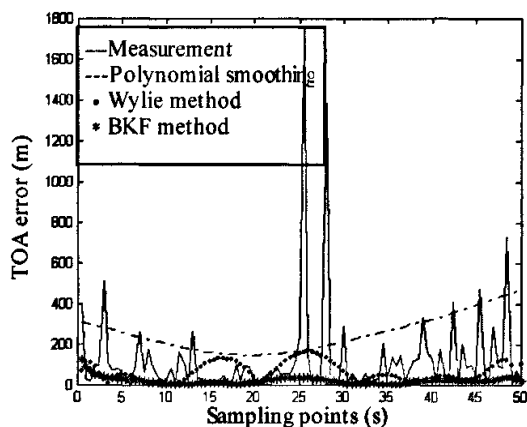


图 4.8.a 测量值重构均方误差比较（闹市环境）



$$\text{rmse}(r_{\text{Wylie}})=63.7313, \text{rmse}(r_{\text{BKF}})=17.0893$$

(b) 山区

图 4.8.b 测量值重构均方误差比较（山区环境）

本节将经过 BKF 算法处理过的 TOA 测量值进行定位，分析以 Taylor 为代表的静态定位算法与卡尔曼滤波为代表的动态跟踪定位算法的性能，并在 KF 定位算法中引入推算机制后再进行性能比较。由于 Taylor 方法利用的是 TDOA 值，为了便于比较定位效果，本文提出的算法也使用 TDOA 值进行定位。在图 4.9 中，将 MS 沿着某一轨迹运动时真实轨迹与 Taylor 和两种 KF 定位比较。可以看出，由于 KF 算法利用了时间历史信息，基于 KF 的动态定位算法整体上优于静态的 Taylor 算法。这与理论分析也是一致的。引入推算机制的 KF 定位比普通 KF 定位更加逼近于真实曲线，跟踪结果比未引入推算机制的跟踪结果更好。

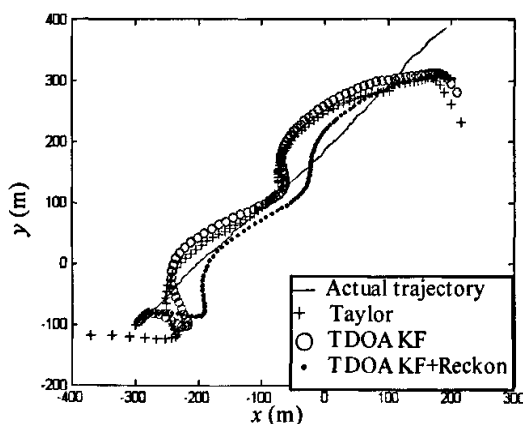


图 4.9 追踪轨迹（闹市区）

图 4.10 画出了两种 KF 定位算法定位误差累积分布函数，横坐标表示定位误差，纵坐标表示定位误差小于横坐标值的概率，CDF 曲线清楚的表明：利用引入推算的算法进行移动台定位，能够达到在 95% 的概率下定位精度不低于 100m，在 67% 的概率下定位精度不低于 50m，能够满足 FCC-911 的要求（95% 的概率下定位精度不低于 300m，在 67% 的概率下定位精度不低于 150m）。

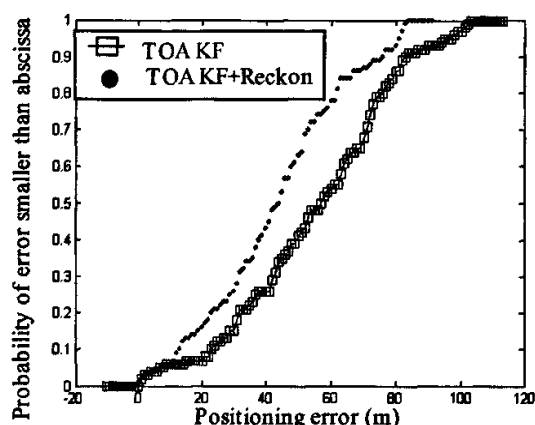


图 4.10 引入推算机制后 CDF 的比较

以上实验结果表明，本文提出的测量值重构算法和引入推算的 KF 定位算法，从不同角度考虑，改进了卡尔曼滤波器的迭代过程，大大消除了 TOA 或 TDOA 测量值中的 LOS 误差和 NLOS 误差，恢复出的测量值较精确的逼近真实值。

