

摘要

近年来,随着无线通信行业的飞速发展,用户对于安全性的要求成为移动台定位研究的重要驱动力量,并使无线网络中的移动台定位问题成为研究的热点之一。目前在蜂窝网络中对移动台定位的方案有两类:基于网络的定位方案和基于移动台的定位方案。其中基于网络的定位方案不需要对移动台进行修改,可以保护用户已有的投资,因此得到人们的极大重视。由于定位业务已经成为 3GPP 以及 3GPP2 必须支持的业务,而在第三代移动通信中主要采用的是 CDMA 网络,因此基于 CDMA 网络的移动台定位就成为研究的重点。

CDMA 蜂窝网络本身的特点决定采用的多为基于 TDOA 测量值的双曲定位方法,而利用多组到达时间差(TDOA)测量数据进行移动台定位的关键在于如何获得非线性双曲定位方程组的解。Chan 算法是一种常用的 TDOA 定位算法,当测量数据误差服从高斯分布时可以获得优秀的定位性能。但是实际环境中,TDOA 测量往往受到非视线路径(NLOS)传播误差的影响,从而使定位算法性能大幅下降。本文通过对 Chan 算法计算过程的中间阶段所获得的数据进行数据融合,提出了一种基于蜂窝网络的新的定位模型。通过仿真验证,在存在非视线路径(NLOS)干扰的条件下,在不显著提高定位时间以及复杂度的前提下,该方法比传统的 Chan 算法具有更优秀的定位性能。针对该数据融合模型在闹市环境下的定位性能进一步提出了一种基于多基站组合测量结果的数据融合模型,以增大计算量为代价获得了理想的定位性能。

关键字: 蜂窝网络; 移动台定位; 到达时间差 (TDOA); 数据融合; 非视线路径 (NLOS)

Abstract

Recently, consumer desire for security has been the main driving factors of the mobile position location research with the explosive growth of cellular services, and makes a flurry of research and development activities dedicated to position location. The location technologies in cellular network can be loosely grouped into handset-based technologies and network-based technologies. More attention is paid to the latter technologies because it does not need any modification of mobile phone. The mobile station location has been the important service supported by 3GPP and 3GPP2, and the CDMA is main technology selected by the third generation communication, so we dedicate our research to the mobile location in CDMA cellular networks.

Hyperbolic location technology based on TDOA measurements is always selected in CDMA networks because of all base stations have been synchronized by the network. The key factor of the position location used measured TDOA signals transmitted from the mobile station is to find the solution of the nonlinear hyperbolic equations. Chan algorithm is a good TDOA location method. It can acquire good location performance when the TDOA measurements obey the Gauss distribution. But in real environment, the measurements always corrupted by the Non-Line-of-Sight (NLOS) error, and the location accuracy of Chan algorithm will decrease dramatically. In this paper, a data fusion model based on different inter stage results calculated by Chan algorithm is proposed. Simulation results show that positioning accuracy of proposed model is better than the Chan algorithm and can reduce the location failure probability obviously with slight increment of calculation time when the location estimates are corrupted by the NLOS error. A location data fusion model is further proposed based on the result of the different base combination to improve the location accuracy in the bad urban environment of previous data fusion model. The simulation results show that it can achieve the anticipated performance with run up of the location time

Key Words: Cellular Networks; Mobile location; TDOA; Data Fusion; NLOS error;

0 前言

国际上对于无线电定位技术的研究始于上个世纪 60 年代的自动车辆定位 (AVL) 系统，随后该项技术就在货物运输、交通管理、犯罪跟踪和紧急救助服务等范围内得到了小规模应用。上世纪末以来，随着蜂窝移动通信系统的出现和飞速发展以及人们对智能交通运输系统 (ITS) 的需求，人们对于无线定位技术也有了新的要求，从而促使更多的研究者投入到这个领域的研究中来。美国联邦通信委员会 (FCC) 于 1996 年公布了 E-911 (Emergency call 911) 定位需求^[1,2]，要求在 2001 年 10 月 1 日前，各种无线蜂窝网络必须能对发出 E-911 紧急呼叫的移动台以不低于 67% 的概率提供精度在 125m 以内的定位服务；在 2001 年以后，系统必须提供更高的定位精度以及三维位置信息。美国 FCC 的这一规定明确了提供 E-911 定位服务将是今后各种蜂窝网络，也包括 3G 网络必备的基本功能。

由于相关法规的强制性要求和巨大市场利益的驱动，各大电信公司均开始积极就 GSM、IS-95 和第三代移动通信系统等网络制订各自的定位方案^[3,4]，从而在国际上掀起了基于蜂窝网络的无线定位技术的研究热潮。就目前的研究而言，虽然出现了很多新的定位方法和技术，但是如果不用其它手段而仅依赖于蜂窝网络资源，要想完全满足 E-911 定位要求还是有一定差距的，也有许多问题有待深入研究。为了进一步提高定位精度，还出现了一种综合利用蜂窝网络资源和 GPS 定位系统的混合无线定位技术^[5]，但是该技术要对移动终端进行改造，又会大幅度增加移动终端的成本。

基于蜂窝网络的无线定位技术不仅可以满足移动台定位需求，还可用于蜂窝网络系统设计及网络资源管理，如为电信运营商提供基于移动台位置付费的增值业务、进行运输调度等^[7-9]。目前，基于 GSM 和 CDMA 技术的蜂窝网络定位系统和蜂窝/GPS 混合定位系统已在一些国家进入商用，虽然定位精度还有待提高并且手机成本也较高，但用户数量却在迅速增长，这也说明了蜂窝无线定位技术的市场潜力。

目前在蜂窝网络中对移动台定位的方案有两类：基于网络的定位方案和基于移动台的定位方案。前者由多个基站同时检测移动台发射的信号，根据信号的特征信息由蜂窝网络对移动台进行定位估计；后者则是由移动台根据收到的多个基站发射的信号特征信息确定其与各基站之间的几何位置关系，再对其自身位置进行定位估计。显然，基于移动台的定位方案须在移动台中集成 GPS 接收机或其他定位设备，还需在移动台和蜂窝网络之间进行定位数据的传送；基于网络的定位方案则不需要对移动台进行修改，因而可以保护用户已有的投资。而在新一代蜂窝移动通信系统（如 W-CDMA 系统）中，由于需要为用户提供多种精度的定位服务，在 3GPP 的有关文档资料中对两种方案都提出了要求^[10,11]，而且重点已开始转向基于蜂窝网络的无线定位技术。本文的研究重点是基于 IS-95 CDMA 蜂窝网络的移动台定位方法。

在蜂窝网络中实现对移动台定位的基本方法主要有三类：1) 基于无线电波场强的定位法；2) 基于电波到达入射角 (AOA) 的定位方法；3) 基于电波到达时间 (TOA) 或到达时间差 (TDOA) 的定位法。电波的非视线路径 (NLOS) 传播，多径效应和多址干扰，基站之间及基站与移动台之间的时间同步测量误差等都是影响定位精度的重要因素，其中非视线路径传播是引起定位误差的主要因素。无论哪种定位方法获取移动台

精确位置估计的前提都是信号能在收发端实现视距（LOS）传播。而在蜂窝移动通信环境中，移动台和参与定位的多个基站之间均有视线路径传播的可能性非常小，这也就制约了各种算法在蜂窝网络中的定位性能。

本文根据 IS-95 CDMA 蜂窝网络的特点，选择了基于 TDOA 测量值的定位方法进行了研究，根据目前主流 TDOA 算法的抗非视线路径（NLOS）干扰性能较差的缺点，提出了一种新的基于 Chan 算法和数据融合技术的定位模型，在不显著提高计算量的前提下大幅提高存在 NLOS 干扰条件下的定位性能。然后根据其缺陷进一步提出了基于多基站测量结果组合的定位方案，在增加了一定计算量的前提下获取了令人满意的定位性能。

全文内容共分为六个部分：第一部分，简要介绍了无线电定位系统的基本原理以及分类，以及基于蜂窝网络的定位方法；第二部分，简要分析了移动通信信道特性对定位性能的影响；第三部分，简要介绍了目前比较成熟的基于 TDOA 无线电测量值的定位算法，对其性能进行了分析和对比；第四部分，简要介绍了数据融合技术以及几种典型的基于数据融合技术的定位模型；第五部分在已有的定位算法基础上提出了一种新的基于数据融合技术和 Chan 算法的定位方案并在各种典型移动通信环境下进行了详细的仿真验证和分析；第六部分针对第五部分所提出方案的缺陷进一步提出了基于多基站测量结果组合的定位方案。

1 无线电定位系统概述

无线电定位通常是指利用无线电定位设备通过无线电波进行测量，从而确定地球表面某种物体在某一个参考坐标系中的位置。它是保障人类交通安全和军事活动的一种重要手段，在现代社会中发挥着越来越重要的作用。传统的定位技术往往和导航是密不可分的，导航是指引导交通工具或其他物体从一个位置移动到另一个位置的过程，而这一过程通常都需要定位技术对其进行辅助。

1.1 无线定位技术简介

1.1.1 定位技术的分类

如图 1.1 所示，定位技术通常可以分为三大类，即陆地导航定位、无线电定位以及接近式定位^[12]。

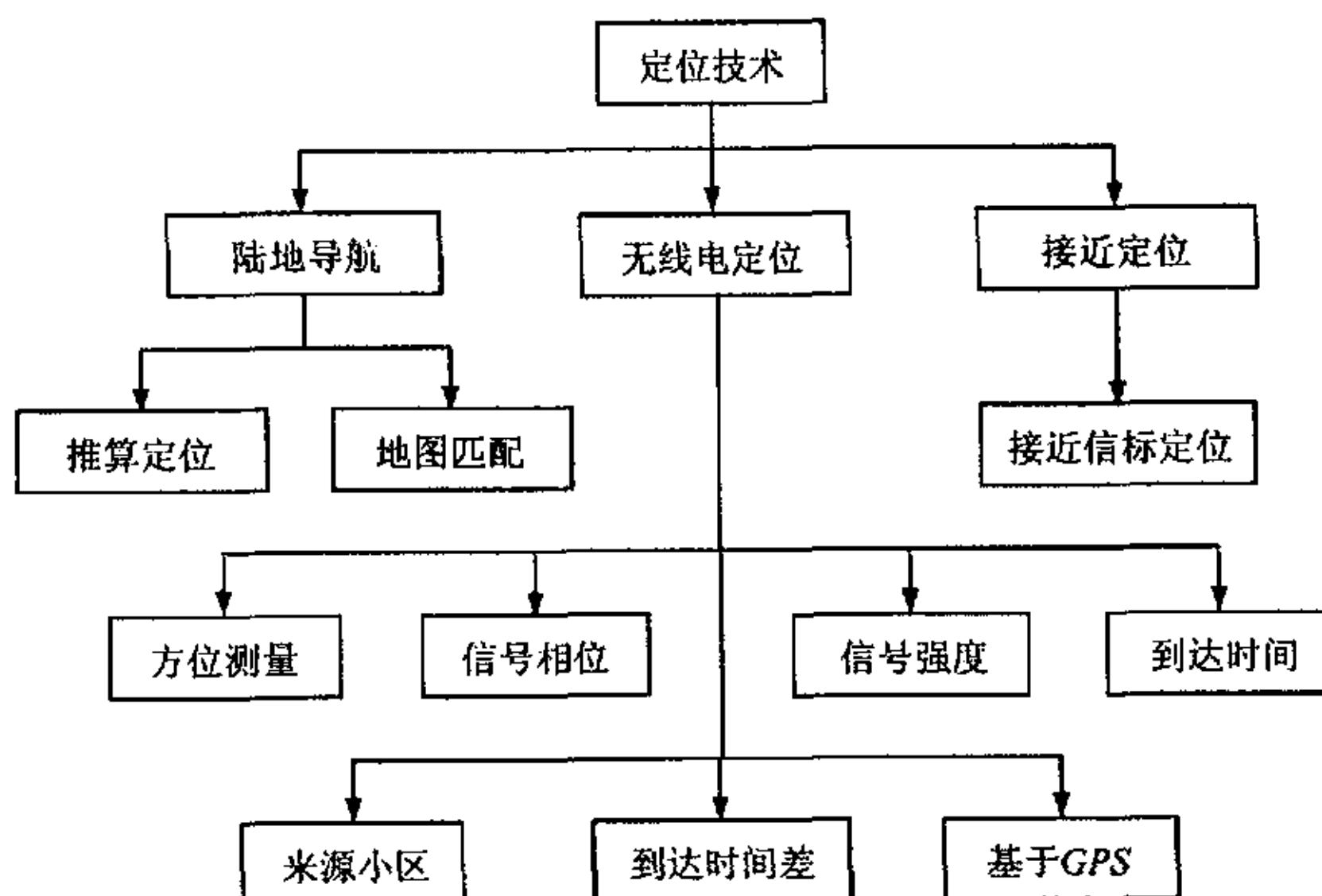


图 1.1 定位技术分类

Fig. 1.1 Location technology categories

推算定位^[12,13]是陆地导航中的一种主要技术，该技术基于一个已知的相对参考点或者起始点，连续计算目标运动过程中相对于起始点的方向和距离，借助地图匹配算法来确定移动目标位置，适用于对运动目标进行的连续定位。

推算定位系统依赖于移动终端对于加速度、速度和运动方向的测量精度。利用相关的传感器，可以测量物体前进方向 θ_i 和距离 d_i ，加上已知的起始位置 $X_0 = (x_0, y_0)^T$ ，则在时刻 n 的车辆位置 $X_n = (x_n, y_n)^T$ 可由下式确定：

$$X_n = X_0 + \sum_{i=0}^{n-1} D_i \quad D_i = (d_i \cos \theta_i, d_i \sin \theta_i)^T \quad (1-1)$$

式中 D_i 称为位移向量 (displacement vector)， θ_i 和 d_i 称为第 i 次位移方向和位移距离。

定位原理如图 1.2 所示,

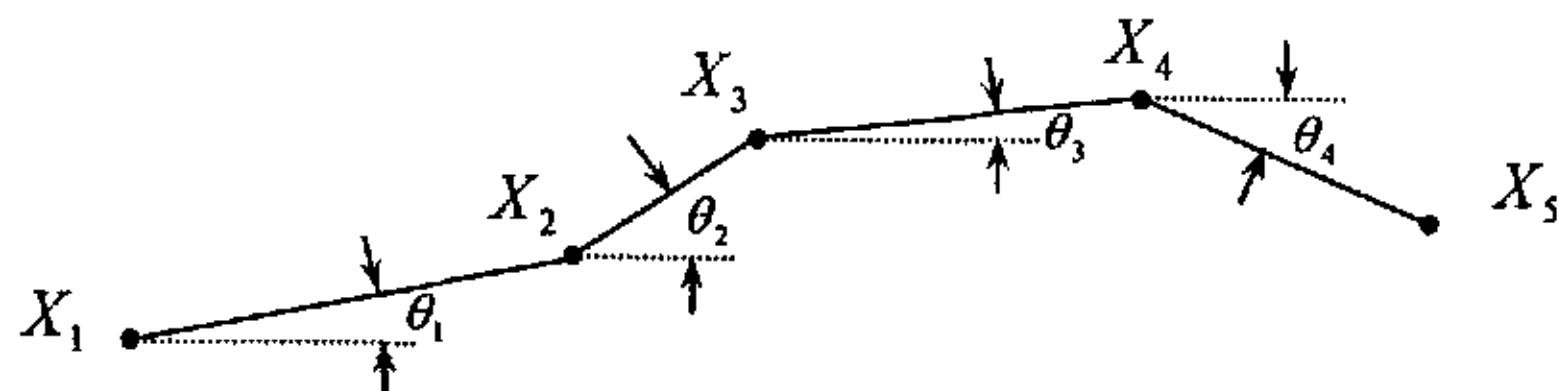


图 1.2 推算定位原理

Fig. 1.2 Dead reckoning technology

由于在推算定位系统中当前的估计位置取决于前一位置和方向，因此每次推算中产生的误差将随着推算位置的更新而不断积累。解决的办法主要是通过与电子地图相结合，借助地图匹配算法予以消除。

接近式信标定位或称信标定位^[7,8,13,14]主要通过与移动目标最靠近的固定参考检测点来进行检测，将该目标最靠近的检测点的位置作为移动目标的位置。这种定位方法对沿固定路线运动的物体或者小区域范围内比较适用，对大城市和大区域范围却不太实用，因为在较大的区域内建设布置大量的固定信标传感器和通信网络是很不经济的。

接近式信标定位可提供自定位或者远程网络定位功能。对于自定位，邻近信标必须含有信标真实位置信息并能将位置信息传给移动台；对于远程网络定位，网络必须能够通过信标识别出靠近信标的移动台，并将结果传递给网络定位中心。

无线电定位是目前定位技术的主流，主要分为基于方向测量、基于信号强度和相位、基于信号到达时间或时间差以及蜂窝网络中的基于来源小区等定位方法，这部分内容是我们研究的重点，后面章节还要进行详细讨论。基于卫星系统进行定位的 GPS 定位系统、GLONASS 系统以及欧洲的 Galileo 系统本质上也属于无线电定位技术的范畴。

1.1.2 在城市移动通信系统中的定位应用

近年来，随着蜂窝移动通信技术的飞速发展，移动用户数目飞速增加。移动通信系统在为人们带来巨大便利的同时，由其移动性和不确定性而产生的问题也越来越多，因此针对城市移动通信系统中的移动台的定位需求也就越来越迫切。

在城市移动通信系统中，定位技术主要应用于蜂窝系统设计、建立位置敏感付费体制、紧急救助、交通监控与管理以及打击犯罪等方面^[7-9,14]。

所谓敏感付费体制就是在不同的位置使用移动电话时按不同的标准收费。根据现有的收费体制，移动电话的收费要高于固定电话，当用户同时拥有移动电话和固定电话时，必然首先选择使用固定电话，如果移动运营商能通过定位在这些特殊地点（如办公室，住宅内部等）提供一个可以和固定电话相竞争的收费标准，将可以大大增加业务量。

对于利用移动通信的便利性和位置不确定性进行流动作案的犯罪分子来说，如果没有定位系统则很难追踪和捕捉。在发现罪犯利用移动电话通信时，利用无线网络确定犯罪分子的具体位置将是司法部门执法的最有力的证据。

各国都有紧急援助系统，在通过移动电话求救时，用户可能已经迷失方向，伤残或无法发出语音信号，此时援助系统会因无法确定呼救者位置而使援助失败。而随着移动用户比例的不断增加，可以预期移动台定位业务可以在用户发生危险时为用户提供更好

的安全保障。美国联邦通信委员会 (FCC) 于 1996 年公布了 E-911 (Emergency call 911) 定位需求^[1,2,8], 要求在 2001 年 10 月 1 日前, 各种无线蜂窝网络必须能对发出 E-911 紧急呼叫的移动台提供精度在 125m 以内的定位服务, 而且满足此定位精度的概率应不低于 67%; 在 2001 年以后, 系统必须提供更高的定位精度以及三维位置信息。1999 年 12 月, FCC 99-245 对 E-911 需求进一步细化, 针对定位技术在网络设备和手机中的实施, 对网络设备和移动终端生产厂商、网络运营商提出了明确要求和日程安排。在定位精度要求方面规定: 基于蜂窝网络的定位方案 (即不对移动台进行改动), 要求在 67% 的概率下定位精度不低于 125m, 在 95% 的概率下定位精度不低于 300m; 基于移动台的定位方案 (可以修改移动台), 要求在 67% 的概率下定位精度不低于 50m, 95% 的概率下定位精度不低于 150m。美国 FCC 的这一规定明确了提供 E-911 定位服务将是今后各种蜂窝网络, 特别是 3G 网络必备的基本功能。正是这一法规的颁布使得针对蜂窝网络中的移动台定位成为人们研究的热点问题。

1.2 蜂窝网络无线定位系统

1.2.1 蜂窝网络定位系统

在蜂窝网络中对移动台进行定位估计, 根据估计的位置、定位主体及采用的设备的不同可将对移动台的定位方案分为三类: 基于移动台的定位方案, 基于网络的定位方案及 GPS 辅助定位方案, 与之对应的也有下面几种定位系统。

1. 基于移动台的定位系统

这类系统也称移动台自定位系统或者前向链路定位系统。它属于基于移动台的定位方案。主要是依靠移动台根据接收到的多个固定位置的基站发射机发射的包含与位置有关的特征信息 (如场强, 信号到达时间或信号到达时间差) 确定它与基站发射机之间的几何位置关系, 然后由集成在移动台中的定位模块估算出移动台的位置并通过空中接口将定位结果传送给网络。

2. 基于网络的定位系统

这类系统也称为反向链路定位系统。它属于基于网络的定位方案。主要由多个固定位置的基站接收机同时检测移动台发射的信号, 将包含移动台位置相关信息的各接收信号送到网络中的移动台定位中心, 由定位中心中的定位功能函数估算移动台的位置。

3. GPS 辅助的定位系统

这类系统采用的是 GPS 定位方案, 由集成在移动台上的 GPS 接收机和网络中的 GPS 辅助设备利用 GPS 系统实现移动台定位。

在现有蜂窝系统中如果采用基于移动台的定位方案或者 GPS 辅助定位方案为用户提供定位服务, 则必须对现有移动台进行修改, 这势必要修改软件并增加硬件, 同时还需要通过空中接口传递定位信息, 因此, 这种方案不适用于现有的蜂窝网络。但是这两种方案能够获得的定位精度较高, 因而可以在未来通信系统中得到广泛应用。

基于网络的定位方案只需要对蜂窝网络设备进行适当扩充和修改而不需改动现有移动台, 因此可以有效保护用户现有的投资, 实现起来较容易。虽然获得的定位精度不及基于移动台的定位方案, 但需追加的投资和时间均较少, 因此比较适用于现有的蜂窝网络。

1.2.2 GPS/蜂窝网混合定位系统

利用 GPS 系统进行定位在野外可以获得较高的定位精度，但是也有几个缺点：首先，利用 GPS 系统进行定位至少需要接收 4 个卫星信号，但是在高楼林立的城市内有时很难直接观测到所需数目的卫星，同时，受城市环境中无线电波散射、反射以及非视线路径传播等影响，很难获得理论上的定位精度。其次，在移动台中集成 GPS 接收机会大大增加移动台的体积以及耗电量，而且还要工作在双频模式，这个缺点对于强调小巧轻便的手持机来说是致命的。此外，GPS 接收机开始定位往往需要几分钟的时间，这对于紧急救助等需要实时处理的场合来说是无法满足要求的。

采用基于蜂窝网络的定位系统同样需要足够多的基站参与测量。而在乡村和铁路公路沿线地区，基站分布往往比较稀疏或者沿线性布置，此时很难获得理想的定位性能。若想进一步提高定位精度，则需要增加相关的蜂窝基站或检测设备，这从成本上来说是不现实的。基于网络的定位方案可以获得的典型定位精度约为几十米至上百米。这与基于 GPS 系统的定位方案相比具有明显的差距。

为了综合 GPS 系统定位和基于蜂窝网络定位方案的优点，1999 年，QCT (QUALCOMM CDMA Technologies) 提出了 gpsOne 混合定位解决方案^[5,6]。该方案是一个完全集成手机操作的方案。采用 gpsOne 的移动台同时从 GPS 卫星和蜂窝网络收集无线电测量数据，然后通过组合这些数据生成精确的三维定位。当无法观测到足够多的 GPS 卫星或者无法获取足够的网络基站信号时，gpsOne 系统会组合这两种信息源，最少只需要一颗卫星和一个基站就可以完成定位。

gpsOne 系统的基础设施以及辅助设备提供了比常规 GPS 定位高出约 20dB 的灵敏度，这使得它可以在建筑物的内部工作，而传统的 GPS 在这种场合是无法正常工作的。

在定位时间方面，由于网络中的数据库会根据不断更新的信息通知移动台向最近的卫星询问信息，因此 gpsOne 系统获取定位信息往往只需要不到一秒钟，既是在最困难的情况下也只需几十秒钟，这样就可以满足紧急救助或者实时定位等需求。当移动台与网络无法取得联系时，依然可以找到卫星而进行定位，因此 gpsOne 系统可以非常可靠地进行工作。

gpsOne 系统因其可靠性和高定位精度而具有广泛的应用前景，但是完全集成于手机操作的方案对手持设备的处理能力提出了更高的要求，而且也使网络的负担大大增加。

1.3 蜂窝网络定位基本方法

在各种无线电定位系统中，采用的基本定位方法和技术都是相同或者相似的，都是通过测量某种信号的特征测量值实现对移动台的定位估计。从几何角度讲，确定目标在二维平面的位置可以由两个或者多个曲线在二维平面内相交得到。为方便描述，本文后面章节将待定的目标称为移动台或者手机，将参与定位的蜂窝网络基站简称为基站。

在蜂窝网络中为移动台提供地面二维定位服务，采用的基本定位方法主要有以下几种：

1.3.1 来源小区定位方法^[16,17]

来源小区 (Cell Of Origin) 定位技术是一种最简单的基于蜂窝网络的定位方法。它的定位原理是根据小区 ID 号来确定移动台位置，因此也称 Cell ID 法。

当移动台运动到某个小区并在该小区注册后，系统就将该小区基站的位置作为位于该小区内的所有移动台的位置。这种方法所能获得的定位精度不高，而且与小区覆盖半径以及基站的密集程度有关，定位误差可达几百米到几千米，因此只能提供粗略的位置估计，并不适合提供高级的定位增值业务。但是该方法实现起来非常简单，不需要对现有的软硬件进行任何修改。

1.3.2 场强测量定位方法

这种定位技术利用基站测量到达的移动台发射的无线电波场强值，根据相关的路径损耗模型，如奥村 (Okumura) 模型或者 Hata 模型^[18,19]，计算出与信号强度对应的距离信息，由相应的距离以基站为中心画出同心圆，用不同基站确定的各个圆的交点来确定移动台的位置。在实际的移动通信环境中，传播的无线电波会受到诸如阴影衰落，多径衰落的影响，因此接收的场强并不总是满足路径损耗模型中的公式，相应的就会对定位精度产生影响，从而造成定位误差的上升。

对于 CDMA 蜂窝网络，由于特有的远近效应问题，系统通常必须采用功率控制技术^[19,20]。此时基站接收到的信号功率并不能反映基站与移动台之间的实际距离，因为对基站而言，在达到理想功率控制时，从各个移动台发射后到达基站的信号强度应当是相同的。

1.3.3 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传播到达基站 i 的时间 t_i (TOA, Time Of Arrival)，就可以得到目标移动台与基站 i 之间的距离：

$$R_i = c \times t_i \quad (1-2)$$

其中， c 为电磁波在真空中的传播速度。

若已知移动台到基站 i 的距离为 R_i ，则移动台一定位于以基站 i 所在位置为圆心， R_i 为半径的圆周上。即移动台位置 (x, y) 与基站位置 (X_i, Y_i) 之间满足如下关系：

$$(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 = R_i^2 \quad (1-3)$$

由图 1.3 可以看到，当参与测量的基站数目为 2 时，由方程组解可以获得两个位置估计 MS 和 MS' ，这就产成了定位模糊。因此必须再增加一个测量基站来消除不符合条件的估计 MS' ，由于最少需要三个测量基站进行定位，因此该方法也称为三圆相交定位方法。

如果测得移动台到三个基站之间的 TOA 为 t_1, t_2 和 t_3 ，以三个基站所在位置 (X_1, Y_1) ， (X_2, Y_2) ， (X_3, Y_3) 为圆心，距离 R_1, R_2 和 R_3 为半径分别画三个圆，则移动台就应该位于三个圆的交点所处的位置。根据式 (1-2) 和式 (1-3) 可获得如下方程组：

$$\begin{cases} R_1 = ct_1 = \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2} \\ R_2 = ct_2 = \sqrt{(x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2} \\ R_3 = ct_3 = \sqrt{(x - X_3)^2 + (y - Y_3)^2} \end{cases} \quad (1-4)$$

移动台的位置 (x, y) 可通过解该方程组确定。

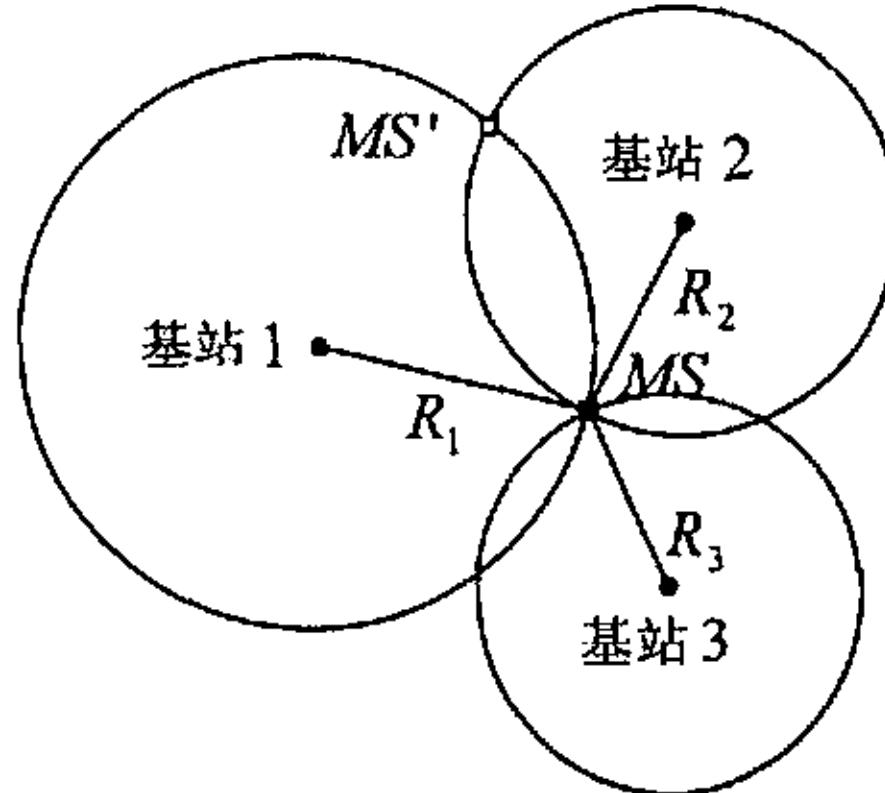


图 1.3 圆周定位法原理

Fig. 1.3 Circumferential position location technology

由于 TOA t_i 与距离 R_i 之间具有确定的关系，因此三圆相交定位方法也又称为 TOA 定位法。

TOA 测量要求移动台的发射与所有基站的接收精确同步，($1\mu s$ 的定时误差将导致约 300m 的定位误差) 也就是移动台与基站之间以及所有参与测量的基站之间均保持严格的时间同步，这就为 TOA 测量的具体实现增加了一定难度。

1.3.4 双曲线定位方法

当已知移动台到基站 1 与基站 2 的距离差 R_{21} 时，则移动台一定位于以两个基站为焦点，与两个焦点的距离差恒为 R_{21} 的双曲线上。

如图 1.4 所示，此时如果同时还知道移动台到基站 1 与基站 3 之间的距离差 R_{31} ，就可以获得另外一组以基站 1 和基站 3 为焦点，与这两个焦点的距离差恒为 R_{31} 的双曲线。两组双曲线的交点就为移动台的估计位置。

与 TOA 定位方法类似，移动台到两个基站之间的距离差可以通过测量相关的时间差来确定。即测量从两个基站同时发出的信号到达移动台的时间之差或者测量从移动台发出信号到达两个基站的时间之差 t_{n1} (TDOA Time Difference Of Arrival)，就可以获得移动台到两个基站之间的距离差：

$$R_{n1} = c \times t_{n1} \quad (1-5)$$

其中， c 为电磁波在真空中的传播速度。

移动台的位置坐标 (x, y) 与三个基站的坐标 (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) , (X_3, Y_3) 满足如下关系：

$$\begin{cases} R_{21} = ct_{21} = R_2 - R_1 = \sqrt{(x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2} - \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2} \\ R_{31} = ct_{31} = R_3 - R_1 = \sqrt{(x - X_3)^2 + (y - Y_3)^2} - \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2} \end{cases} \quad (1-6)$$

解该方程组可以获得两个解，分别对应着图 1-4 中所示的两个估计位置 MS 和 MS' 。而其中只有一个 MS 代表了移动台的真实位置，因此需要一些额外的先验信息（如小区半径以及移动台所处的扇区等）来去除位置模糊（模糊解）。

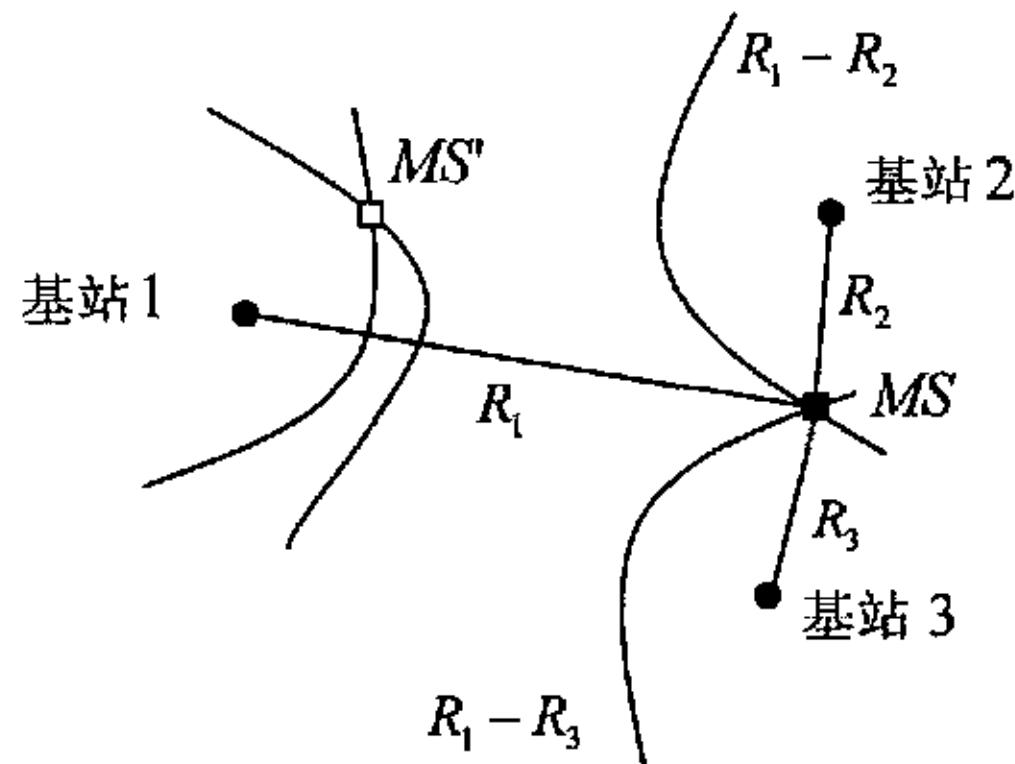


图 1.4 双曲线定位法原理

Fig. 1.4 Hyperbolic position location technology

双曲线定位方法也常称为基于电波到达时间差（TDOA）定位法，这种方法也是目前在各种蜂窝网络中研究的主流定位方法。

TDOA 测量的是移动台发射信号到达不同基站的传播时间差而不是确切的时间，它不需要移动台和基站之间的精确同步而只要求接收端（基站）之间的时间同步，因此非常适用于实际的通信系统。在 IS-95 系统中，所有基站都采用与 GPS 时间同步的 CDMA 系统时间^[19,20]，从而保证各个基站同步于统一的时间基准，TDOA 测量值也就可以通过比较各自收到的伪随机码偏置差异获得。

1.3.5 方位测量定位方法

方位测量定位方法也称为基于信号到达角度（AOA Angel of Arrival）定位方法^[8,9]。

该方法是通过基站接收机天线或者天线阵列测出移动台发射电波的入射角，从而构成一条从接收机到移动台的径向连线，即方位线。利用两个或者两个以上的接收机提供的 AOA 测量值，按照 AOA 定位算法确定多条方位线的交点即为移动台的估计位置。

如图 1.5 所示，设基站 1 和基站 2 测得的移动台所发信号的到达角度分别为 θ_1 和 θ_2 ，则移动台的位置坐标 (x, y) 与参测基站坐标 (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) 以及到达角满足如下关系：

$$\begin{cases} \tan(\theta_1) = \frac{x - X_1}{y - Y_1} \\ \tan(\theta_2) = \frac{x - X_2}{y - Y_2} \end{cases} \quad (1-7)$$

通过求解上述方程就可以获得移动台的估计位置。

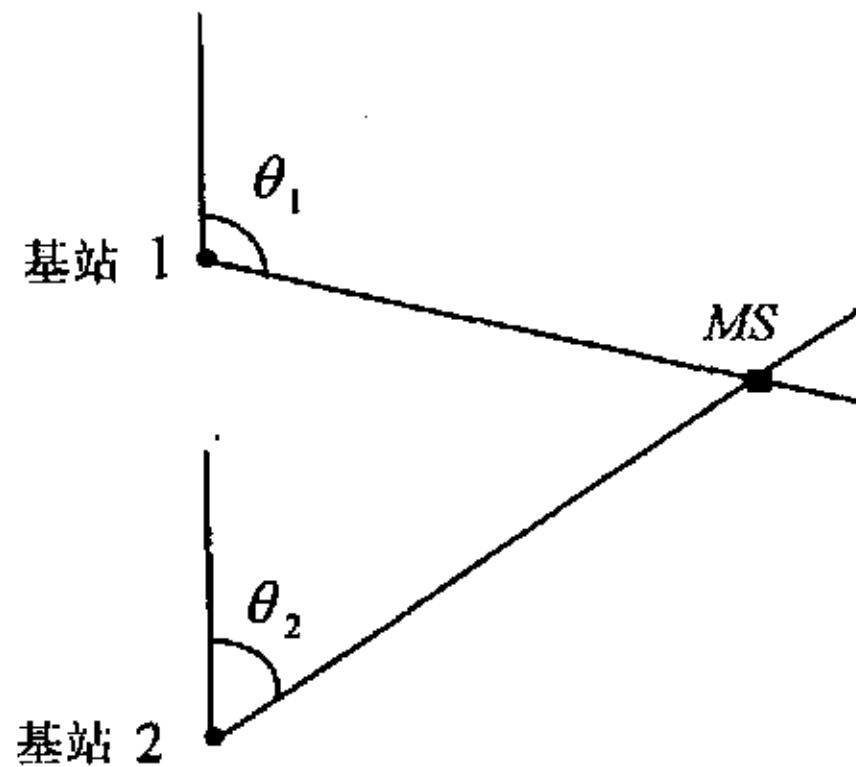


图 1.5 方位测量定位方法

Fig. 1.5 Direction finding position location technology

1.3.6 混合定位方法^[8,21-23]