#### 4.2.5. 结论

本方案提出了一种基于 KF 的测量值重构及定位算法，包括基于有偏 KF 的测量值重构算法及引入推算机制的 KF 定位算法。在测量值重构算法中，通过运用有偏 KF 有效的消除了 NLOS 误差，通过多项式拟合的平滑方法消除了标准测量误差，经过这一系列处理，有效地重构了测量值。与同属于“两步定位法”的 Wylie 方法相比，该方法可获得较小的估计误差；与“一步定位法”相比，本节的方法只要求参与定位的基站数不少于完成一次 TOA 定位的最少基站数（3 个），且当所有基站均不存在 LOS 路径时也同样适用。在定位算法中通过对普通的 TOA，TDOA 或 TOA/TDOA 混和 KF 定位算法中引入推算机制，提高了定位算法本身的容差性和定位精度。

## 第五章 无线传感器网络定位

近年来,随着无线通信技术和微电子的迅猛发展,低功耗、低成本、多功能的新型传感器应运而生。它的体积小,造价低,而且具有传感、通信及简单的数据处理等功能。传感器网络(WSN)是由大量传感器节点通过无线通信连接所组成的多跳自组织的网络,它的出现使得许多以前无法实现或是难以实现的应用成为可能。传感器网络可深入分布于任何物理环境中,监视其温度,湿度,噪声,光强度,压强以及其内部移动物体的大小、速度和质量等众多物理现象,并能够在网络路由机制的作用下,将其中人们感兴趣的信息通过卫星或互联网传送到终端用户手中。传感器网络最突出的特点在于其自组织的组网方式,即传感器节点在投入使用之前,其在网络中的位置分布无须进行计算或估计,这一点有助于传感器网络应用于人类难以接近的地区,如火山附近或灾害发生频繁的地区。正是它的这些特点决定了其在军事领域、医疗卫生领域、灾害环境甚至于商业活动中广阔的应用前景。由于传感器网络潜在的应用价值使得与传感器网络相关的研究成为近年来学术界和工业界的研究热点。在很多的传感器网络的应用中,传感器节点自身的定位十分重要,没有位置坐标的很多信息都是无意义的。节点定位问题在智能传感器网络中处于十分重要的地位,因此传感器节点定位是研究领域的一大热点课题。

### 5.1. 传感器节点定位的特点与基本方法

#### 5.1.1. 传感器网络定位的特点

传感器节点在向中心节点报告的过程中,事件发生的位置十分关键,它直接决定了数据的分析结果,同时在很多基于几何位置的路由算法(Geographic based routing)也必须知道节点的几何坐标。但是由于传感器网络的特点,传感器节点往往只具备有限的计算资源和能量供应,通常随机部署,以自组织的方式相互协调工作,定位必须在部署后完成。目前已有的定位机制如GPS(全球定位系统)等根本

无法适应传感器网络在使用环境、能耗和资源限制等方面的要求,或者只有少数节点配备 GPS 来确定自身位置,作为其他节点定位的参考。因此网络中各个节点的位置往往只能通过其它的途径来获得。

同蜂窝网无线定位相比,传感器网络定位技术也有其自身的特点。在无线传感器网络中,节点规模大、能量有限、可靠性差、随机部署、无线模块的通信距离有限,这通常要求定位机制具备自组织性、健壮性、能量高效、分布式计算等特点。传感器节点自身定位就是根据少数已知位置的节点,按照某种定位机制确定自身的位置。

### 5.1.2. 传感器节点定位的基本方法

根据节点是否已知自身的位置,节点可分为信标节点和未知节点。信标节点通过携带 GPS 定位设备等手段获得自身的精确位置,在网络节点中占的比例很小。不是信标节点的其它传感器节点就是未知节点,它们通过信标节点来确定自身位置。每个节点受发射功率的限制,只能在有限的通信半径内与其他节点通信,在一个节点的通信半径内并可与之直接通信的其他节点称为邻居节点。

大致来说,现有的传感器网络的定位技术分为两大类:与距离无关的方法(rang-free)和基于距离测量值的方法(ranged)。前者则无需距离和角度信息,而利用节点间的邻近关系和连通性实现定位,但其定位精度较低。其典型的定位算法有质心法<sup>[44]</sup>、凸规划算法<sup>[45]</sup>、APIT 算法<sup>[46]</sup>等。后者通过测量节点间点到点的距离或角度信息,来计算未知节点的位置,通常采用测距、定位和修正等步骤。根据测量节点间距离或方位时所采用的方法,基于距离的定位分为基于 TOA 的定位、基于 TDOA 的定位、基于 AOA 的定位、基于 RSSI 的定位等。一般来说基于距离测量的方法精度要高于与距离无关的方法。

### 5.2. 距离无关的定位算法

距离无关的定位机制对节点间的距离进行估计或者确定包含未知节点的可能区域,来确定未知节点的位置。目前提出主要有质心算法、DV-Hop 算法<sup>[47]</sup>、APIT 算法等。距离无关的定位机制无需测量节点间的绝对距离或方位,降低了对节点硬