这种方法是利用上述两种或者多种不同类型的信号特征测量值，如 TOA/AOA, TOA/TDOA 进行定位估计。

假设某个基站 (X, Y) 可以同时测得移动台发射信号到达基站的时间 t 和角度 θ ，则可以通过下式解出移动台的位置 (x, y) 坐标：

$$\begin{cases} \tan(\theta) = \frac{x - X}{y - Y} \\ (x - X)^2 + (y - Y)^2 = (ct)^2 \end{cases} \quad (1-8)$$

总结：通过以上各种定位技术的比较可以发现：来源小区定位方法最简单，不需要对现有设备进行任何更改，但是所能获得的定位精度也最低，只能满足最粗略的要求；场强定位法也比较简单，且在蜂窝网络中场强测量值已经用于功率切换等操作，因此获取也很方便。但是该方法受多径衰落和阴影衰落影响严重，导致定位精度低且性能不稳定，同时也适用于 CDMA 蜂窝网络；基于 AOA 的技术定位精度很高，但是需要为接收基站增加大量的天线阵列，这将使成本增高并且系统设备复杂，同时这种方法也只能从反向链路进行定位；TOA 和 TDOA 定位方法在蜂窝网络中实现相对容易，尤其是 TDOA 方法，在现有的 CDMA 蜂窝网络中实现具有先天的优势，所能达到的定位精度也比较高，因此成为研究的重点之一；混合定位方法可以吸收不同定位技术的优点但是同时也增加了设备的复杂性，因为它必须包含能够提供不同种类的测量值的相关测量设备。

1.4 基于 CDMA 蜂窝网络的定位技术

1.4.1 定位技术在 CDMA 蜂窝系统中的实现^[2,8,24-28]

1. IS-95 中的反向链路定位

IS-95 CDMA 反向链路定位方法属于基于 TDOA 的定位方法。其主要思路为在一组已经经过时间同步的基站上同时监听移动台发射的已知信号，然后对这些接收信号进行互

相关运算以估算出接收 TOA 的差值，利用这些到达时间差值就可以估计移动台的位置。IS-95 中相对较宽的带宽（1.25MHz）可以获得较尖锐的相关峰，从而可以保证获得更精确的定位估计。

反向链路定位的优点是：除发射一个已知信号外不需要待定位移动台主动参与定位。

反向链路定位的缺点是：同时在 3 个或者更多的基站上检测到移动台的发射信号是进行定位的基本要求。而移动台的发射功率相对较低，很难被多个基站同时检测到，这就产生了“可听性”问题。一种解决“可听性”问题的方法是在 IS-95 标准中加入一个增加发射功率的功能，允许移动台在参与定位时以很高的功率发射很短的猝发脉冲，这样就可以在定位期间让更多的基站检测到移动台发射的信号而不影响系统运行的稳定性。

2. IS-95 中的前向链路定位

IS-95 CDMA 前向链路定位方法同样属于基于 TDOA 的定位方法。在 IS-95 CDMA 网络中，基站持续广播前向导频伪随机序列供移动台检测 CDMA 信道的存在并为解调提供定时信息，不同的基站的 PN 序列具有不同且唯一的偏置。移动台通过搜索并锁定在一个固定的导频伪随机序列上，这样移动台就可以识别从某个特定基站发射的信号。

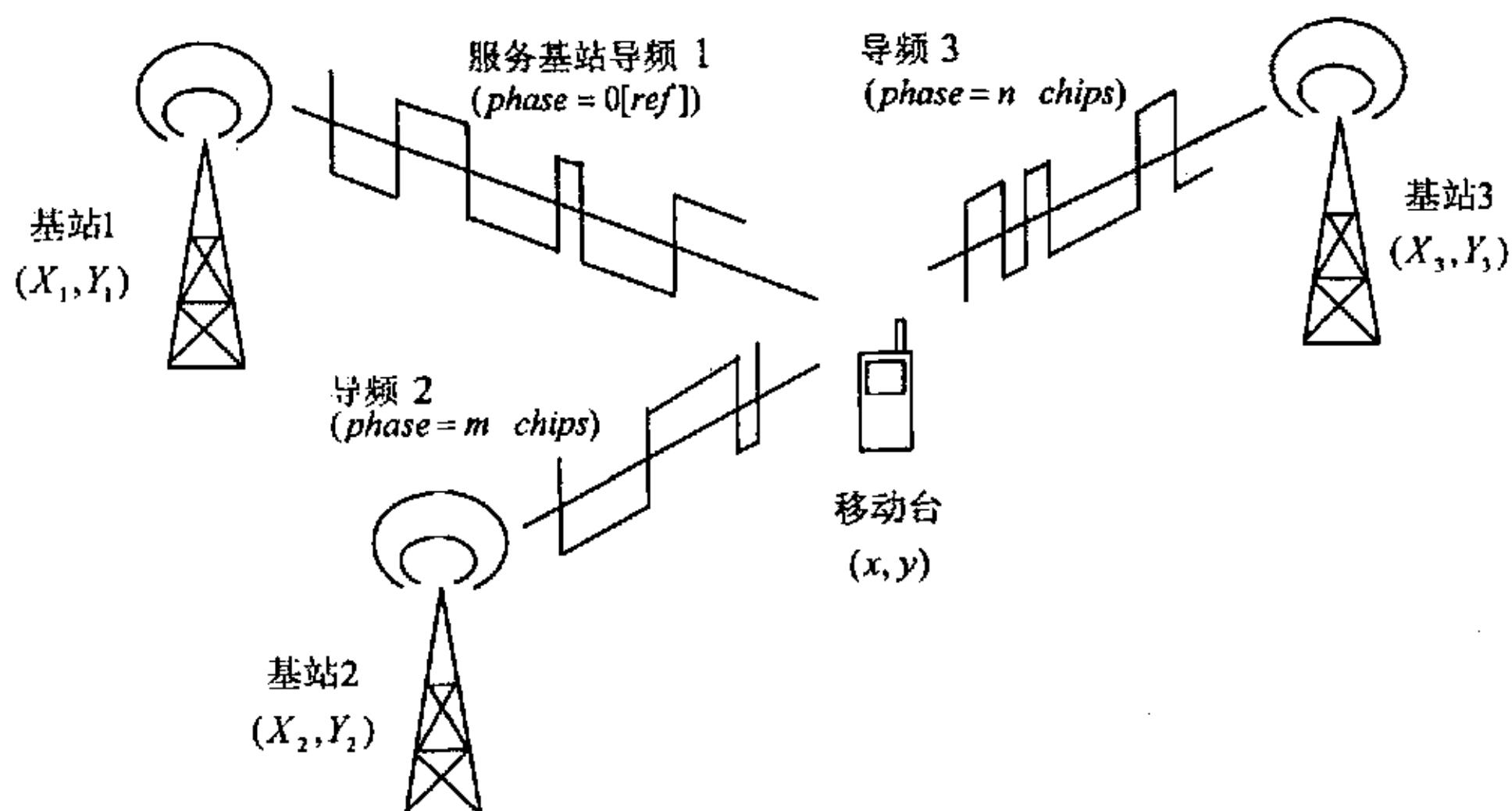


图 1.6 前向链路定位方法

Fig. 1.6 Forward link position location in IS-95 CDMA networks

IS-95 中的移动台都具有四个分集接收抽头，其中三个用来接收输入信号而另外一个用来寻找多径信号以及切换备选信道。当移动台在系统中激活后就要持续搜索邻近的最强导频信号。而在移动台接收到系统发出的导频测量请求后，就要向系统报告它接收到的所有超过阈值的导频信号。发给系统的消息中包括所有备选导频的强度以及相对于服务导频的伪随机序列偏置。

如图 1.6 所示，利用服务基站的导频作为参考，已知邻近基站发射的导频信号的偏置就可以获得 TDOA 测量组供定位使用。只要移动台能够检测、锁定并报告至少三个基站发出的不同导频，就可以对移动台进行定位。具体见式(1-9)：

$$\begin{cases} \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} - \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} = mt_c c \\ \sqrt{(X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2} - \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} = (m - n)t_c c \\ \sqrt{(X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} = nt_c c \end{cases} \quad (1-9)$$

其中 c 为光速。

这样计算的前提是参与测量的基站之间已经实现了同步，而在 IS-95 中所有基站都采用与 GPS 时间同步的 CDMA 系统时间，也就保证各个基站同步于统一的时间基准而实现基站间同步。

从前向链路获取信号的一个好处是可以避免反向链路定位中的功控问题。因为导频信号并没有经过功率控制，而且该信号占前向链路发射总功率的 5~20%^[20,27]，强度足以进行 TDOA 估计。

1.4.2 CDMA 蜂窝系统中时间估计的获取^[8]

在应用扩频技术的通信系统中有两种方法可以确定延时，一种是利用滑动相关器或者匹配滤波器的时间粗捕获，另外一种是利用延迟锁定环（DLL）或者 τ 抖动环（TDL）的跟踪法。由于延迟锁相环可以很好地跟踪时延，因此更适合于定位系统中时间估计的获取。

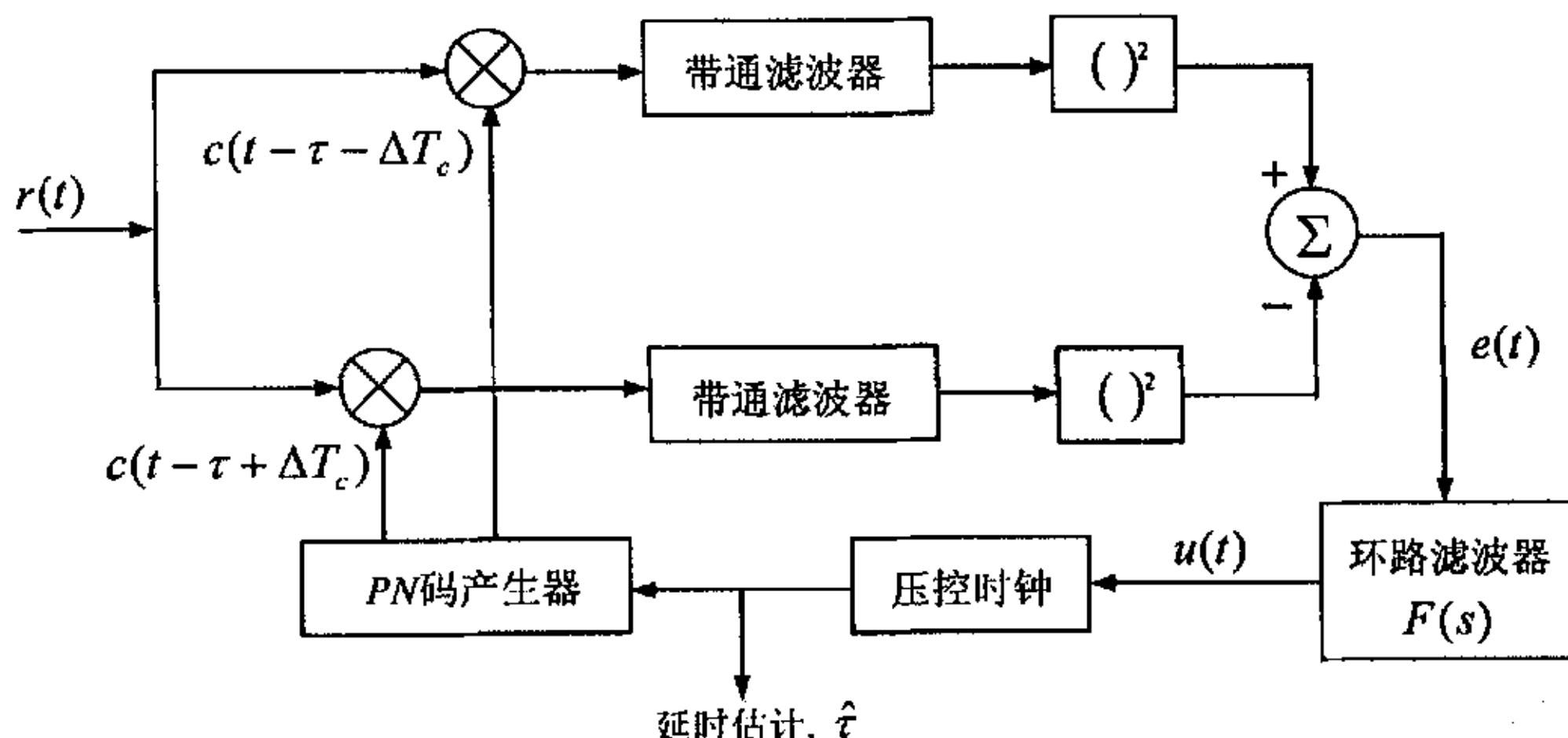


图 1.7 用于定位的延迟锁定环

Fig. 1.7 Block diagram of delay-locked loop(DLL) for position location

图 1.7 为用于定位的延时锁定环的原理框图。如图所示，延迟锁定环由鉴相器、环路滤波器、压控时钟和本地 PN 序列产生器组成。接收信号进入锁定环后，分别与本地两路扩频序列 $c(t - \tau + \Delta T_c)$ 和 $c(t - \tau - \Delta T_c)$ 进行相关操作，对相关器的输出平方并求差后获得码相位误差 $e(t)$ ，经过环路滤波器后产生一个输出 $u(t)$ 驱动压控时钟，修正本地扩频序列的码相位误差。其中相关的平方操作是为了解调数据和去除载波相位偏移。压控时钟的最终输出即是获取的时间估计值。

1.5 本文的主要工作

在 CDMA 蜂窝系统中实现对移动台的定位，由于系统本身具有的优势，因此主要采用的是基于 TDOA 测量数据的定位方法。由 TDOA 测量数据生成的是一组双曲非线性方程组，对移动台的定位是通过求解该方程组获得位置估计解来实现的。一方面，对非线性方程组的求解比较困难；另外一方面，实际环境中测量得到的 TDOA 数据又受到各种误差，其中主要是非视线路径传播误差的影响，而测量数据的误差又将导致定位结果的误差从而影响定位性能；最后，移动台的定位对实时性要求较强，因此，设计一种耗时较少并能在存在干扰的环境下仍能有效工作的定位算法就成为本文的主要工作。

本文所作的主要工作具体如下：

1. 对现有的针对 TDOA 测量数据的各种定位算法进行分析和比较，总结出各种方案的优点以及局限。
2. 针对 Chan 算法计算中获得的中间结果，采用数据融合技术提出一种基于 Chan 算法和数据融合技术的定位算法模型。
3. 对所提出的定位模型在四种典型的移动通信环境以及引入不同的误差情况下进行仿真，分析并验证算法的定位性能，如平均定位误差，误差累积分布函数等。
4. 针对所提出的前一种算法在闹市环境下定位不能满足定位要求的缺点进一步提出一种基于多基站测量结果组合的定位模型，并在相同的环境下进行仿真以验证改模型的定位性能。
5. 对以上两种算法在接近真实环境的仿真条件下进行最终的仿真以验证算法对于定位性能的提高效果。

2 移动信道特性及其对定位性能的影响

2.1 电波传播特性

对于任何一个通信系统，信道都是不可缺少的组成部分，而移动信道又是比较典型的随参信道，因此有必要了解移动通信系统中的电波传播特性问题。通常电磁波可以通过多种方式从发射天线传输到接收天线：直射波或自由空间波、地波或表面波、对流层波以及电离层波等。对于城市移动通信环境而言，直射波以及地波传输中的反射波是电波传播的主要方式。

2.1.1 自由空间传播损耗^[29-31]

自由空间传播是指在理想的、均匀的各向同性介质中传播，此时电波沿直线传播，不发生反射、折射、绕射、散射和吸收等现象，只存在由电磁波能量扩散而引起的传播损耗。设发射点处的发射功率为 P_T ，以球面波的方式进行辐射，设 λ 为工作的波长， d 为发射天线和接收天线之间的距离，单位为米。则能量均匀地分布在以发射点为球心， d 为半径的球面上。已知球面的表面积为 $4\pi d^2$ ，接收功率为：

$$P_R = \frac{P_T}{4\pi d^2} \times \frac{\lambda^2}{4\pi} = P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2-1)$$

通常，定义发射功率与接收功率的比值为传播损耗。所以，自由空间传播损耗为：

$$L = \frac{P_T}{P_R} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2-2)$$

将距离单位变为 km，频率单位转换为 MHz 以后，以分贝来表示传播损耗有：

$$L = 10 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) = 32.45 + 20 \lg d + 20 \lg f \text{ dB} \quad (2-3)$$

由式(2-3)可以看出，自由空间传播损耗只与工作频率 f 和传播距离 d 有关。当工作频率提高一倍时，电波在自由空间中的传播损耗就增加 6dB，同样，当传播距离增大一倍时，传播损耗也增加 6dB。

2.1.2 衰落特性

在移动通信环境中，除了前面介绍的自由空间传播损耗外，还有由于地形结构或者接收机附近局部散射体引起的多路径信号的叠加导致无线电波额外的损耗从而引起的衰落。主要分为慢衰落和快衰落。

1. 慢衰落特性

慢衰落产生的原因主要有两个，即阴影效应和大气折射。

移动台在运动的过程中，周围地形地物造成对电波传播路径的阻挡，形成电磁场的阴影，这种随移动台运动而不断变化的电磁阴影引起接收点场强中值起伏变化的现象叫做阴影效应。由于阴影现象产生的信号电平起伏是相对缓慢的，因此阴影衰落属于慢衰

落。

当移动台处于静止状态时,由于气象条件的平缓变化使大气相对介电常数发生变化,导致大气折射率的变化,从而引起接收点场强中值缓慢变化,这种现象称为大气折射。大气折射引起的衰落也属于慢衰落,但是它对电波传播衰落的影响远远小于阴影效应。

实际上,电波传播的慢衰落特性是上述两种衰落特性的叠加,即时间变化和位置变化两种衰落的合成。

2.快衰落特性

移动台附近的散射体(地形、地物和移动体等)引起的多径传播信号在接收点相叠加,造成接收信号快速起伏的现象称为快衰落。当移动台远离基站时,快衰落信号包络特性服从瑞利(Raleigh)分布。当移动台靠近基站时,快衰落合成信号的包络服从莱斯瑞利(Rician)分布。

2.2 电波传播损耗预测模型^[29,32]