件的要求,使得节点成本更适合于大规模传感器网络,而且定位性能受环境因素的影响小。虽然定位的误差相应有所增加,但定位精度已能够满足多数传感器网络应用的要求,是目前大家普遍重点关注的定位机制。

## 1. 质心算法

多边形的几何中心称为质心,多边形顶点坐标的平均值就是质心节点的坐标。质心定位算法首先确定包含未知节点的区域,再计算这个区域的质心,并将其作为未知节点的位置。

在质心算法中,信标节点周期性向邻近节点广播信标分组,信标分组中包含信标节点的标识号和位置信息。当未知节点接收到来自不同信标节点的信标分组数量超过某一个门限  $k$  或接收一定时间后,就确定自身位置为这些信标节点所组成的多边形的质心。质心算法简单易实现,完全基于网络连通性,无需信标节点和未知节点之间的协调。但用质心作为实际位置本身就是一种估计,这种估计的精确度和信标节点的密度以及分布有很大关系:密度越大,分布越均匀,定位精度越高。

## 2. DV-Hop 算法

距离向量-跳段 DV-Hop(Distance Vector-Hop)定位机制非常类似于传统网络中的距离向量路由机制。距离向量定位机制分为以下三个阶段:

第一阶段:未知节点首先计算与信标节点的最小跳数。信标节点向邻居节点广播自身位置信息的分组,其中包括跳数字段,初始化为 1。接收节点记录具有到每个信标节点的最小跳数,忽略来自同一个信标节点的较大跳数的分组。然后将跳数值加 1,并转发给邻居节点。通过这个方法,网络中的所有节点能够记录下到每个信标节点的最小跳数。

第二阶段:计算未知节点与信标节点的实际跳段距离。每个信标节点根据第一个阶段中记录的其它信标节点的位置信息和相距跳数,估算平均每跳的实际距离。然后,信标节点将计算的平均每跳距离用带有生存期字段的分组广播至网络中,未知节点仅记录接收到的第一个平均每跳距离,并转发给邻居节点。未知节点接收到平均每跳距离后,根据记录的跳数,计算到每个信标节点的跳段距离。

第三阶段:未知节点利用第二阶段中记录的到各个信标节点的跳段距离,利用三边测量法或极大似然估计法计算自身坐标。

距离向量算法使用平均每跳距离计算实际距离,对节点的硬件要求低,实现简

单。其缺点是利用跳段距离代替直线距离,存在一定的误差。

### 3. APIT 算法

近似三角形内点测试法 APIT(Approximate Point In Triangulation Test),首先确定多个包含未知节点的三角形区域,未知节点从邻近信标节点组成的集合中任意选取三个信标节点,测试未知节点是否位于三角形内部,使用不同信标节点组合重复测试,直到穷尽所有组合或达到所需定位精度,最后确定包含未知节点所有三角形的重叠区域的质心作为未知节点的位置。

## 5.3. 基于距离测量值的方法

### 5.3.1. 距离测量值的估计

#### 1. 基于 TOA 的定位

在基于到达时间 TOA 的定位机制<sup>[48]</sup>中,根据已知信号的传播速度和信号的传播时间来计算节点间的距离,然后利用已有算法计算出节点的位置。节点在计算出距离多个邻近信标节点的距离后,可以利用三边测量算法或极大似然算法计算出自身位置。基于 TOA 的定位精度高,但要求节点间保持精确的时间同步,因此对传感器节点的硬件和功耗提出了较高的要求。使用 TOA 技术最基本的定位系统是 GPS, GPS 系统需要昂贵、高能耗的电子设备来精确同步卫星时钟。因 WSN 节点的硬件尺寸、价格和功耗限制,实际利用 TOA 技术定位的方案较少,但是随着 UWB(Ultra Wide Band)技术的发展及其在无线传感网络中的应用,该项技术发展前景广阔。

#### 2. 基于 TDOA 的定位

在基于到达时间差 TDOA(Time Difference Of Arrival)的定位机制<sup>[48]</sup>中,发射节点同时发射两种不同传播速度的无线信号(一般是超声波和射频信号),接收节点根据两种信号到达的时间差以及已知这两种信号的传播速度,计算两个节点之间的距离,再通过已有基本的定位算法计算出节点的位置。该技术的测距精度较 RSSI 高,可达到厘米级,但受限与超声波传播距离有限和 NLOS 问题对超声波信号的传播影响。