2.2.1 地面反射(两径传播)模型

在这个模型中只考虑直射波和地面的一次反射波,而没有考虑多次反射、衍射及多普勒效应的影响。但是这个模型在估计几千米内的信号强度时比较有效。

在大多数移动通信系统中,收发天线间的最大距离为几千米,在此情况下可以忽略地球表面弯曲的影响。

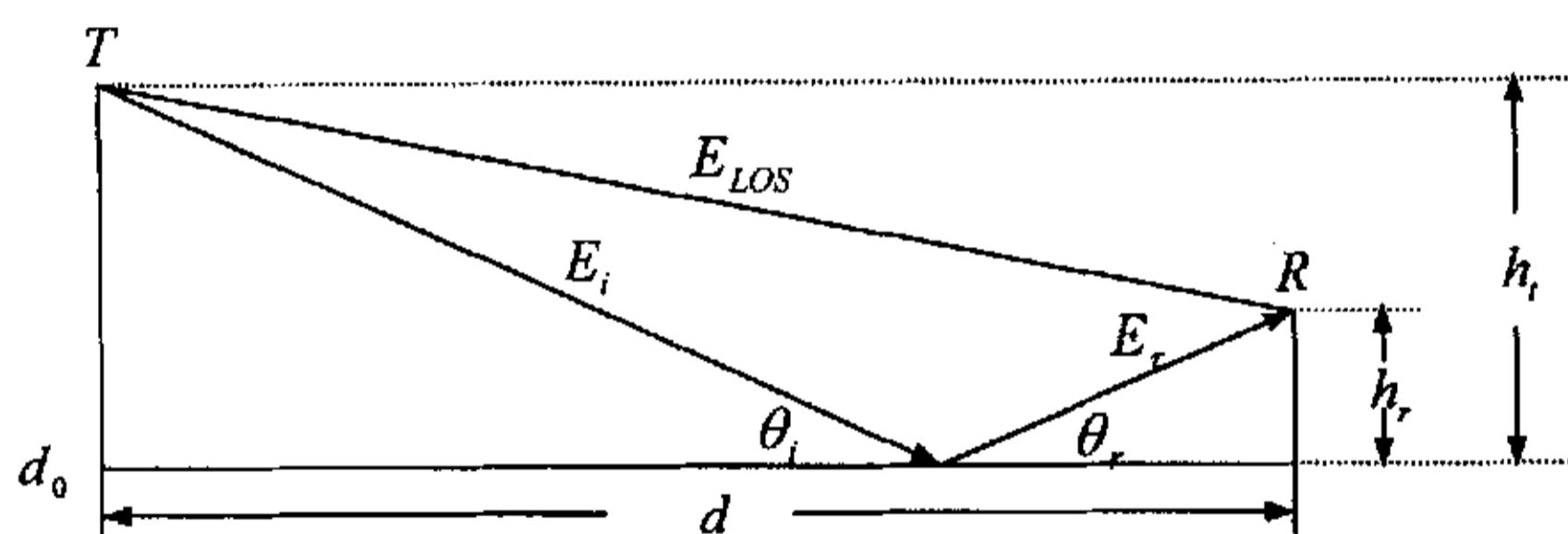


图 2.1 两径传播模型

Fig. 2.1 Two paths propagation model

如图 2.1 所示, h_t 为发射天线高度, h_r 为接收天线高度。用 E_0 表示发射端 d_0 处的电场强度。

当 $d > d_0$ 时,有:

$$E(d,t) = \frac{E_0 d_0}{d} \cos\left[\varpi_c(t - \frac{d}{c})\right] \quad (2-4)$$

其中 $|E(d,t)| = \frac{E_0 d_0}{d}$ 为场强包络。

直射波和一次反射波可以分别表示为:

$$E_{LOS} = \frac{E_0 d_0}{d} \cos\left[\varpi_c(t - \frac{d'}{c})\right] \quad E_r = \Gamma \frac{E_0 d_0}{d} \cos\left[\varpi_c(t - \frac{d''}{c})\right] \quad (2-5)$$

其中 d' 和 d'' 分别为直射波和一次反射波的传播路径长度， Γ 为反射系数， c 为光速。假设地面是良导体，地面上发生的反射为全反射，可以得到接受信号的强度为：

$$E_{TOT} = \frac{E_0 d_0}{d} \cos\left[\varpi_c(t - \frac{d'}{c})\right] - \frac{E_0 d_0}{d} \cos\left[\varpi_c(t - \frac{d''}{c})\right] \quad (2-6)$$

直射波和一次反射波的传播路径长度之差可以表示为：

$$\Delta = d'' - d' = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \quad (2-7)$$

当 $d \gg h_t + h_r$ 时，上式可以近似为：

$$\Delta = d'' - d' \approx \frac{2h_t h_r}{d} \quad (2-8)$$

则直射波和一次反射波的路径之间的相位差和到达时延差分别为：

$$\theta_\Delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \quad \text{和} \quad \tau_d = \frac{\Delta}{c} = \frac{\theta_\Delta}{2\pi f_c} \quad (2-9)$$

当 d 很大时， d' 和 d'' 之间的差值很小，因此直射波和反射波的振幅基本相同，只是相位有所区别。可得下式：

$$E_{TOT} = \frac{E_0 d_0}{d'} \cos\left(\varpi_c \frac{(d'' - d')}{c}\right) - \frac{E_0 d_0}{d''} = \frac{E_0 d_0}{d'} \cos\theta_\Delta - \frac{E_0 d_0}{d''} \approx \frac{E_0 d_0}{d} [\cos\theta_\Delta - 1] \quad (2-10)$$

经过泰勒展开，取其一次近似项得到：

$$E_{TOT} \approx \frac{4\pi E_0 d_0 h_t h_r}{\lambda d^2} \quad (2-11)$$

接收信号的功率正比于场强的平方，即反比于距离的四次方，表示为：

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (2-12)$$

其中 P_t 为发射功率， G_t 和 G_r 分别为发射和接收天线的增益。

这样就可以得到地面反射模型的路径损耗为：

$$L_p(d) = 40 \lg d - (10 \lg G_t + 10 \lg G_r + 20 \lg h_t + 20 \lg h_r) \quad (2-13)$$

由该式可以看出，对于在远区场传播的电磁波，路径损耗与频率无关，而依赖于发射天线和接收天线之间的距离。

2.2.2 Okumura 模型

Okumura 模型是最常用的预测城市地区电磁波传播环境的模型之一。它主要适用的频率范围为 150~1920MHz，适用的距离是 1~100km，天线高度为 30~1000m。

其路径损耗模型为：

$$L_o = L + A_{mu}(f, d) - G_t(h_t) - G_r(h_r) - G_A \quad \text{dB} \quad (2-14)$$

其中 L_o 为传输损耗中值； L 为自由空间传输损耗， A_{mu} 为实际环境中相对于自由空间的衰减； $G_t(h_t)$ 和 $G_r(h_r)$ 分别为基站天线和移动台天线的高度增益因子； G_A 是环境增益因子。 A_{mu} 和 G_A 都是工作频率的函数。

对于基站端：

$$G_t(h_t) = 20 \lg \left(\frac{h_t}{200} \right) \quad 30m < h_t < 1000m \quad (2-15)$$

对于移动台端：

$$\begin{cases} G_r(h_r) = 10 \lg \left(\frac{h_r}{3} \right) & h_r \leq 3m \\ G_r(h_r) = 20 \lg \left(\frac{h_r}{3} \right) & 3m < h_r < 10m \end{cases} \quad (2-16)$$

Okumura 模型是一种建立在现场实测数据基础上的模型，缺少理论方面的解释，同时该模型也不适用于地形变化剧烈的地区。另外，该模型虽然可以较好地给出结果但是却不适合计算机进行运算。

2.2.3 Hata 模型

Hata 模型对 Okumura 模型中的数据进行了分析，并将其归纳为公式，其适用的频率范围为 150~1500MHz。基本模型表达式如下：

$$L_H = 69.55 + 26.16 \lg(f) - 13.82 \lg(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55 \lg(h_r)] \lg(d) + C_{cell} + C_{terrain} \quad \text{dB} \quad (2-17)$$

其中， f 为载波频率（单位 MHz）， h_t 和 h_r 分别为基站天线和移动台天线的高度（单位为 m）， d 为基站和移动台之间的距离（单位为 km）， $a(h_r)$ 为移动台天线的校正因子。这些参数的应用范围分别为： $h_t, 30\sim2000m$, $h_r, 1\sim10m$, $d, 1\sim20km$ 。

对于大城市：

$$\begin{cases} a(h_r) = 8.29(\lg 11.75 h_r)^2 - 1.1 & f \leq 300MHz \\ a(h_r) = 3.2(\lg 11.75 h_r)^2 - 4.97 & f > 300MHz \end{cases} \quad (2-18)$$

对于中小城市：

$$a(h_r) = (1.11 \lg f - 0.7) h_r - (1.56 \lg f - 0.8) \quad (2-19)$$

经过修正后，该模型应用于郊区的路径损耗表达式为：

$$L_1(dB) = L - 2[\lg(f/28)]^2 - 54 \quad (2-20)$$

对于开阔的乡村地区的表达式为:

$$L_2(dB) = L - 4.78(\log f)^2 - 18.33\log f - 40.98 \quad (2-21)$$

其中 C_{cell} 为小区类型校正因子, 根据城市、郊区以及乡村地区分别采用不同的数值。 $C_{terrain}$ 为地形校正因子, 考虑了水域、城市及郊区开阔地以及不同的建筑、绿地等情况。它主要反映一些重要的地形环境因素对路径损耗的影响, 合理的地形校正因子取值可以通过传播模型的测试和校正取得。

2.3 多径传播与数字信号传输^[19,30-32]

对于数字通信, 通信系统的评价标准在于误码率的高低。在接收信号电平很高的情况下, 多径衰落信道仍然可以引起很高的误码率, 这也将严重影响数字通信的正常进行。具体影响在以下几个方面: 多径传播会带来额外的路径损耗; 多径衰落会导致数字信号传输的突发性差错; 多径时延扩展将导致数字信号传输的码间干扰。

2.3.1 多径时延扩展

由于穿过物体的传输或者反射的存在, 当信号从发射机直接和间接地到达接收机时就会出现多径效应。反射信号的数量取决于到达角度、载频和入射波的极化等因素。由于直接路径和反射路径之间的路径长度不同, 经过不同路径的信号在不同的时间内穿过不同的路径到达接收机, 使得接收到的信号轮廓不清或被扩展, 这种现象称为时延扩展, 也称多径时延扩展。如图 2.2 所示, 如果发射机发出一个激励脉冲, 经过一段时间传播后, 接收机接收到的不再是一个单一脉冲, 而是扩展了的脉冲组。

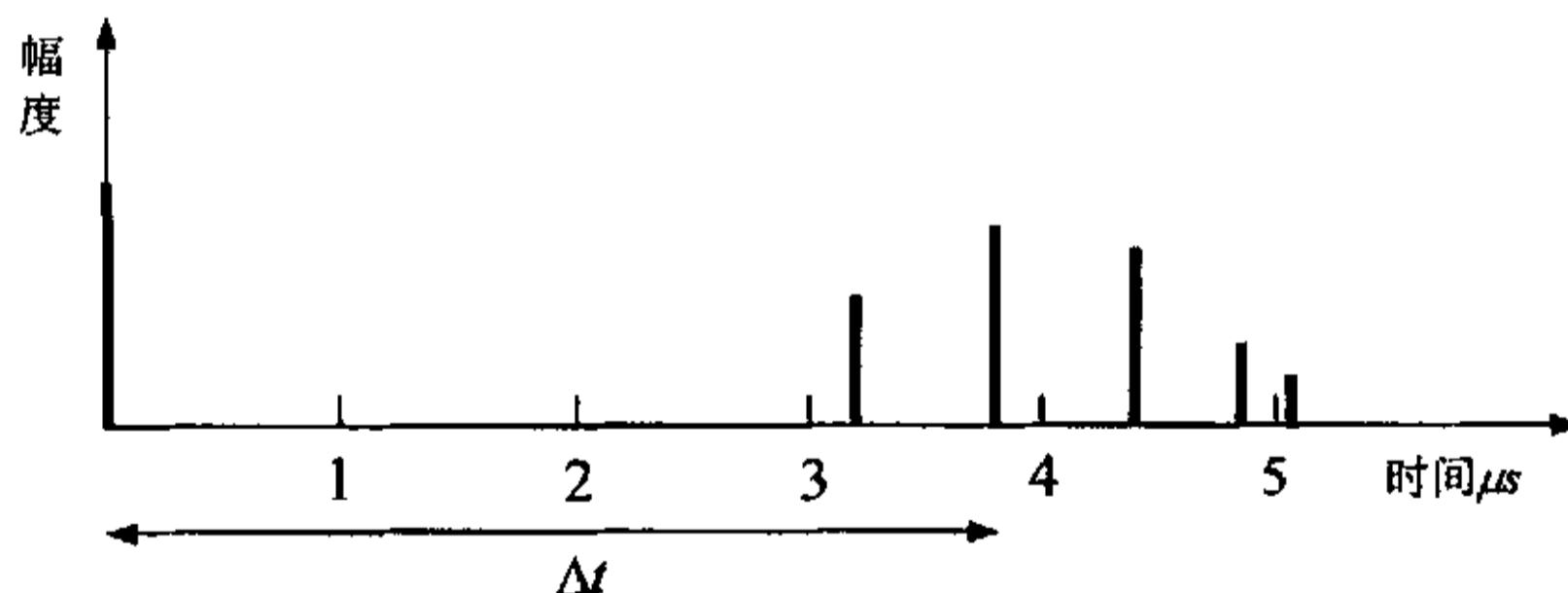


图 2.2 一个时延扩展的实例

Fig. 2.2 An example of delay spread

时延扩展定义为最大传输时延和最小传输时延的差值, 即最后一个可分辨的时延信号与第一个时延信号到达时间的差值。实际上就是脉冲展宽的时间。图 2.3 示出了一个典型的时延谱中各种多径时延参量的物理含义。

其中, 描述多径时延谱的参数有:

$p(\tau)$ 为多径时延 τ 的分布, 此处为指数曲线。

$$p(\tau) = \frac{1}{\Delta} e^{-\frac{\tau}{\Delta}} \quad \tau \geq 0 \quad (2-22)$$

T_m 为最大时延扩展, 表示功率延迟谱中第一个和最后一个 $p(\tau) \geq -X dB$ 的多径分量之间

的时延差值。

τ_a 为平均延时扩展。

$$\tau_a = \int_0^\infty \tau p(\tau) d\tau \quad (2-23)$$

Δ 为均方值时延扩展，它表征时延扩展对平均延时扩展的离散程度。

$$\Delta^2 = \int_0^\infty (\tau - \tau_a)^2 p(\tau) d\tau \quad (2-24)$$

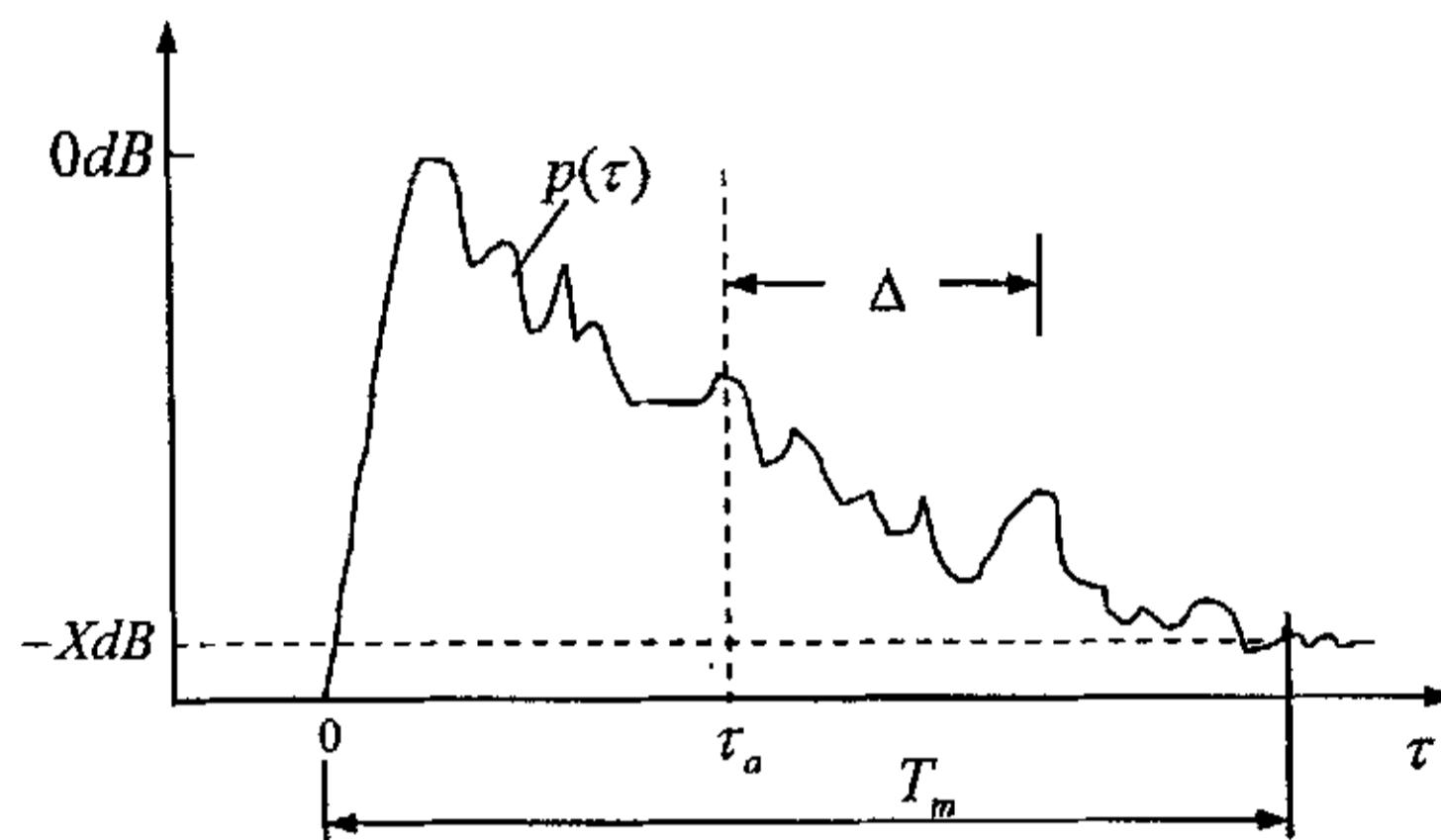


图 2.3 多径时延参量的物理含义

Fig. 2.3 Meaning of parameter of delay spread

图 2.3 中的延迟概率分布服从指数分布，另外一种常用的分布为均匀分布，即：

$$p(\tau) = \begin{cases} \frac{\tau_a}{2} & 0 \leq \tau \leq 2\tau_a \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2-25)$$

不同环境中的平均时延扩展是不同的，在数字系统中，由于时延扩展，接收信号中一个码元的波形会扩展到其他码元周期中，引起码间干扰，从而限制了多径信道的最大码速率。

2.3.2 相关带宽和相关时间

相关带宽 B_c 是频率范围的统计测量值，在这个频率范围内信道以近似等增益和线性相位通过全部频谱分量，两个接收信号的幅度或者相位有高度的相关性，即这两个信号的频谱分量以类似方式受到信道的影响，例如出现衰落或不出现衰落。相关带宽 B_c 与均方根 (RMS) 时延扩展 τ_{drms} 有关，反映信道的时间散布。

考虑分别在两个频率 f_1 和 f_2 处的两个衰落信号的包络，这两个频率的间隔为：

$$\Delta f = |f_1 - f_2| \quad (2-26)$$

如果这两个频率间隔 Δf 大于相关带宽 B_c 的话，那么相关带宽将不相关。这个概念对于频率分集接收是有用的。

通过计算相关函数 $R_T(\Delta f)$ 来检查这两个频率上的信号衰落之间的相关性。如果

$|R_r(\Delta f)| = 0.5$ ，那么对于这两个接收信号的两个衰落振幅的相关带宽为：

$$B_c = \frac{1}{2\pi\tau_{drms}} < \Delta f \quad (2-27)$$

对于移动通信系统，常用的市区模式是一系列的径向均匀的空间散射，反射系数大小相等但不相关，发射角度则是随机发生的，该模式被称为密集散射信道模式。对于这种模式，相关带宽近似为：

$$B_c \approx \frac{1}{5\tau_{drms}} \quad (2-28)$$

如果 $B_c < 1/T_s = B_w$ ，则信道为频率选择性衰落信道。频率选择性衰落失真是指信号的频谱分量是非均匀的受到信道衰落的影响，这里我们把码率 $1/T_s$ 作为信号带宽 B_w 。