室内定位系统 Cricket 系统是麻省理工学院的 Oxygen 项目的一部分,使用 TDOA 来确定节点在大楼内的具体房间位置。TDOA 技术对硬件的要求高,成本和

能耗使得该种技术对低能耗的传感器网络提出了挑战。但是 TDOA 技术测距误差小,有较高的精度。

### 3. 基于 AOA 的定位

在基于到达角度 AOA 的定位机制<sup>[49,50]</sup>中,接收节点通过天线阵列或多个超声波接收机,感知发射节点信号的到达方向,计算接收节点和发射节点之间的相对方位或角度,再通过三角测量法计算出节点的位置。

如 MIT 的 The Cricket Compass 等项目中就提出了基于 AOA 的定位算法.AOA 技术也受外界环境影响,如噪声、NLOS 问题等都会对测量结果产生不同影响.同时, AOA 需要额外硬件,可能无法满足传感器节点对硬件尺寸和功耗的要求。

### 4. RSSI( received signal strength indicator)

已知发射功率,在接收节点测量接收功率,计算传播损耗,使用理论或经验的信号传播模型将传播损耗转化为距离,该技术主要使用 RF 信号.因传感器节点本身具有无线通信能力,故其是一种低功率、廉价的测距技术, RADAR<sup>[51]</sup>、SpotON<sup>[52]</sup>等许多项目中使用了该技术.它的主要误差来源是环境影响所造成的信号传播模型的建模复杂性,反射、多径传播、非视距、天线增益等问题都会在距离相同情况下产生显著不同的传播损耗.通常将其看作为一种粗糙的测距技术,有可能产生士 50%的测距误差。

## 5.3.2. 几种典型的传感器网络定位算法

### 1. N-hop multilateration primitive<sup>[53]</sup>定位算法

加州大学洛杉矶分校的 Savvides 等设计了一种称为“Medusa”的无线传感器节点实验平台(装备有射程为 3m 的超声波收发器,可使用 TDOA 技术以 2cm 的精度测量距离),并在该平台上开发了 N-hop multilateration primitive 定位算法。该算法分为 3 个阶段。

(1)生成协作子树:根据判定条件,在网络中生成多个由未知节点和锚节点组成的限制条件完整或超限制条件的构形,称为协作子树.每个构形包括  $n$  个未知变量(未知节点的坐标)和至少  $n$  个非线性方程式,并确保每一个未知变量拥有唯一解.未被协作子树包含的节点在整个算法的后处理阶段进行定位。

(2)计算节点位置的初始估算:采用与 Bounding box<sup>[54]</sup>算法相同的原理,根据锚



节点位置、节点间距离和网络连通性信息对每个节点的位置进行粗略估算,结果作为第(3)阶段的输入.但该方法有一个明显的缺点,就是要求锚节点必须被部署在网络边缘.

(3)位置求精:根据预设的定位精度,使用卡尔曼滤波技术在每个协作子树范围内(每个节点位置有唯一解)对第二阶段的结果进行循环求精,可选用分布式或集中式两种计算模式.可以看出,这种循环求精的定位算法中循环次数无法预知.

## 2. Robust position 算法<sup>[55]</sup>

加州大学洛杉矶分校的 Meguerdichian 提出的 Robust position 定位算法由两个阶段组成:初始阶段和求精阶段。

初始阶段使用 Hop-TERRAIN 算法(与 DV-hop 类似),提供每个节点的初始位置估计.在求精阶段,节点尝试提高位置估计精度.节点通过测量到所有一跳邻居的距离并依此进行位置计算来更新自己的位置.该算法在所有的的位置计算中都使用了三边测量定位的方法.算法引入了置信度来提高求精阶段的性能,置信度被用来在三边定位中加权.所有未知节点的置信度初值为 0.1,锚节点为 1.0.当未知节点更新其位置估计时同时也更新其置信度为其邻居节点的置信度的平均值.这样,网络的平均置信度将随迭代而增加,提高了覆盖度和精度。Robust position 定位算法使用了迭代的方式,是一种强计算的算法,通过多次求精计算来克服测距误差的影响,提高定位精度.但是如果初始位置估计非常不准确或误差具有相关性,算法可能无法达到精确的估计.此外,算法依赖于网络拓扑,收敛速度可能较慢.