当 $B_c > B_w$ 时，发生频率非选择性衰落或平坦衰落，此时信号的所有频谱分量都以类似的方式受到信道衰落的影响。平坦衰落不引入信道引起的码间干扰失真，但由于信号衰落时信噪比（SNR）的下降，性能仍然会有所下降。

综上所述，相关带宽与时延扩展成反比关系，也就是时延扩展越小，相关带宽就越大。如果信号的发射带宽大于相关带宽的话，信号将经受频率选择性衰落；如果信号的发射带宽小于相关带宽的话，则其信道属于平坦衰落信道。

2.3.3 多径衰落信道对数字信号传输的影响

多径传播将引起接收信号呈现幅度（包络）衰落和频率选择性衰落

1. 幅度衰落特性对数字信号的影响

多径信号的包络衰落分为慢衰落（短期衰落）和快衰落（长期衰落）。

幅度衰落表现为接收信噪比的缓慢变化，它将影响数字信号传输的误码率。而持续时间长的深度衰落将对数字信号的传输产生严重影响。当通信系统要求的门限电平越高时衰落持续时间也将越长，同时衰落持续时间的长短还将影响突发差错的长度。

2. 选择性衰落信道

多径衰落信道可分为时间选择性信道、频率选择性信道和频率非选择性慢衰落信道。

1) 时间选择性信道

时间选择性信道是指在时间 $(0, T)$ 内，信号的包络、频率和相位均随时间变化。

2) 频率选择性信道

频率选择性信道对不同频率的信号具有不同的增益和相移，这将对数字信号产生波形失真，甚至造成信号的重叠，引起符号间干扰。

3) 频率非选择性慢衰落信道

频率非选择性慢衰落信道是指信号带宽 W 满足条件 $W \ll B_c$ ，信号持续时间 T 满足条件 $T \ll \Delta t$ 的信道。这种信道对信号的每一个频率分量都具有相同的传输系数 μ 和相同的相位差 θ ，不会引起信号脉冲的展宽，但是会引起信号的幅度（包络）按瑞利分布的规律的变化和相位按均匀分布的变化。

2.4 移动信道对定位性能的影响^[9,33,34]

在利用蜂窝移动通信网络对移动台进行定位时，除了移动通信系统本身会受到 2.3.3

节中所介绍的各种影响从而间接影响到定位性能外,由于无线电波传播的反射以及折射等现象,还会产生一种对定位性能产生关键影响的问题,即非视线路径传播(NLOS)问题。

在多数蜂窝网络所在的城市或者闹市环境中,由于高大建筑物或其它物体的影响,移动台和基站之间无线电波传播的视线(LOS)路径往往被遮挡,从而很难实现视线(LOS)路径传播。当采用TOA和TDOA等基于时间测量的技术对移动进行定位时,与LOS路径传播的情况对比,TOA测量值就会产生一个正的附加超量延时,而TDOA测量值也会相应产生一个误差分量。无论哪种情况都会改变原有的测量数据误差的概率统计分布特性。

各种基于TDOA或者TOA测量的定位算法的性能除了受算法自身采用的数学处理方法影响以外,还要受到蜂窝网络所能提供的TDOA测量值数目以及测量精度的制约。要想取得良好的定位精度,就要求获得尽可能多的TDOA测量数目同时测量误差要尽可能的小,并且误差要服从零均值高斯分布,这样对移动台的估计才能达到理想的最大似然估计效果。将受到NLOS误差影响的具有较大误差的非高斯TOA或TDOA测量数据应用于移动台定位估计时,由于测量数据误差不再满足高斯分布,就会造成定位算法的定位性能显著下降,从而使定位估计值产生较大的偏差。

值得注意的是,NLOS误差只与无线电波传播环境有关,而与蜂窝网络的类型无关,并且无法通过提高系统接收机对TDOA或TOA的测量精度来消除。因此如何抑制NLOS传播的影响就成为目前基于蜂窝网络移动台定位系统提高定位精度的关键性问题。

除了NLOS传播以外,对TDOA和TOA定位来说,移动信道中的多径传播还会引起时间测量误差。因为基于互相关技术的延时估计器的性能会受多径传播的影响,当反射波与直射波的到达时间落在一个码片间隙内时更是如此。

3 基于 TDOA 测量的定位算法与 NLOS 误差消除

3.1 定位算法的数学模型^[35,36]

3.1.1 定位问题的最小二乘表示

在无线定位系统中，对移动台进行定位估计采用的最广泛的方法是最小二乘（LS）法。该方法可用于采用 TOA 以及 TDOA 测量值的定位估计系统。只要根据测量值建立了相应的特征方程，就可以求出移动台的位置。

设根据测量值建立的方程为：

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

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

定义 $n \times 1$ 维向量如下：

$$\mathbf{r} = \mathbf{AX} - \mathbf{Y} \quad (3-2)$$

现在需要求 \mathbf{X} 的值使得残差的平方和最小，即：

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

对该方程求导并令其为零，得到下式：

$$\frac{df(\mathbf{X})}{d\mathbf{X}} \mathbf{X} = 2\mathbf{A}^T \mathbf{X} - 2\mathbf{A}^T \mathbf{Y} = 0 \quad (3-4)$$

如果 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 非奇异，则 \mathbf{X} 为：

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Y} \quad (3-5)$$

式 (3-5) 就是最小二乘法获得的解，其中 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$ 为辅助因子，如果 $n = m$ 并且 \mathbf{A} 是非奇异的，最小二乘法的解就可以归结为下面的唯一解：

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{Y} \quad (3-6)$$

在实际应用中，可以采用加权最小二乘法，即根据每个测量值的精度在最小二乘法中采用不同的权值以提高定位精度。

残差加权平方和函数为：

$$f(\mathbf{X}) = \mathbf{W}^2 (\mathbf{AX} - \mathbf{Y})^2 \quad (3-7)$$

其中 \mathbf{W} 为加权矩阵，对它进行合理选择可以有效地提高定位精度。当 \mathbf{W} 取测量值误差的方差矩阵的逆矩阵时可以使估计误差的方差最小。但在实际应用中如何获取 \mathbf{W} 矩阵还没有确定的方法，并且残差方程又多为非线性方程，无法直接求解，因此还需要后面章节中提到的算法来求解。

3.1.2 TDOA 双曲线模型

在蜂窝网络中对移动台进行定位时，一旦获取了一个 TDOA 测量值，就可以得到移动台到达两个基站之间的距离差，多个 TDOA 测量值就可以构成一组关于移动台位置的双曲线方程组。移动台的估计位置正是通过求解该方程组获得的。

设移动台位置为 (x, y) ，第 i 个基站位置为 (X_i, Y_i) ，由式（1-2）可知：

$$R_i^2 = (X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 = K_i - 2X_i x - 2Y_i y + x^2 + y^2 \quad (3-8)$$

其中 $K_i = X_i^2 + Y_i^2$ 。

与式（1-6）类似，第 i 个基站与移动台之间的距离差为：

$$R_{ii} = ct_{ii} = R_i - R_1 = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2} - \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2} \quad (3-9)$$

为了求解该非线性方程组，可先对其进行线性化处理，

因为 $R_i^2 = (R_{ii} + R_1)^2$ ，

将该式展开可得：

$$R_{ii}^2 + 2R_{ii}R_1 + R_1^2 = K_i - 2X_i x - 2Y_i y + x^2 + y^2 \quad (3-10)$$

当 $i=1$ 时，式（3-8）可化为：

$$R_1^2 = K_1 - 2X_1 x - 2Y_1 y + x^2 + y^2 \quad (3-11)$$

将式（3-10）和式（3-11）相减就可以得到

$$R_{ii}^2 + 2R_{ii}R_1 = K_i - 2X_{ii}x - 2Y_{ii}y - K_1 \quad (3-12)$$

式中 $X_{ii} = X_i - X_1$ ， $Y_{ii} = Y_i - Y_1$ 。则式（3-12）就成为线性方程组，通过求解 x ， y ， R_1 就可以获得移动台的位置估计。

3.2 递归方法^[37]

泰勒级数展开法是一种需要一个初始估计位置的递归算法。在每一次递归运算中通过求解 TDOA 测量误差的局部最小二乘 (LS) 解来不断改进估计位置。对于一组 TDOA 测量值，该算法首先将式（3-9）在选定的移动台初始位置 (x_0, y_0) 进行泰勒展开，忽略掉二阶以上分量，将式（3-9）转化为：

$$\psi = h_t - G_t \delta \quad (3-13)$$

其中，

$$\delta = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad h_t = \begin{bmatrix} R_{2,1} - (R_2 - R_1) \\ R_{3,1} - (R_3 - R_1) \\ \vdots \\ R_{M,1} - (R_M - R_1) \end{bmatrix}$$

$$G_t = \begin{bmatrix} [(X_1 - x_0)/R_1] - [(X_2 - x_0)/R_2] & [(Y_1 - y_0)/R_1] - [(Y_2 - y_0)/R_2] \\ [(X_1 - x_0)/R_1] - [(X_3 - x_0)/R_3] & [(Y_1 - y_0)/R_1] - [(Y_3 - y_0)/R_3] \\ \vdots & \vdots \\ [(X_1 - x_0)/R_1] - [(X_M - x_0)/R_M] & [(Y_1 - y_0)/R_1] - [(Y_M - y_0)/R_M] \end{bmatrix}$$

R_i ($i = 1, 2, \dots, M$) 为初始位置 (x_0, y_0) 与各个基站之间的距离。式 (3-13) 的加权最小二乘 (WLS) 解为:

$$\delta = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = (G_t^T Q^{-1} G_t)^{-1} G_t^T Q^{-1} h_t \quad (3-14)$$

其中 Q 为 TDOA 测量值的协方差矩阵, 令 $x = x_0$, $y = y_0$, R_i 可由式 (3-8) 计算出。在下一次递归中, 令:

$$x'_0 = x_0 + \Delta x \quad y'_0 = y_0 + \Delta y \quad (3-15)$$

重复以上过程, 直到 Δx , Δy 足够小, 满足一设定的门限:

$$|\Delta x| + |\Delta y| < \varepsilon \quad (3-16)$$

此时的 (x'_0, y'_0) 即为移动台的估计位置 (x, y) 。泰勒级数展开法能得到准确的计算结果, 但需要一个与实际位置接近的初始估计位置以保证算法收敛, 对于不收敛的情况不能事先判断, 除此以外, 泰勒级数展开法还需要有关 TDOA 测量值的先验信息以确定 Q 矩阵, 并且在每次迭代运算中都要进行最小二乘运算, 计算量是非常大的。

3.3 具有解析表达式的算法

3.3.1 Fang 算法^[38]

Fang 算法利用 3 个基站对移动台进行二维坐标定位。为了简化运算, 先将三个基站置于以下坐标系统中: 基站 1 (0, 0), 基站 2 (X_2 , 0), 基站 3 (X_3 , Y_3)。则可做以下简化:

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad X_{ii} = X_i - X_1 = X_i, \quad Y_{ii} = Y_i - Y_1 = Y_i$$

式 (3-12) 可以简化为:

$$\begin{aligned} -2R_{21}R_i &= R_{21}^2 - X_2^2 + 2X_2x \\ -2R_{31}R_i &= R_{31}^2 - (X_3^2 + Y_3^2) + 2X_3x + 2Y_3y \end{aligned} \quad (3-17)$$

将这两个式子相减就可以得到简化结果:

$$y = g \times x + h \quad (3-18)$$

其中:

$$g = \left\{ (R_{31}X_2) / R_{21} - X_3 \right\} / Y_3$$

$$h = \left\{ X_3^2 + Y_3^2 - R_{31}^2 + R_{31} \times R_{21} \left(1 - \left(X_2 / R_{21} \right)^2 \right) \right\} / 2Y_3$$

将式 (3-18) 代入 (3-17) 中的第一个方程，并利用关系式 $R_i = \sqrt{x^2 + y^2}$ 可以得到：

$$d \times x^2 + e \times x + f = 0 \quad (3-19)$$

其中：

$$d = - \left\{ \left(1 - \left(X_2 / R_{21} \right)^2 \right) + g^2 \right\}$$

$$e = X_2 \times \left\{ \left(1 - \left(X_2 / R_{21} \right)^2 \right) \right\} - 2g \times h$$

$$f = (R_{21}^2 / 4) \times \left\{ \left(1 - \left(X_2 / R_{21} \right)^2 \right) \right\}^2 - h^2$$

通过求解式 (3-19) 方程就可以获得两个 x 坐标值，利用先验信息从中选择一个代入式 (3-18) 就可以取得的移动台的 y 位置坐标估计。

Fang 算法虽然能够为双曲线方程给出解析解，但是它只能解决 TDOA 测量数目与未知量数目相同的情况。当系统为了提高定位精度而提供更多的 TDOA 测量值时，Fang 算法就无法利用这些额外的测量值。

3.3.2 Chan 算法^[39]

Chan 算法是一种具有解析表达式解的非递归的双曲线方程组解法。该算法主要分为以下两个大的部分：

1. 三基站参与测量时的算法

当参与测量的有效基站数目为 3 时，可以得到两组 TDOA 测量值，先假定 R_i 已知，则移动台的位置 (x, y) 可以由式 (3-12) 按以下形式解出：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} R_{2,1} \\ R_{3,1} \end{bmatrix} R_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (3-20)$$

其中：

$$K_1 = X_1^2 + Y_1^2$$

$$K_2 = X_2^2 + Y_2^2$$

$$K_3 = X_3^2 + Y_3^2$$

将式 (3-20) 代入式 (3-8)，令 $i=1$ ，得到一个关于 R_i 的二次方程，将其正根代回到式 (3-20)，就可以得到移动台的估计位置。在某些情况下可能会得到两个正根，这种解的模糊性可通过利用已知的先验信息选择合适的解而解决。

2. 四个以上基站参与测量时的算法

当参与测量的有效基站数目为 4 个以上时，该算法能够利用网络提供的所有 TDOA 测量值。此时 TDOA 测量值数目多于未知量数目，因此首先应将初始非线性 TDOA 方

程组转化为线性方程组，然后采用加权最小二乘（WLS）算法得到一个初始解，再利用第一次得到的估计位置坐标以及附加变量等已知的约束条件进行第二次 WLS 估计，最后得到改进的估计位置。令 $\mathbf{z}_a = [z_p^T, R_1]^T$ 为未知矢量，其中 $z_p = [x, y]^T$ ，从式 (3-12) 中求出的具有 TDOA 噪声的误差矢量为：

$$\psi = h - G_a z_a^0 \quad (3-21)$$

式中：

$$h = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - X_2^2 - Y_2^2 + X_1^2 + Y_1^2 \\ R_{3,1}^2 - X_3^2 - Y_3^2 + X_1^2 + Y_1^2 \\ \vdots \\ R_{M,1}^2 - X_M^2 - Y_M^2 + X_1^2 + Y_1^2 \end{bmatrix}$$

$$G_a = \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} & R_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} & R_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{M,1} & Y_{M,1} & R_{M,1} \end{bmatrix}$$

在此我们定义无噪声时 $\{\cdot\}$ 的表达式为 $\{\cdot\}^0$ ，故 $d_{i,j} = d_{i,j}^0 + n_{i,j}$ ， $R_{i,1} = R_{i,1}^0 + cn_{i,1}$ ；又由于 $R_i^0 = R_{i,1}^0 + R_1^0$ ，可以得到噪声误差矢量为：

$$\psi = cNn + 0.5c^2n \odot n \quad (3-22)$$

其中， $B = \text{diag}\{R_2^0, R_3^0, \dots, R_M^0\}$

式中 \odot 代表 Schur 乘积。当信噪比较高时，检测得到的 TDOA 测量值通常服从近似的正态分布，因此噪声矢量 n 也服从近似的正态分布，这样就可以计算出误差矢量 ψ 的协方差矩阵。在实际环境中通常 $cn_{i,1} \ll R_i^0$ ，因此可以忽略式 (3-22) 中的第二项。

误差矢量 ψ 成为具有以下协方差矩阵的高斯随机变量：

$$\Psi = E[\psi\psi^T] = c^2BQB \quad (3-23)$$

其中 Q 为 TDOA 协方差矩阵， z_a 中 R_1 与式 (3-8) 有关，表明式 (3-21) 仍然是以 x 和 y 为变量的非线性方程组。

求解该非线性方程组时首先假定 x 和 y 和 R_1 之间无关，然后通过 WLS 算法进行第一次求解。最终结果可通过将已知关系 (R_1 与 x, y 之间关系即式 (3-8)) 代入第一次的结果中，再进行一次 WLS 计算得出。这两步是对移动台位置的最大似然 (ML) 估计的近似。

如果假定 z_a 的元素间相互独立， z_a 的 ML 估计为：

$$\begin{aligned} z_a &= \arg \min \{(h - G_a z_a)^T \Psi^{-1} (h - G_a z_a)\} \\ &= (G_a^T \Psi^{-1} G_a)^{-1} G_a^T \Psi^{-1} h \end{aligned} \quad (3-24)$$

该式是式 (3-21) 的 WLS 解。因为 B 中还含有移动台与各基站发射机之间的距离, 所以 Ψ 仍然是未知量。为了获得 z_a 的解还需要作进一步的近似。

当移动台距离基站很远时, $R_i^0 (i = 2, 3, \dots, M)$ 与 R^0 (定义距离) 接近, 故 $B \approx R^0 I$ 。由于 Ψ 的量纲没有什么影响, 式 (3-24) 可近似为:

$$z_a \approx (G_a^T Q^{-1} G_a)^{-1} G_a^T Q^{-1} h \quad (3-25)$$

如果移动台距离基站比较近, 利用上式可以得到一个初始解用于计算 B 矩阵, 第一次 WLS 计算的结果可以由式 (3-24) 得到。

为了进行第二次 WLS 计算, 需要首先计算估计位置 z_a 的协方差矩阵。该矩阵可通过计算 z_a 的期望值以及 $z_a z_a^T$ 得到。由于 G_a 含有随机变量 $R_{i,1}$, 直接计算很困难, 该协方差矩阵可采用扰动方法计算。在有噪声的情况下:

$$R_{i,1} = R_{i,1}^0 + c n_{i,1} \quad (3-26)$$

并且 $G_a = G_a^0 + \Delta G_a$, $h = h^0 + \Delta h$

由于 $G_a^0 z_a^0 = h^0$, 式 (3-21) 表明:

$$\psi = \Delta h - \Delta G_a z_a^0 \quad (3-27)$$

令 $z_a = z_a^0 + \Delta z_a$, 由式 (3-24) 可得:

$$(G_a^{0T} + \Delta G_a^T) \Psi^{-1} (G_a^0 + \Delta G_a) (z_a^0 + \Delta z_a) = (G_a^{0T} + \Delta G_a^T) \Psi^{-1} (h + \Delta h) \quad (3-28)$$