## 3. Map-growing 算法<sup>[56]</sup>

密苏里大学哥伦比亚分校的 Li 提出的 Mapgrowing 算法要求节点具备测距能力,首先在网络中选择 1 个节点,要求该节点的连通度不小于其邻居节点,然后选择该节点的两个邻居节点形成一个良好三角形(良好三角形定义为三角形的每一个内角都大于 30 度),建立局部坐标系之后,这 3 个节点就作为锚节点向其邻居节点广播其自身坐标,邻居节点收到足够进行定位计算的信息后计算自身坐标,并将计

算结果再次向外广播,这样就可以将定位的节点逐步覆盖到整个网络.Map-growing 算法不需要部署锚节点,通过建立独立的局部坐标系进行节点定位,该算法能够适应网络拓扑不规则的情况.但当网络规模较大时,由于累积误差

的影响,距离局部坐标系中心节点较远的节点的定位误差会比较大。

## 5.4. 传感器网络定位技术的发展方向

近年来,各种新技术的发展与应用以及定位算法的研究都取得了丰富的成果,从提高定位精度和定位覆盖度、降低能耗和成本等不同方面不断地完善定位系统和算法,使得无线传感器网络定位系统的研究更加实用化。

### 1 基于 UWB 的定位系统

超宽带(UWB)脉冲无线电技术具备了许多正弦载波通信技术无法比拟的优势,非常适于微小的传感器节点.特别是 UWB 脉冲的宽度为纳秒级,占用带宽在 1 GHz 以上,采用 TOA 技术测距,理论上可以达到厘米级的测距精度,这种良好的性能为定位系统的设计提供了很好的支撑。如前所述,使用 TOA 测距,需要节点间精确的时间同步,对于 UWB 系统的时间同步,已有了许多研究成果,利用精确的时间同步,节点可以获得较高精度测距值。

### 2 改进算法,消除 NLOS 等误差影响

传感器网络节点所处的环境异常复杂,电波的散射、反射现象严重,在某些情况下存在较多障碍物,存在较大的 NLOS 误差,因此我们可以借鉴蜂窝网中克服非视距误差的方法,利用数据融合技术或历史位置信息来消除或减轻 NLOS 误差的影响。

### 3 定位算法的硬件实现

近年来,无线传感器网络节点定位问题现有的研究基本集中于定位算法的设计、开发和仿真,但同样重要的算法实现却少有问津。因此,将理论成果硬件化,产品化也是该领域的一大发展方向。

## 第六章 总结与展望

在无线通信网络中，与位置相关的服务和应用日益改变着人们的生活，它给数据打上了位置标签，使单纯的无生命数据变得鲜活起来，对我们生产生活也更有意义。随着位置信息被广泛关注，定位技术的应用前景也极为广阔，是当前无线通信领域的关键技术之一。本论文在深入研究无线定位技术领域的经典方法的基础上，针对定位技术的关键问题提出了几种解决方案，并取得了良好的效果。论文的主要内容可以概括为如下几个方面：

全面研究了无线定位技术的基本原理、定位参数估计和移动台定位算法，比较分析了经典算法的性能，为提出精度更高的定位算法打下基础；

分析了影响定位精度的关键因素，总结消除非视距误差的基本方法；

利用卡尔曼滤波器，提出两种较高精度的定位算法，通过与经典算法进行性能比较，说明该算法对 NLOS 有较强的鲁棒性；

介绍了传感器网络定位的发展及其相关技术，分析了传感器网络定位的特殊问题，提出可以借鉴蜂窝网定位中的方法来研究传感器网络的定位问题。

本论文基于目前无线定位技术中存在的难点、问题，对某些技术做了一定程度的研究，通过总结并分析各种算法的性能、各种定位环境的特点，任务还有以下几个方面需要进一步深入研究：

通过对大量现场实测信息进行分析以建立更准确的非视距误差模型，我们现在利用的非视距误差模型多为理论上的，且根据地理环境的不同，非视距传播也有很大差异，若能根据现场实测数据，提出一种快速建立某一特定环境下非视距误差模型的方法，无疑对定位精度有很大的提高；

NLOS 误差与信道信息均与地理环境有关，因而两者之间必定有某种联系，研究信道信息与 NLOS 误差的相关性，并根据先验的信道信息来估计 NLOS 误差分量，进而将其消除；

寻找移动台所发信息中的隐含信息，用以消除位置估计的模糊性，在测量值不足的情况下实现位置估计；

借鉴蜂窝网中定位的成功经验，将数据融合等思想融入传感器网络定位中，

借以提高传感器网络的定位精度。

事实证明，无线定位技术已经成为无线通信应用技术中的关键技术之一，从上世纪 60 年代导航技术出现以来，无线定位技术不断发展并极大的推动着社会的进步与发展和人们生活的改善。但是，在无线定位技术领域内，仍然存在着某些难题，如同夜空中的点点星辰扑朔迷离，激发着科研人员的研究热情。通信产业正以前所未有的速度向前发展，各项新技术层出不穷，随着相关研究的不断深入并投入应用，定位技术也将不断发展，定位精度不断提高，基于位置的应用也必将更加广泛，深刻的改变着人们的生活。可以想象，未来的通信服务将更加贴近人们的生活，基于位置的服务将无处不在。