保留线性扰动分量, 再利用式 (3-22) 和式 (3-27), Δz_a 及其协方差矩阵为:

$$\begin{aligned} \Delta z_a &= c(G_a^{0T} \Psi^{-1} G_a^0)^{-1} G_a^{0T} \Psi^{-1} B n \\ \text{cov}(z_a) &= E[\Delta z_a \Delta z_a^T] = (G_a^{0T} \Psi^{-1} G_a^0)^{-1} \end{aligned} \quad (3-29)$$

其中忽略了式 (3-22) 中的平方项, 式 (3-29) 用于计算 $\text{cov}(z_a)$ 。

上述有关 z_a 的计算过程均假定 x , y 和 R_1 是相互独立的。事实上式 (3-8) 表明它们是相关的, 因此, 我们要利用这种关系来改进定位估计。当 TDOA 测量误差偏差较小时这种偏差可以忽略, 矢量 z_a 的均值为实际值, 协方差矩阵由式 (3-20) 确定。因此 z_a 可以表示为:

$$z_{a,1} = x^0 + e_1, \quad z_{a,2} = y^0 + e_2, \quad z_{a,3} = R_1^0 + e_3 \quad (3-30)$$

其中 e_1, e_2, e_3 为 z_a 的估计误差。 z_a 的前两个元素减去 X_1, Y_1 , 再对各元素求平方可得到另一个方程组:

$$\psi' = h' - G_a z_a' \quad (3-31)$$

$$\text{其中, } h' = \begin{bmatrix} (z_{a,1} - X_1)^2 \\ (z_{a,2} - Y_1)^2 \\ z_{a,3}^2 \end{bmatrix}, \quad G_a' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad z_a' = \begin{bmatrix} (x - X_1)^2 \\ (y - Y_1)^2 \end{bmatrix}$$

这里 ψ' 定义为 z_a 的误差矢量。将式 (3-30) 代入式 (3-31) 中得到:

$$\begin{aligned}\psi'_1 &= 2(x^0 - X_1)e_1 + e_1^2 \approx 2(x^0 - X_1)e_1 \\ \psi'_2 &= 2(y^0 - Y_1)e_2 + e_2^2 \approx 2(y^0 - Y_1)e_2 \\ \psi'_3 &= 2R_1^0 e_3 + e_3^2 \approx 2R_1^0 e_3\end{aligned}\quad (3-32)$$

这里的近似只有当误差 e_i 较小时才能成立，该过程是对 ML 估计的又一近似。 ψ' 的协方差矩阵：

$$\begin{aligned}\Psi' &= [\psi' \psi'^T] = 4B' \text{cov}(z_a) B' \\ B' &= \text{diag}\{x^0 - X_1, y^0 - Y_1, R_1^0\}\end{aligned}\quad (3-33)$$

由于 ψ 为高斯分布，因此 ψ' 也为高斯分布， z_a 的 ML 估计为：

$$\hat{z}_a = (G_a^T \Psi'^{-1} G_a)^{-1} G_a^T \Psi'^{-1} h \quad (3-34)$$

由于矩阵 ψ' 含有移动台的真实位置，因此是一个未知量。不过，可以通过 z_a 值计算出 B' ，式 (3-29) 中的 G_a^0 可以使用 G_a 近似，式 (3-23) 中的 B 能使用式 (3-25) 的计算结果进行近似。如果移动台处在距基站发射机较远的位置， z_a 协方差矩阵可近似表示为：

$$\text{cov}(z_a) = c^2 R^{02} (G_a^{0T} Q^{-1} G_a^0)^{-1} \quad (3-35)$$

式 (3-34) 可以简化为：

$$\hat{z}_a \approx (G_a^T B'^{-1} G_a^T Q^{-1} G_a B'^{-1} G_a)^{-1} (G_a^T B'^{-1} G_a^T Q^{-1} G_a B'^{-1}) h \quad (3-36)$$

矩阵 G_a 为常量，代入 \hat{z}_a 和 $\hat{z}_a z_a^T$ 后， \hat{z}_a 的协方差矩阵为：

$$\text{cov}(\hat{z}_a) = (G_a^T \Psi' G_a)^{-1} \quad (3-37)$$

最终移动台的定位结果为：

$$z_p = \sqrt{\hat{z}_a} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \quad \text{或} \quad z_p = -\sqrt{\hat{z}_a} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \quad (3-38)$$

选择位于定位区域内的 z_p 作为定位解。如果 \hat{z}_a 的某个坐标接近 0，则式 (3-38) 中的平方根将为虚数，对于这种情况可以将其设定为 0，定位估计的协方差矩阵可以由式 (3-31) 中的 \hat{z}_a 加上 $x = x^0 + e_x$, $y = y^0 + e_y$ 得到：

$$\begin{aligned}z_{a,1} - (x^0 - X_1)^2 &= 2(x^0 - X_1)e_x + e_x^2 \\ z_{a,2} - (y^0 - Y_1)^2 &= 2(y^0 - Y_1)e_y + e_y^2\end{aligned}\quad (3-39)$$

与 x^0 , y^0 相比 e_x , e_y 很小，可省略 e_x^2 , e_y^2 ，利用式 (3-23)、(3-29)、(3-33)、和式 (3-38) 进行定位估计。

最终 4 个以上基站参与测量的 Chan 算法可以归纳为：远距离的移动台位置可以通过式 (3-25)、(3-36) 和式 (3-38) 进行估计。定位近距离移动台时，由式 (3-25) 可

以计算出一个近似的 B 矩阵，再分别采用式 (3-24)、(3-34) 和式 (3-38) 计算出定位结果。

在 TDOA 距离差误差较小时该算法给出了能达到 CRLB 限的表达式解，但也需要有关移动台位置的先验信息以解决式 (3-38) 中存在的不确定性。在文献^[39]中，该算法的推导过程都是基于 TDOA 误差较小且为理想的零均值高斯随机变量这个前提，因此可以预计，对于实际信道环境中误差较大的 TDOA 测量值，该算法的性能将受到较大的影响。

该算法的特点是计算量小，在噪声服从高斯分布的环境下定位精度较高。但是在存在非视线路径 (NLOS) 环境下，该算法的定位精度显著下降。

3.4 NLOS 误差抑制与消除

目前对于 TDOA/TOA 测量值中的 NLOS 误差的抑制和消除的各种方法，主要是从两个角度进行，即抑制测量值中的 NLOS 误差使之尽量接近有 LOS 路径时的测量值或者是增加定位算法对于含有 NLOS 测量误差测量值的鲁棒性。

3.4.1 改进 LS 算法

在文献^[8]中，针对 NLOS 环境下的定位问题，提出了一种非线性加权最小二乘算法，可以在一定程度上抑制 NLOS 误差对定位精度的不利影响。

设移动台的位置坐标为 (x, y) ，进行 TOA 测量的 N 个基站位置坐标和 TOA 测量值分别为： (X_i, Y_i) 和 τ_i ，其中 $i=1, 2, \dots, N$ ，则 TOA 的残差函数为：

$$f_i(Z) = c\tau_i - \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad (3-40)$$

残差平方和函数为：

$$F(Z) = \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 f_i^2(Z) \quad (3-41)$$

其中 α_i 为反映第 i 个 TOA 测量值可靠性的加权值，对于 LOS 传播的 TOA 取值较大而对 NLOS 传播的 TOA 值则取值较小，以此来减小 NLOS 误差的影响。

对于式 (3-41) 可以采用多种求解方法，通常可采取最速下降法或者泰勒级数展开法。

考虑到在 NLOS 环境中，TOA 测量值中的 NLOS 误差总是为正值，可以将这一条件用于约束前面提到的算法。

如果不考虑系统的随机测量误差，对于移动台而言下式总是成立：

$$\sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - c\tau_i \leq 0 \quad (3-42)$$

令 $g_i(Z) = -f_i(Z)$ ，显然 $g_i(Z) \leq 0$ ，将式 (3-42) 作为式 (3-41) 的一个约束条件，使每一次迭代都要满足该条件，这就是带约束条件的非线性加权最小二乘算法。

有很多方法可以构成该方法的数值解，一种简单的方法是在式 (3-41) 中加入一个惩罚函数，对式 (3-42) 不能满足的情况提供一定补偿，加入惩罚函数后的改进目标函数为：

$$F(Z) = \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 f_i^2(Z) - P \sum_{i=1}^N [g_i(Z)]^{-1} \quad (3-43)$$

其中 P 为正数，并且在迭代的过程中不断减小。

该方法要求开始迭代时移动台的初始位置和真实位置相距不能太远。

3.4.2 残差加权算法

在文献^[34,40]中，提出了一种利用定位残差对定位结果进行加权的抑制 NLOS 误差的残差加权定位算法。对于 TOA 定位方法，假定 TOA 测量值的数目大于 3，则该算法分为以下几个步骤：

(1) 对于 M 个不同基站提供的 M 个 TOA 测量值进行分组，构成 N 种不同的 TOA 测量值组合：

$$N = \sum_{i=3}^M \binom{M}{i} \quad (3-44)$$

对于每种组合的基站索引为： $\{S_k | k = 1, 2, \dots, N\}$ 。

(2) 对每种组合分别采用最小二乘法进行定位估计，得到移动台位置矢量 \bar{X} 的中间结果：

$$\bar{X}_k = \arg \min R_{es}(\bar{X}; S_k) \quad (3-45)$$

对应的定位残差定义为：

$$\tilde{R}_{es}(\bar{X}_k, S_k) = \frac{R_{es} es(\bar{X}_k, S_k)}{S_k \text{ 的大小}} \quad (3-46)$$

对于 TOA 定位法：

$$R_{es}(\bar{X}_k, S_k) = \sum_{i \in S_k} [r_i - (\bar{X}_k - X_i)]^2 \quad (3-47)$$

其中 r_i 为移动台与第 i 个基站之间 TOA 所对应的距离测量值， X 表示移动台的位置坐标， \bar{X}_k 为 TOA 组合 S_k 产生的 X 的估计值， X_i 为第 i 个基站的位置坐标。

(3) 对第二步的中间结果按照下式进行加权，得到移动台的最终估计位置：

$$\hat{X} = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{X}_k (\tilde{R}_{es}(\bar{X}_k, S_k))^{-1}}{\sum_{k=1}^N (\tilde{R}_{es}(\bar{X}_k, S_k))^{-1}} \quad (3-48)$$

该算法可以比较有效地抑制 NLOS 误差的作用，但是比较明显的缺点就是计算复杂度较高。

4 数据融合技术与移动台定位

数据融合技术能够综合不同处理方法和技术的优点，结合有关先验信息对不同类型的数据进行融合，从而获取比单一处理方法和技术更优的数据输出。近年来这项技术得到了很大发展，并且在军事和民用方面都得到广泛应用。

4.1 多传感器数据融合技术简介^[41,42]

近年来，多传感器数据融合（Multi-Sensor Data Fusion）技术在军事和民用的各个领域都受到越来越多的重视。由于数据融合技术能将多个传感器提供的数据、相关数据库内的有关信息进行组合，因此与依赖于单一传感器提供信息作出的估计和推断相比，可以取得更准确的估计和更严谨的判断与推理。多传感器数据融合并不是一个全新的概念，人和动物在长期的生存斗争中就广泛使用了对视觉、听觉、味觉等多种数据信息的融合来判断周围的环境，识别可能存在的威胁，从而提高了对环境的适应能力和生存能力。

随着新的传感器、先进的信号处理技术、快速的硬件处理设备的大量出现，使实时数据融合成为可能。目前，数据融合技术主用是用于目标定位跟踪、导航、战场监视、车辆的引导和控制、医学应用及自动推理应用等。最初数据融合技术主要应用于军事领域，近年来在民用方面也得到越来越广泛的应用。

原则上，对多传感器数据的融合将明显优于单传感器数据，除了对同源数据的融合能取得统计优势外，多种类型传感器的使用也将提高检测的准确率。在数据融合模型中，决策和推理在不同的层次进行，其基础是数据的特征鉴别。因此，观测数据在模型中不同层次之间的转移及对应的决策和推理是数据融合技术的基本特征。

4.2 JDL 数据融合模型^[42,43]

为了便于增进军事和民用领域中研究人员在数据融合技术上的理解和交流，建立于1986年的实验室联合理事会（JDL）数据融和工作小组规范了数据融合的有关术语，并提出了一种广义的数据融合处理模型。

JDL 数据模型是一种概念模型，对应用于数据融合的处理过程、功能和技术进行确定和分类，可推广应用于不同领域，因此是一种功能导向模型。当数据融合过程的边界是模糊的并取决于所发生的事件时，一般来说输入边界通常位于检测后面进行信号处理的参数提取层，在理想情况下数据融合过程的输出对单个实体特征的模糊性最小，在所处应用环境中对各种实体都有比较准确的解释。

JDL 数据融合模型具有两层结构，图 4.1 为该模型的顶层结构。数据融合过程按概念分为信息源、数据预处理、第一层目标精炼、第二层状态精炼、第三层威胁精炼、第四层处理精炼、数据库管理以及人机接口。

其中信息源作为模型的输入包括了与数据融合系统相关联的各种传感器或参考信息等数据。

人机接口主要完成数据融合系统的人机交互功能，允许操作人员输入指令及信息请求等，同时还将结果以显示、警告等方式报告出来。

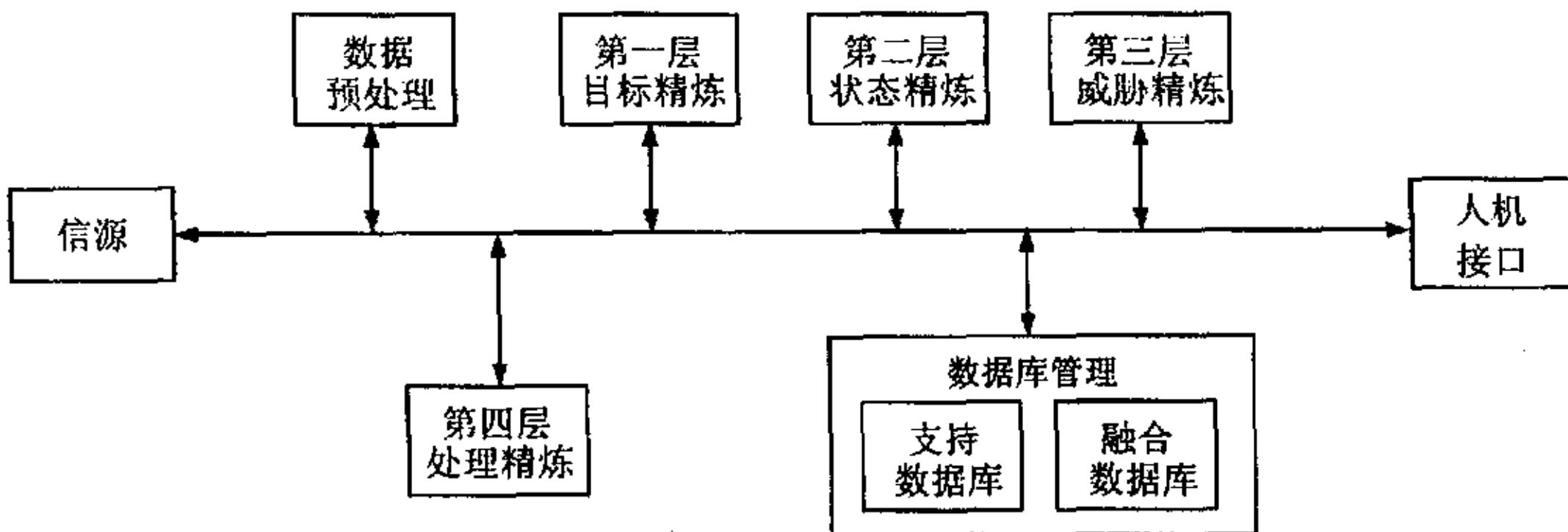


图 4.1 JDL 数据融合模型顶层结构

Fig. 4.1 Top level Structure of JDL data fusion model

数据预处理（处理精炼）是一种将数据分配到适合的处理过程并执行数据预先筛选的过程，将数据源数据转化为最适合模型处理的数据。

第一层处理（目标精炼）综合有关位置、参数、特征标识的所有信息以取得对单独目标的精炼表示。

第二层处理（状态精炼）发展对所在环境中目标和时间相互关系的描述，对单个目标的分布进行检验，并将单个目标聚集于一定的战斗单元或武器系统。

第三层处理（威胁精炼）将当前状态映射到未来，对敌方威胁、敌我双方的弱点、军事行动的机会进行推断。

第四层处理（处理精炼）主要监测数据融合性能，识别改进多层次数据融合输出的信息，具体包括 1) 检测数据融合过程性能，提供有关实时控制和长期性能的信息；2) 鉴别哪些信息对改进多层融合的结果是有益的；3) 收集所需要的信息确定对数据的特殊要求；4) 分配引导数据完成目标任务。

数据库管理是数据融合处理需要的最广泛的支持功能，是 JDL 模型的核心，执行数据修补、存储、存档、查询、数据保护等工作以支持其他各层的数据处理。

JDL 数据融合模型是一个抽象的模型，对数据融合的概念理解是有益的，但并不能用于实际系统的开发。

4.3 移动台定位估计的数据融合模型

为了将数据融合技术应用于蜂窝网络中的移动台定位估计，许多学者进行了研究并取得一定成果。Kleine-Ostmann 于 2001 年率先提出了一种对独立检测的 TOA 和 TDOA 数据进行数据融合^[44]，以获得优于单独使用 TOA 或 TDOA 数据进行定位估计的移动台定位估计数据融合模型。模型中的融合既有对 TOA 和 TDOA 测量数据的融合，又包括对 TOA 和 TDOA 数据定位估计的融合；由于两种定位技术有不同的定位误差和方差，因此融合时通常根据方差进行加权。

如图 4.2 所示，该模型提供 4 种定位估计值供选择，分别是单独由 TOA 和 TDOA 测量值得到的定位估计值，由 TOA 转化得到的 TDOA 数据与 TDOA 测量数据在第一层数据融合中得到的定位估计值；在第二层数据融合中，由 TOA 和 TDOA 数据定位估计值采用贝叶斯推论得到的定位估计值；对 TOA、TDOA 和第一层融合的定位估计均采用泰勒级数展