## 附录：本文中的变量及其意义

$S$	BS 的集合
$x$	MS 的坐标 $[x \ y]^T$
$\hat{x}$	$x$ 的估计
$X_i$	第 $i$ 个 BS 的坐标 $[X_i \ Y_i]^T, i=1...N$
$r_i$	MS 与第 $i$ 个 BS 之间的距离测量值
$r_i^0$	MS 与第 $i$ 个 BS 之间的真实距离
$n_i$	$r_i$ 中的测量误差
$NLOS_m$	对第 $m$ 个基站测得的 TOA 中的非视距误差
$r_{ij}$	MS 到第 $i$ 个 BS 与到第 $j$ 个 BS 的距离之差的测量值
$r_{ij}^0$	MS 到第 $i$ 个 BS 与到第 $j$ 个 BS 的距离之差的真实值
$n_{ij}$	$r_{ij}$ 中的测量误差
$\beta_i$	MS 到第 $i$ 个 BS 的到达角测量值
$\beta_i^0$	MS 到第 $i$ 个 BS 的到达角真实值
$n_\beta$	$\beta_i$ 中的测量误差

## 参考文献

- [1] 范平志、邓平、刘林, 蜂窝网无线定位, 电子工业出版社, 2002.12
- [2] Shantz, GPS-GNSS Implementation and the Role of the National Civil Aviation Review Commission, GPS Solution, 2(1): 13-28, 1998
- [3] Zhao Y., Standardization of mobile phone positioning for 3G systems, IEEE Communications Magazine, 40(7): 108 - 116 , July 2002
- [4] Wang S.S., Green M., Malkawi M., Mobile positioning technologies and location services, IEEE Radio and Wireless Conference, 9 – 12, 2002
- [5] Rappaport T.S., Reed J.H., Woerner B.D., Position location using wireless communications on highways of the future, IEEE Communications Magazine, 34(10): 33 - 41, Oct. 1996
- [6] M. Stewart and M. Tsakiri, GLONASS Broadcast Orbit Computation, GPS Solution, 2(2): 16-17, 1998
- [7] 蔡艳辉,程鹏飞,李加洪,伽利略计划进展简述, 测绘科学,28(2)160-621, 2003
- [8] 一舟,中国的GPS)北斗星导航定位系统,中国水运,1: 45,2005
- [9] Botteron C., Host-Madsen A., Fattouche M., Cramer-Rao bound for location estimation of a mobile in asynchronous DS-CDMA systems, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001 (ICASSP '01). 4: 2221 – 2224, May 2001
- [10] Chen P.-C., Mobile position location estimation in cellular systems, dissertation of PhD., New Brunswick Rutgers, the State University of New Jersey, May 1999
- [11] Winter J., Wengerter C., High resolution estimation of the time of arrival for GSM location, IEEE 51st Vehicular Technology Conference(VTC 2000-Spring), Tokyo , 2: 1343 - 1347, May 2000
- [12] Saarnisaari H., TLS-ESPRIT in a time delay estimation, IEEE 47th Vehicular Technology Conference, 1997 , 3: 1619 - 1623, May 1997
- [13] Iltis R.A., Joint estimation of PN code delay and multipath using the extended Kalman filter, IEEE Transactions on Communications, 38(10): 1677 - 1685, Oct. 1990

- [14]Izzo L., Napolitano A., Paura L., Modified cyclic methods for signal selective TDOA estimation, IEEE Transactions on Signal Processing, [see also IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing,] , 42(11): 3294 - 3298, Nov. 1994
- [15]So H.C., Ching P.C., Performance analysis of ETDGE – an efficient and unbiased TDOA estimator, IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation 145(6):325 - 330, Dec. 1998
- [16]Wu S.Q., So H.C., Ching P.C., Improvement of TDOA measurement using wavelet denoising with a novel thresholding technique, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1997. (ICASSP-97., 1997), 1: 539 – 542, April 1997
- [17]Xin J., Sano A., Computationally efficient subspace-based method for direction-of-arrival estimation without eigendecomposition, IEEE Transactions on Signal Processing, [see also IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing], 52(4): 876 - 893, April 2004
- [18]Wang Y.Y., Chen J.T., Wen-Hsien Fang, TST-MUSIC for joint DOA-delay estimation, IEEE Transactions on Signal Processing, [see also IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing], 49(4):721 - 729 , April 2001
- [19]Raleigh G.G., Boros T., Joint space-time parameter estimation for wireless communication channels, IEEE Transactions on Signal Processing,[see also IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing], 46(5): 1333 - 1343, May 1998
- [20]Vanderveen M. C., Estimation of parametric channel models in wireless communication networks, dissertation of PhD., Stanford University, December 1999
- [21]Cheung K.W., So H.C., Ma W.-K., Chan Y.T., Least squares algorithms for time-of-arrival-based mobile location, IEEE Transactions on Signal Processing, [see also IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing], 52(4):1121-1130, April 2004
- [22]Caffery J. Jr., A new approach to the geometry of TOA location, IEEE 52nd Vehicular Technology Conference, 2000. (VTS-Fall VTC 2000), 4: 1943 – 1949, Sept. 2000