开法。以上四种定位估计输入到第四层，并在该层中选择出一种最优的定位估计值作为模型的优化输出。

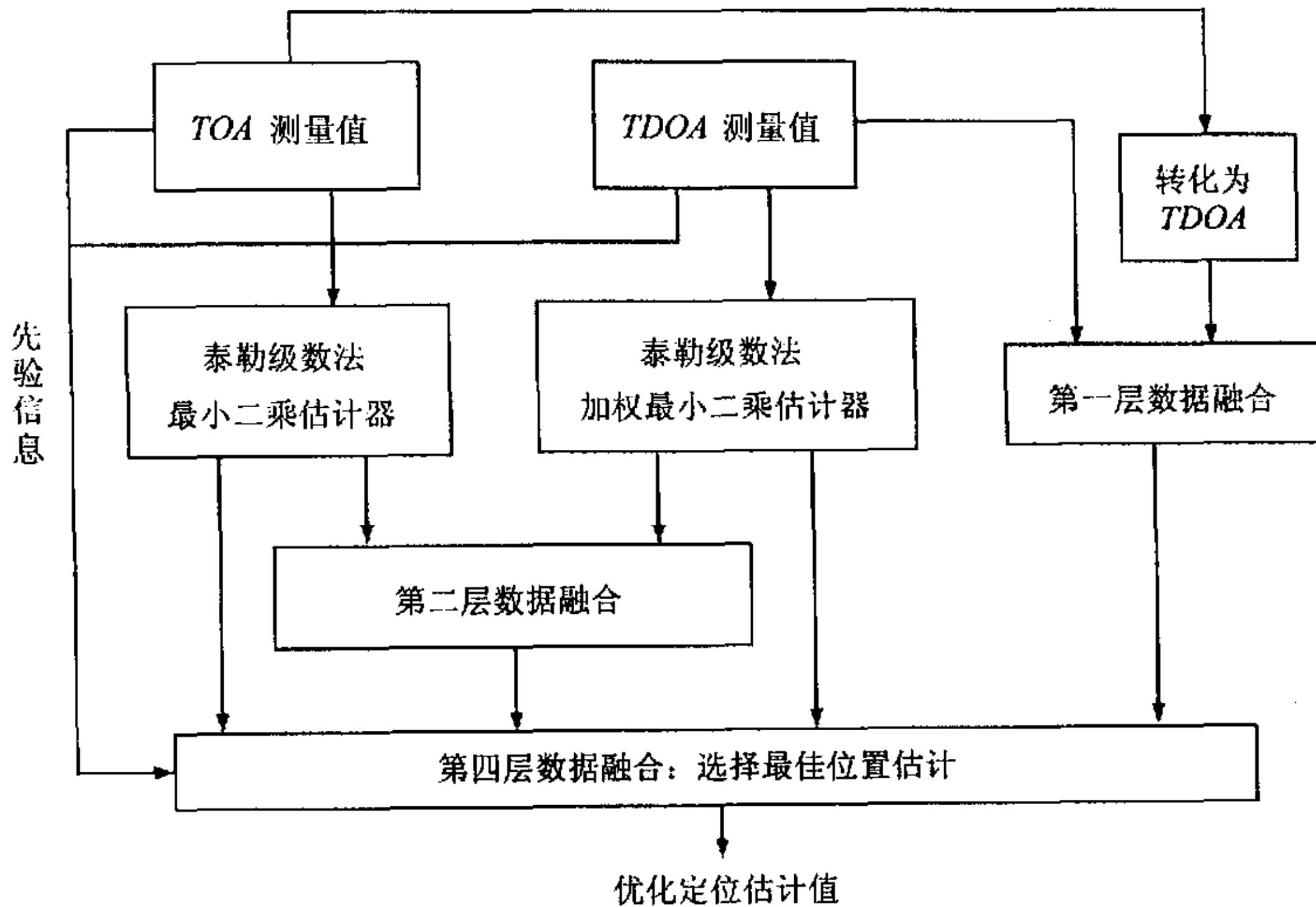


图 4.2 Kleine-Ostmann 定位数据融合模型

Fig. 4.2 Kleine-Ostmann position location data fusion model

1. 第一层数据融合

第一层融合对蜂窝网络中独立获取的 TOA 和 TDCA 测量数据进行融合。首先将 TOA 测量值转化为 TDCA 数据，再将两组独立的 TDCA 数据组合在一起，将它们转化为移动台的联合位置估计。融合过程基于不同的优化标准可以采用三种不同的定位估计器：泰勒级数加权最小二乘（WLS）估计器，最大似然估计器，卡尔曼滤波器。

WLS 估计器使误差的加权平方和最小，定位估计问题就变成了如何求解由 TDCA 数据构成的双曲线非线性超定方程组问题，通过泰勒级数展开将 TDCA 方程组线性化，采用 WLS 估计器就能得到使加权残差平方和最小的最优解。第一层融合中由于 TDCA 数据量增大了一倍，因此计算复杂性也增大了一倍。假定 TOA 和 TDCA 的误差都服从理想高斯分布，则 WLS 估计器的输出同时也是最大似然估计器。由于蜂窝网络中对移动台的定位估计只需要一个单一的位置估计而不是动态目标跟踪，因此模型中没有采用卡尔曼滤波器来处理 TOA 和 TDCA 数据。

2. 第二层数据融合

第二层数据融合对 TOA 和 TDCA 的位置估计进行融合。对具有均值 x_0 ，方差 σ_0^2 的 TOA 位置估计和均值为 x_m ，方差 σ_m^2 的 TDCA 估计进行融合，以获得新的位置估计。加权融合过程基于贝叶斯推论，融合后的位置估计 x_c 以及对应的方差 σ_c^2 为：

$$x_c = x_0 + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0^2 + \sigma_m^2} (x_m - x_0) \quad \sigma_c^2 = \frac{1}{\sigma_0^{-2} + \sigma_m^{-2}} \quad (4-1)$$

3. 第四层数据融合

第四层融合过程选择合适的位置估计。选择的标准主要基于各个估计器的输出，基站配置的几何位置信息以及 TOA 和 TDOA 测量数据的统计特性。通常具有最小方差的估计是可靠的估计，不过也不能单纯依靠方差来进行选择。当移动台靠近某个测量基站或者基站的几何分布较差的时候，就应该舍弃受基站分布影响的 TDOA 估计。

4.4 数据融合增强定位模型

Kleine-Ostmann 提出的模型实现了对 TDOA 和 TOA 定位技术的融合，取得了较好的定位性能。但是随着智能天线阵列逐渐广泛的应用，服务基站还有可能提供移动台的较为准确的 AOA 测量值，并可在一定程度上增大蜂窝网络的定位服务区。因此如何进一步充分利用蜂窝网络所能提供的所有电波特征测量值（包括 AOA 和场强测量值）就成为值得深入探讨的问题。文献^[45]在 TOA 和 TDOA 测量值的基础上引入了 AOA 以及场强测量值，提出了一种融合程度更高的增强型数据融合模型。

图 4.3 为在 Kleine-Ostmann 数据融合模型的基础上提出的数据融合增强模型。

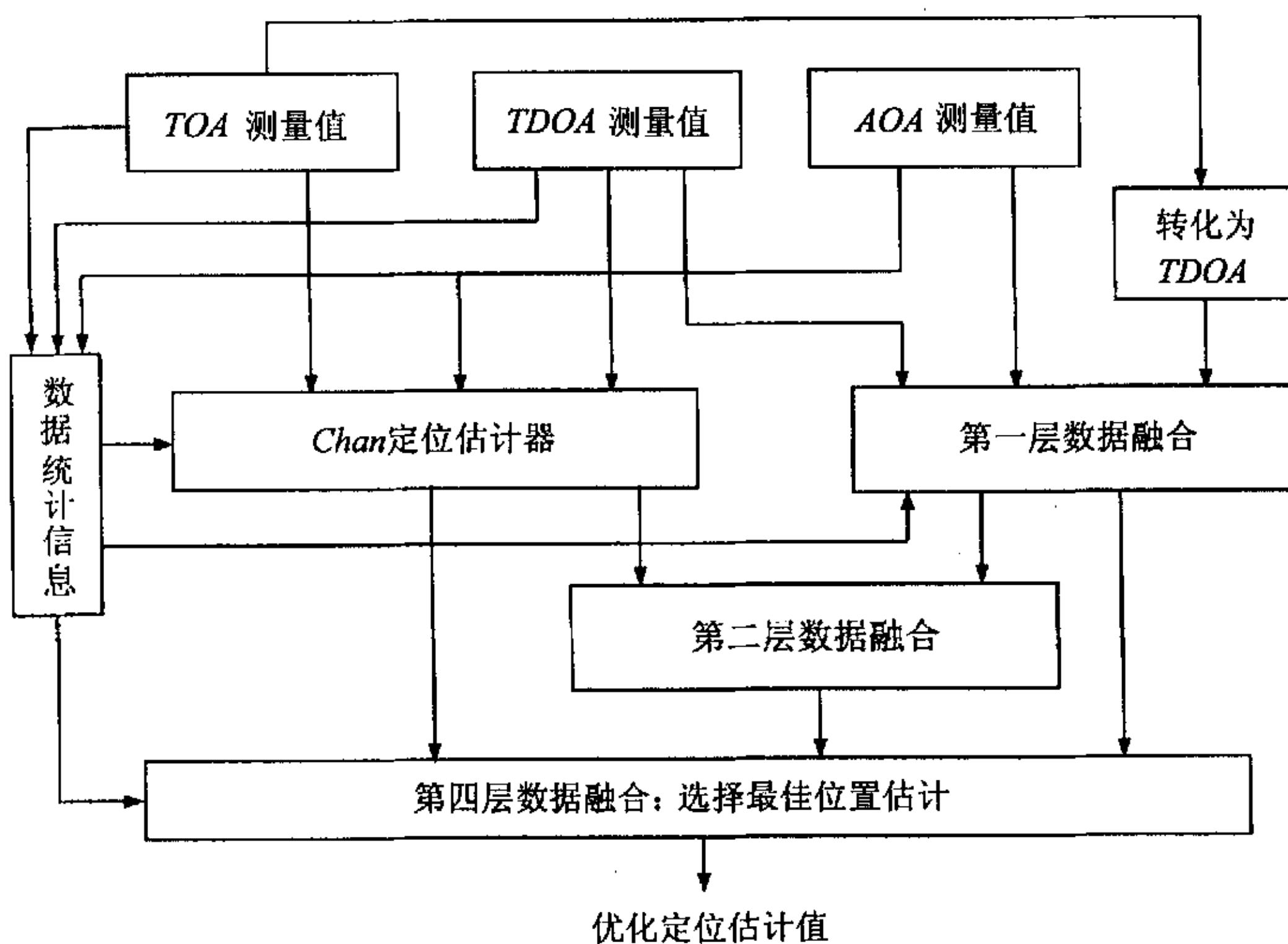


图 4.3 定位数据融合增强模型
Fig. 4.3 Enhanced position location data fusion model

1. 第一层数据融合

第一层融合对蜂窝网络中独立获取的 TOA 和 TDOA 测量数据进行融合。具体包括将

TOA 测量值转化为 TDOA 数据，再将该 TDOA 数据与 TDOA 测量值组合在一起的融合；由 TOA 测量值转化的 TDOA 数据与 TDOA 测量数据在 TDOA/AOA 混合定位法中进行的融合。

2. 第二层数据融合

第二层数据融合将 TOA 和 TDOA 的定位估计 (x_0, σ_0^2) ，TOA 和 AOA，TDOA 和 AOA 的定位估计 (x_m, σ_m^2) 采用贝叶斯推论按照式 (4-1) 进行加权，产生新的位置估计 (x_c, σ_c^2) 。

3. AOA 测量值的使用

在融合模型中是否采用含有 AOA 测量值的混合定位法取决于 AOA 测量数据的可靠性。可靠性可以通过统计数据中 AOA 测量数据的标准差来进行判断，当标准差小于某个确定的门限值，也即 AOA 测量数据比较准确时才采用含有 AOA 的混合定位法，否则采用不含 AOA 的定位方法。

4. 第四层数据融合

第四层融合过程从八个定位估计值中选择合适的位置估计。选择的标准应该综合考虑各个定位估计值的均值、方差或者标准差的大小，以及定位误差概率分布，移动台与服务基站之间的相对位置等因素。

5. 数据预处理

在图 4.3 中并没有标出场强测量值，它只是用于对 TOA、TDOA 以及 AOA 测量值进行有效性检测，对于低于场强门限值的测量值则视为无效的数据，不参与定位估计。

4.5 多算法协同定位模型

在基于蜂窝网络的定位技术中，基于 TDOA 测量的技术以其独特的优点受到人们的关注并且是应用于蜂窝网络移动台定位的主要候选技术。现有的几种 TDOA 定位算法各有不同的特点且在不同的环境中能够表现出不同的性能，但是没有一种算法能在不同的蜂窝网络环境中都表现出最佳性能。为了进一步提高移动台定位的准确性，文献^[9,45]提出了一种多算法协同定位模型。

图 4.4 为该定位模型的结构图。

1. 第一层数据融合

在第一层融合中，将利用 Chan 算法和泰勒级数展开法分别得到的定位估计值按照文献^[34]中的 TDOA 残差加权法进行加权，从而得到一种新的定位估计值。设 TDOA 测量值的数目为 N ，由 Chan 算法和泰勒级数展开法分别得到的定位估计值为 X_C 和 X_T ，服务基站的坐标为 X_0 ，邻近的参与测量基站坐标为 X_i ，TDOA 测量值为 t_i 。两种定位算法获得的估计值的残差定义为：

$$R_C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [ct_i - (|X_i - X_C| - |X_0 - X_C|)]^2 \quad (4-2)$$

$$R_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [ct_i - (|X_i - X_T| - |X_0 - X_T|)]^2 \quad (4-3)$$

其中， c 为电磁波在真空中的传播速度。

第一层获得的数据融合结果为：

$$\hat{X} = \frac{R_C^{-1} X_C + R_T^{-1} X_T}{R_C^{-1} + R_T^{-1}} \quad (4-4)$$

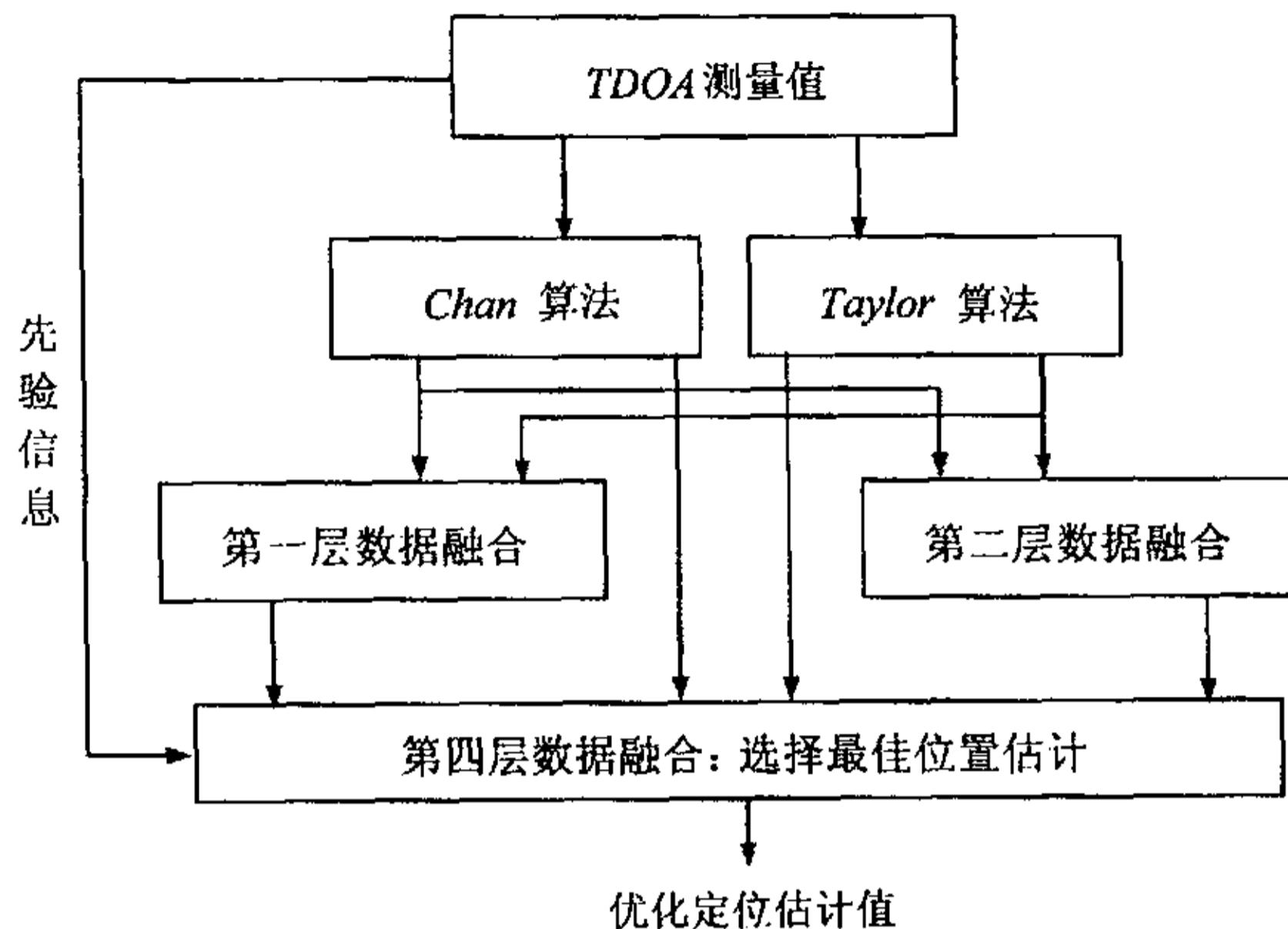


图 4.4 多算法协同定位模型

Fig. 4.4 Multi-algorithm joint location model

2. 第二层数据融合

与前两种数据融合模型类似，本层数据融合仍采用贝叶斯推论按两种算法定位估计值的方差进行加权。设 Chan 算法估计值的均值和方差为 (x_0, σ_0^2) ，泰勒级数法估计值的均值和方差为 (x_m, σ_m^2) 采用按照公式 4-1 进行加权，产生新的位置估计 (x_c, σ_c^2) 。

3. 第四层融合

第四层融合过程从以上四种定位估计值中选择一种最佳的结果作为移动台的估计位置。选择的标准通常综合考虑各个定位估计值的均值、方差或者标准差的大小，以及定位误差概率分布，移动台与服务基站之间的相对位置等因素。

5 一种基于 Chan 算法与数据融合技术的定位模型

4.3 至 4.5 节中所提到的各种基于数据融合的定位模型都能明显提高移动台的定位效果，但是这些方法的共同点就是都利用了至少两种以上的定位测量值（TOA、TDOA 或者 AOA）或者至少两种以上的定位算法（Chan 算法或泰勒级数法）。而在对不同类型的测量数据进行融合（如 TDOA 和 AOA 数据）的过程中，无论是在计算量还是计算的复杂度方面都有所增加。

针对这个问题，本章提出了一种基于一种测量数据（TDOA 测量数据）和一种算法（3.3.2 节中介绍的 Chan 算法）的数据融合定位模型，以期在提高定位性能的同时尽量减少相应的计算复杂度。

5.1 定位系统模型结构

数据融合的思想是把完全不同的数据组合起来以获得一种比任何单独估计都高的精度新的估计方法，这种融合可以针对原始数据也可以针对处理过的估计数据进行。

以往针对移动台定位所提出的数据融合模型都是针对不同的定位算法（Chan 算法，Taylor 级数法）或者不同的测量数据，如 TDOA，TOA 和 AOA 等等。而本节提出的定位系统模型将其概念加以推广，主要思路是针对一种算法（Chan 算法）计算过程中的不同阶段的中间结果进行数据融合。

如前文所述，Chan 算法作为一种具有解析表达式解的算法在解双曲线方程组中得到广泛的应用，并且对比迭代且计算量较大的泰勒级数法，在各种条件下都能取得相对更佳的性能^[9,46]。在 Chan 算法的计算过程中，首先要进行初始估计，然后利用初始估计的计算结果来选择利用近距离还是远距离的估计值。虽然针对不同的距离所获得的近距离和远距离估计值具有不同的定位精度，但是它们都是对移动台位置的估计数据，并且都包含有移动台真实位置的信息。因此将它们组合在一起，就有获得更优位置估计的可能性。