- [23]B.T. Fang, Simple solutions for hyperbolic and related position fixes, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 26(5):748 – 753, 1990
- [24]Chan Y.T., Ho K.C., A simple and efficient estimator for hyperbolic location, IEEE Transactions on Signal Processing,[see also IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing,], 42(8): 1905 - 1915, Aug. 1994
- [25]Aso M., Kawabata M., Hattori T., A new location estimation method based on maximum likelihood function in cellular systems, IEEE VTS 54th Vehicular Technology Conference, 2001 (VTC 2001 Fall), 1: 106 - 110, 2001
- [26]王昕、王宗欣、刘石, 一种考虑非视线传播影响的TOA定位算法, 通信学报, 2001年03期
- [27]Najar M., Vidal J., Kalman tracking based on TDOA for UMTS mobile location, 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1(30): B-45 - B-49, Sept.-3 Oct. 2001
- [28]L. Cong, W. Zhuang, “TDOA/AOA mobile user location for wideband CDMA cellular systems”, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.1, no.3, pp. 439 - 447 , July 2002
- [29]Thomas N.J., Cruickshank D.G.M., Laurenson D.I., A robust location estimator architecture with biased Kalman filtering of TOA data for wireless systems, IEEE Sixth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, 2000 ,1:296 – 300, Sept. 2000
- [30]Nájar M., Vidal J., Kjellström A., Kalman tracking for UMTS mobile location IST Mobile Summit 2001, Sitges , Spain, September, 9-12, 2001
- [31]Nájar M., Vidal J., Kalman tracking for mobile location in NLOS situations, 14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003.(PIMRC 2003) , 3: 2203 - 2207, Sept. 2003
- [32]Silventoinen M, Rantalainen T. Mobile station emergency locating in GSM. IEEE International Conference on Personal Wireless Communications, India, 232-238, 1996
- [33]H. Asplund et. Al., “A Channel Model for Positioning”, COST 259 TD20, Bern, Switzerland, 1998
- [34]Pieter V. R., Michiel P. L., Danie V. W., Space-time processing for CDMA mobile communication, Springer, 1 edition, February 1, 2000



- [35]Al-Jazzar S., Caffery J. Jr., You, H.-R., A scattering model based approach to NLOS mitigation in toa location systems, IEEE 55th Vehicular Technology Conference, 2002 (VTC Spring 2002), 2: 861 – 865, May 2002
- [36]Wylie M.P., Wang S., Robust range estimation in the presence. of the non-line-of-sight error, IEEE Vehicular Technology. Conference, 1:101–105, Fall 2001
- [37]Venkatraman S. , Caffery J. Jr., Statistical Approach to Non-Line-of-Sight BS Identification, 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 1:296-300, October 2002
- [38]Pages-Zamora A., Vidal J., Evaluation of the improvement in the position estimation accuracy of UMTS mobile with hybrid positioning techniques, IEEE 55th Vehicular Technology Conference, 2002. (VTC Spring 2002), 4: 1631 – 1635, May 2002
- [39]Yost G.P., Panchapakesan S., Automatic location identification using a hybrid technique, 48th IEEE Vehicular Technology Conference, 1998 (VTC 98), 1: 264 - 267, May 1998
- [40]Chen P.-C., A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation, IEEE Wireless Communications Networking Conference, 1: 316–320, 1999
- [41]Wylie M. P., Holtzman J., The Non-Line of Sight Problem in Mobile Location Estimation, 5th IEEE International Conference on Universal Personal Communications, 2:827–831, 1996
- [42]Torrieri D.J., Statistical Theory of Passive Location Systems, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 183 - 198, 1984
- [43]Greenstein L J, et al.. A new path-gain/delay-spread propagation model for digital cellular channels, IEEE Trans. on VT, 46(2): 477-485, 1997
- [44]Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPSless low cost outdoor localization for very small devices, IEEE Personal Communications, 7 (5) : 28~34, 2000
- [45]Doherty L, Pister K S J, El Ghaoui L. Convex position estimation in wireless sensor networks, Proceedings of IEEE IN FOCOM, Piscataway, USA: IEEE, 1655~1663, 2001
- [46]He T, Huang C D, Blum B M, et al. Range2free localization schemes in large scale sensor networks, Proceedings of the 9 th Annual International Conference on

- Mobile Computing and Networking (MobiCom). New York, USA: Association for Computing Machinery, 81~95, 2003
- [47] Niculescu D, Nath B., Ad hoc positioning systems (APS), Proceedings of the 2001 IEEE Global Telecommunications Conference, New York, USA: IEEE, 2926~2931, 2001
- [48] 史龙, 王福豹, 段渭军, 等. 无线传感器网络Range-Free自身定位机制与算法[J]. 计算机工程与应用, 40(23):127—130, 151., 2004
- [49] Niculescu D., Nath B. Ad Hoc positioning system (APS) using AOA, Proceedings of IEEE INFOCOM, Piscataway, USA: IEEE, 1734~1743, 2003
- [50] Deng P, Fan P Z. An AOA assisted TOA positioning system. Proceedings of the 16th International Conference on Communication Technology, Piscataway, USA: IEEE, 2000
- [51] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: an inbuilding RF based user location and tracking system, Proceedings of IEEE INFOCOM, Piscataway, USA: IEEE, 775~784, 2000
- [52] Hightower J, Boriello G, Want R. SpotON: an Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength, Seattle, WA, USA: University of Washington, 2000
- [53] Savvides A, Park H, Srivastava M. B. The bits and flops of the N-hop multilateration primitive for node localization problems, Proceedings of the First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, New York, USA: Association for Computing Machinery, 112~121, 2002
- [54] Simic S N, Sastry S. A distributed algorithm for localization in random wireless networks, UC Berkeley, EECS, Technical report, 2002
- [55] Meguerdichian S, Slijepcevic S, Karayan V, et al., Localized algorithms in wireless ad-hoc networks: location discovery and sensor exposure, Proceedings of the 2001 ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing, New York, USA: Association for Computing Machinery, 106~116, 2001
- [56] Li X L, Shi H C, Shang Y. A map2growing localization algorithm for ad2hoc wireless sensor networks, Proceedings of the Tenth International Conference on Parallel and Distributed Systems, Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society, 395~402, 2004

## 致 谢

在这三年的硕士生活即将结束之时，我谨向支持和帮助过我的师长、家人和朋友表达真心的谢意！

感谢我的指导老师刘璐教授！他严谨的学风让我克服浮躁、不断进取，不敢有丝毫懈怠；他广博的知识教我拓宽思路，徜徉学海，指点学术的迷津；他的人格魅力时时激励着我自检自省，踏实做人，认真做事。

感谢辅导员李建平老师，感谢研究生教务处的王军、李静和于崇真等老师！是他们不倦的辛勤工作，我才顺利的完成了研究生学业。

感谢已经毕业的我的同学李静！是她引领我进入课题，在学习中给我无微不至的帮助，留给我大量的经典文献和学习方法，这是我宝贵的知识财富！

感谢许宏吉、郑丽娜、孙建德老师和闫华师姐！，是他们在学业上给我指导，生活上给我帮助！感谢实验室的兄弟姐妹们，他们是我的良师益友，在他们身上我得到了很多求知、成长的快乐，学到了很多为学、为人的道理！在实验室这个大家庭里，大家互相关心、互相帮助，使研究生活不再乏味，而是丰富多彩！

感谢我的父母，感谢我的爱人！他们的包容，他们的爱是我受挫时的港湾，他们的支持和信任是我前进的风帆；是他们站在我的身后，做我强有力的后盾，给了我前进的信心和动力，让我摒除杂念，执着向前！

忠心地感谢在漫漫求学路上曾经关心和帮助过我的师长、同学和朋友。愿他们的生活永远充满着灿烂的阳光！

## 硕士期间发表的论文目录

- [1]Qingming Huang, Ju Liu, Mobile Tracking Using Hybrid Measurements in NLOS Environments, The 6th International Conference on ITS Telecommunications, PS14-1, Chengdu, China, June 2006
  
- [2]黄清明, 刘琚, 基于卡尔曼滤波的测量值重构及定位算法, 电子与信息学报, 已录用未刊出, 登记号: 051552
  
- [3]H. Yan, J. Liu, J.D. Sun, and Q.M. Huang, SNR and DFD based blind image Super-Resolution, Proc. 8-th Int. Conf. on Signal Processing, vol. 3, pp. 1314-1317, Guilin, China, 2006