图 5.1 为该模型的主要结构，具体如下：

1. 对 TDOA 测量值数据采用 Chan 算法同时获得三个定位估计值：初始估计值、近距离估计值以及远距离估计值。
2. 利用小区半径以及移动台所在的扇区等辅助信息对三个估计值分别进行判断，将不符合条件的位置估计剔除。
3. 第一层数据融合

对前面获得的三个估计值进行平均，获得新的估计值。设 Chan 算法获得的三个估计位置分别为初始估计值 (\bar{x}_1, \bar{y}_1) ，近距离估计值 (\bar{x}_2, \bar{y}_2) 和远距离估计值 (\bar{x}_3, \bar{y}_3) ，则第一层融合后的定位估计值为：

$$\begin{aligned}\hat{x}_{l1} &= (\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3) / 3 \\ \hat{y}_{l1} &= (\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3) / 3\end{aligned}\quad (5-1)$$

4. 第二层数据融合

当移动台与参与测量的各个基站之间具有视线路径时，可以获得较为准确的移动台

位置估计，此时位置估计值的方差较小。而相反，当移动台与一个或者多个参测基站之间受到非视线路径干扰时，获得的移动台位置将产生较大的偏差，同时方差也会增大。因此第二层数据融合过程采用贝叶斯推论，按三个估计值的定位估计的方差进行加权产生新的估计值以期望获得改善的位置估计。对于方差较大的也即受非视线路径影响较大的估计值采用较小的权值以抵消其影响，对于受非视线路径影响较小的估计值则加大对的权值。设三个位置估计的均值和方差分别为 $(\bar{x}_1, \bar{y}_1, \sigma_{x1}^2, \sigma_{y1}^2)$, $(\bar{x}_2, \bar{y}_2, \sigma_{x2}^2, \sigma_{y2}^2)$, $(\bar{x}_3, \bar{y}_3, \sigma_{x3}^2, \sigma_{y3}^2)$ ，则第二层数据融合给出的定位估计值为：

$$\hat{x}_{l2} = \frac{\sigma_{x1}^{-2} \cdot \bar{x}_1 + \sigma_{x2}^{-2} \cdot \bar{x}_2 + \sigma_{x3}^{-2} \cdot \bar{x}_3}{\sigma_{x1}^{-2} + \sigma_{x2}^{-2} + \sigma_{x3}^{-2}}$$

$$\hat{y}_{l2} = \frac{\sigma_{y1}^{-2} \cdot \bar{y}_1 + \sigma_{y2}^{-2} \cdot \bar{y}_2 + \sigma_{y3}^{-2} \cdot \bar{y}_3}{\sigma_{y1}^{-2} + \sigma_{y2}^{-2} + \sigma_{y3}^{-2}} \quad (5-2)$$

在第二层数据融合中，同时还根据最小定位误差方差准则从三个估计值中选择一个作为本层融合的另外一个定位估计值。

如果本层融合无法进行，例如三个输入估计值均无法获取方差，则利用第一层融合的结果作为第二层融合估计值，此时的融合输出值只有位置而没有相应的方差信息。

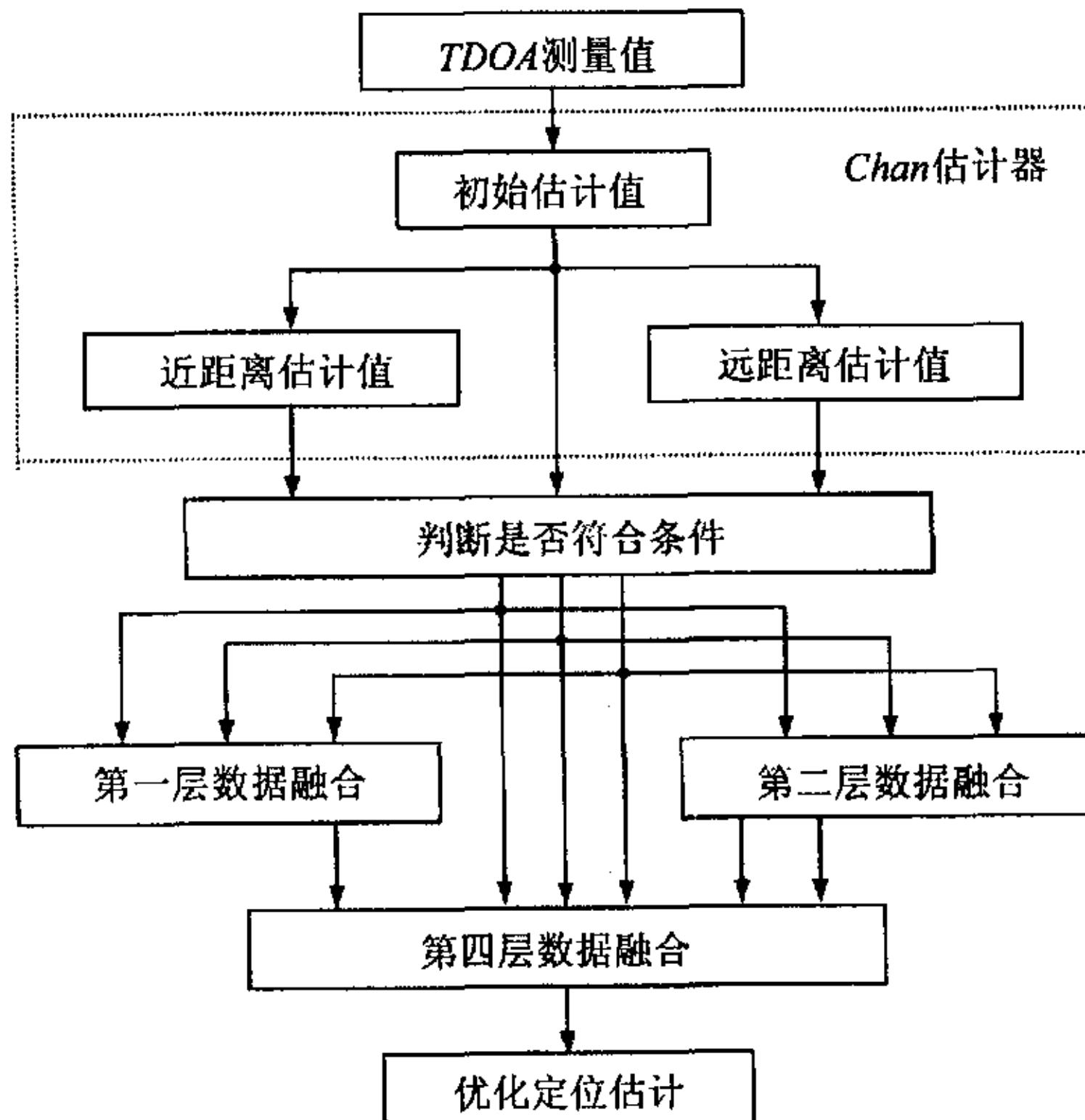


图 5.1 基于 Chan 算法的数据融合定位模型

Fig. 5.1 Structure of the data fusion location model based on the Chan algorithm

5. 第四层数据融合

从以上获得的定位估计中选择一种最佳的结果作为移动台的最终位置估计。选择规则考虑到了一些预先计算获得的先验信息，如各层数据融合获得的定位估计在不同环境下的性能差异以及能够获得最小定位误差的概率，此外还有移动台估计位置与服务基站之间距离的远近以及相对位置等信息。

5.2 仿真及性能分析

为了验证提出的定位模型的性能，采用 Matlab 对所提出的算法以及 Chan 算法进行了仿真对比。

5.2.1 仿真条件

选择的仿真条件具体分为：

1. 仿真环境：

参与定位测量的为图 5.2 所示的 7 基站蜂窝网络系统，服务基站所在的小区划分为三个 120 度扇形区。其中基站 1 为服务基站。

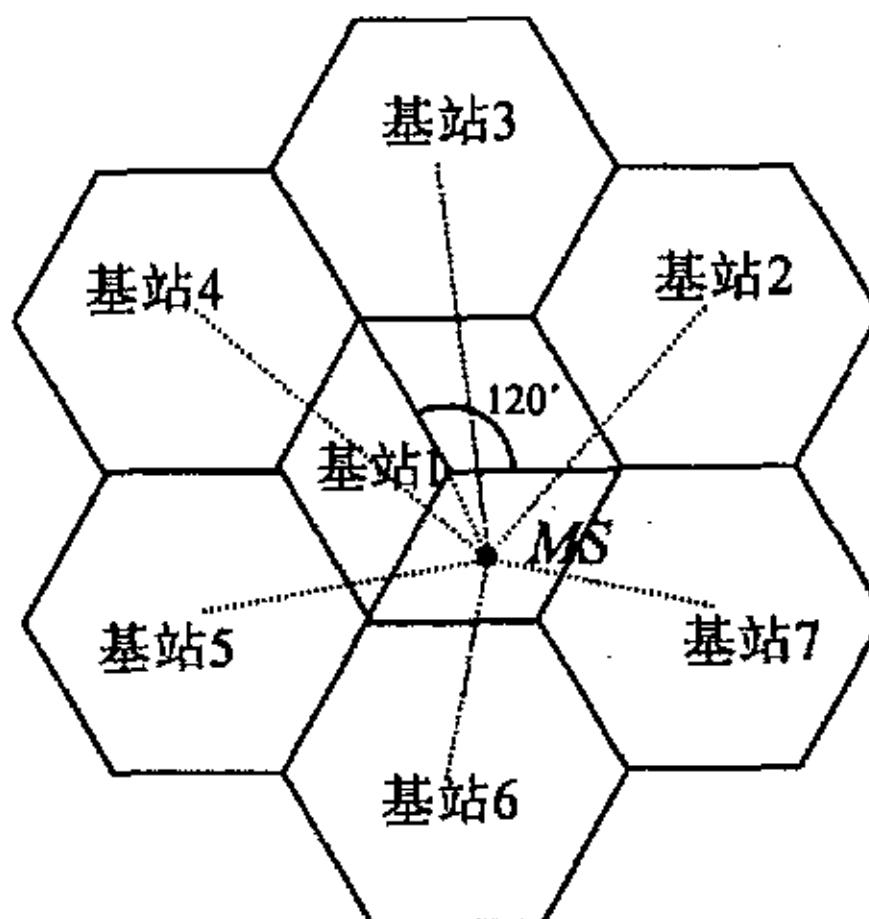


图 5.2 蜂窝网络结构

Fig. 5.2 The structure of cellular network

为了验证算法的普遍有效性，针对四种典型的无线电波传播环境即：闹市区，普通市区，郊区以及乡村环境进行了仿真。同时为了考察在不同小区半径下算法的定位性能差异，对闹市和普通市区环境中的仿真选择了 1~5km 的小区半径，而对郊区和乡村环境，考虑到实际环境中小区半径较大，选择的仿真小区半径分别为 5、10 和 15km。

2. 仿真位置选取：

一般文献中采用的仿真位置或者是几个具有代表性的固定位置（如距基站近、中、远的三个位置）^[9,44,45]，或者是一条点数较少的轨迹^[40,46]。而算法的定位性能可能会因移动台所处的位置不同以及与基站之间相互位置的不同而有所差异，因此为了尽量减少

移动台所处位置对定位性能可能造成的影响并全面考察定位算法的性能，我们在从距基站 20 米到距小区边缘 20 米之间的范围内的共 4200 个位置进行了仿真验证。这些位置均匀分布在上述范围内的 20 个等间隔的同心圆上。对每个位置的定位仿真均重复 10 次以获得平均后的结果。

3. 引入误差模型及参数：

仿真中所引入的误差主要有两种：测量误差和 NLOS 误差。

通常认为测量误差为一个服从高斯分布的随机变量^[40]。通常采用的测量误差为均值为 0m，标准差在 20 到 60m 之间的高斯随机变量。我们在仿真中选择均值为 0m，标准差为 25m 的测量误差作为标准组。除此之外，还采用了两组标准差分别为 50 和 100m 的测量误差进行仿真供对比。由于计算量过大，对比组只对四种环境下小区半径为 5km 的情况进行了仿真。

NLOS 误差则采用了文献^[47]中提出的对数指数分布模型。通常信号的功率时延分布可以由超量传播时延的概率密度函数来表征。NLOS 误差也可以由功率时延分布产生，由 NLOS 引起的超量时延 τ 的概率密度函数（PDF）为：

$$D(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{c\tau_{rms}} \exp(-\frac{\tau}{c\tau_{rms}}) & \tau > 0 \\ 0 & \tau \leq 0 \end{cases} \quad (5-3)$$

其中 c 为光速， τ_{rms} 为由无线电波传播环境定义的均方根时延扩展：

$$\tau_{rms} = T_1 d^\varepsilon \xi \quad (5-4)$$

其中： T_1 ： τ_{rms} 在 $d = 1\text{km}$ 处的中值。 d ：收发器之间的距离（单位为公里）

ε ：为一个在 0.5~1 之间的指数。 ξ ：一个指数随机变量。 $10 \log \xi$ 为一个具有零均值，标准差 σ_ξ 在 2~6dB 之间的高斯随机变量。

通常 τ_{rms} 与平均超量时延有近似 1:1 的关系，也即由 NLOS 引起的平均超量时延近似为 τ_{rms} 。

在表 5.1 中列出了如何根据四种不同的环境选择参数。

表 5.1 典型移动信道环境下的参数

Table 5.1 Parameters in different propagation environment

环境类型	$T_1 (\mu\text{s})$	ε	$\sigma_\xi (\text{dB})$
闹市	1.0	0.5	4
普通市区	0.4	0.5	4
郊区	0.3	0.5	4
乡村	0.1	0.5	4

由于在实际环境中，并不是所有无线电波的传输都会受到非视线路径的影响^[48]，因此在仿真中对于 NLOS 出现的情况也分为两种：一种比较接近实际环境，对于服务基站测量值受 NLOS 干扰的概率 P_{nlos} 定为 0.4，对于其余外围基站测量值受干扰的概率 P_{nlos} 定

为 0.7。而另外一种情况对于所有参与测量的基站， P_{nlos} 都定为 1 也即所有无线电波传播都会受到 NLOS 误差的影响。这与实际情况并不符合，但是可以提供最恶劣情况下算法的定位结果以供对比。

4. 对于移动台运动速度的影响：

移动台高速运动的情况并不在我们的考虑范围之内，因为对高速移动台的定位需要利用卡尔曼滤波等技术，而这部分内容不在本文研究的范围。我们将移动台的运动速度限制在 2m/s 以内，这主要是对应实际应用中手机用户步行运动或者因受伤失去运动能力的紧急呼救用户的情况。由于慢速运动移动台在测量的间隙移动的距离很小，因此移动台的运动速度对定位精度没有明显的影响。在 1 秒种内系统可以对移动台进行多次测量^[9,12,15]，而在此期间移动台的位置可认为基本没有变化，因此在仿真中对每个位置均提供 50 个 TDOA 测量值供定位算法进行运算。

5. 性能评价标准：

评价算法的性能标准选择了实际工程中经常用到的平均定位误差和误差累计分布函数(CDF)。其中误差累计分布函数是指定位误差在某个精度门限以下时的定位次数在总的定位次数中所占的百分比。

5.2.2 仿真结果分析

以下各图为所提出的定位方法与 Chan 算法在平均定位误差方面的仿真性能对比。图 5.3 到图 5.6 为测量误差为 25 米时四种典型移动通信环境下的仿真结果。图中■和▲分别代表 NLOS 概率为 (0.4, 0.7) 和 (1, 1) 时的结果。实线和虚线分别代表 Chan 算法和数据融合模型的计算结果。

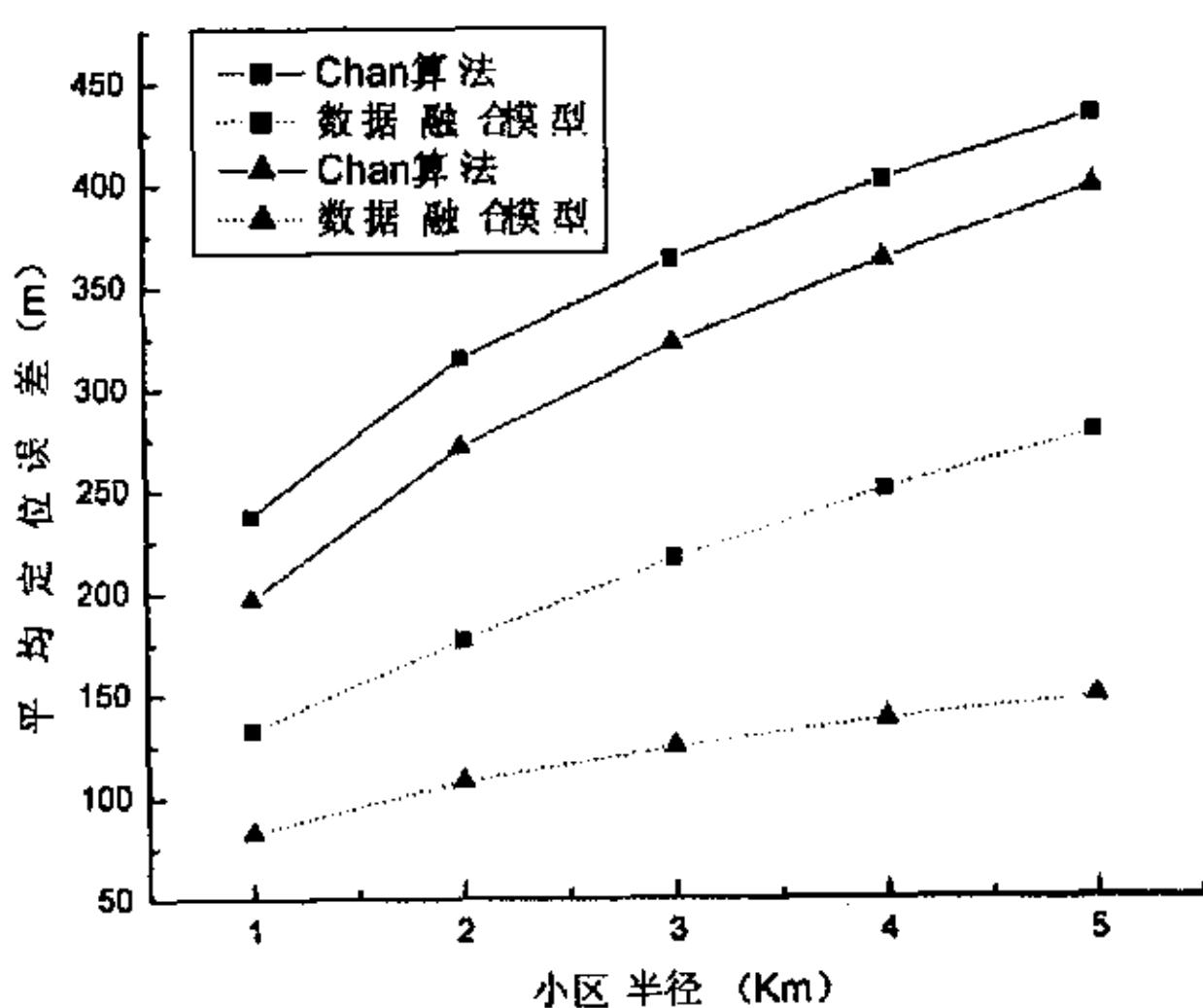


图 5.3 闹市环境仿真结果

Fig. 5.3 Simulation result in bad urban environment

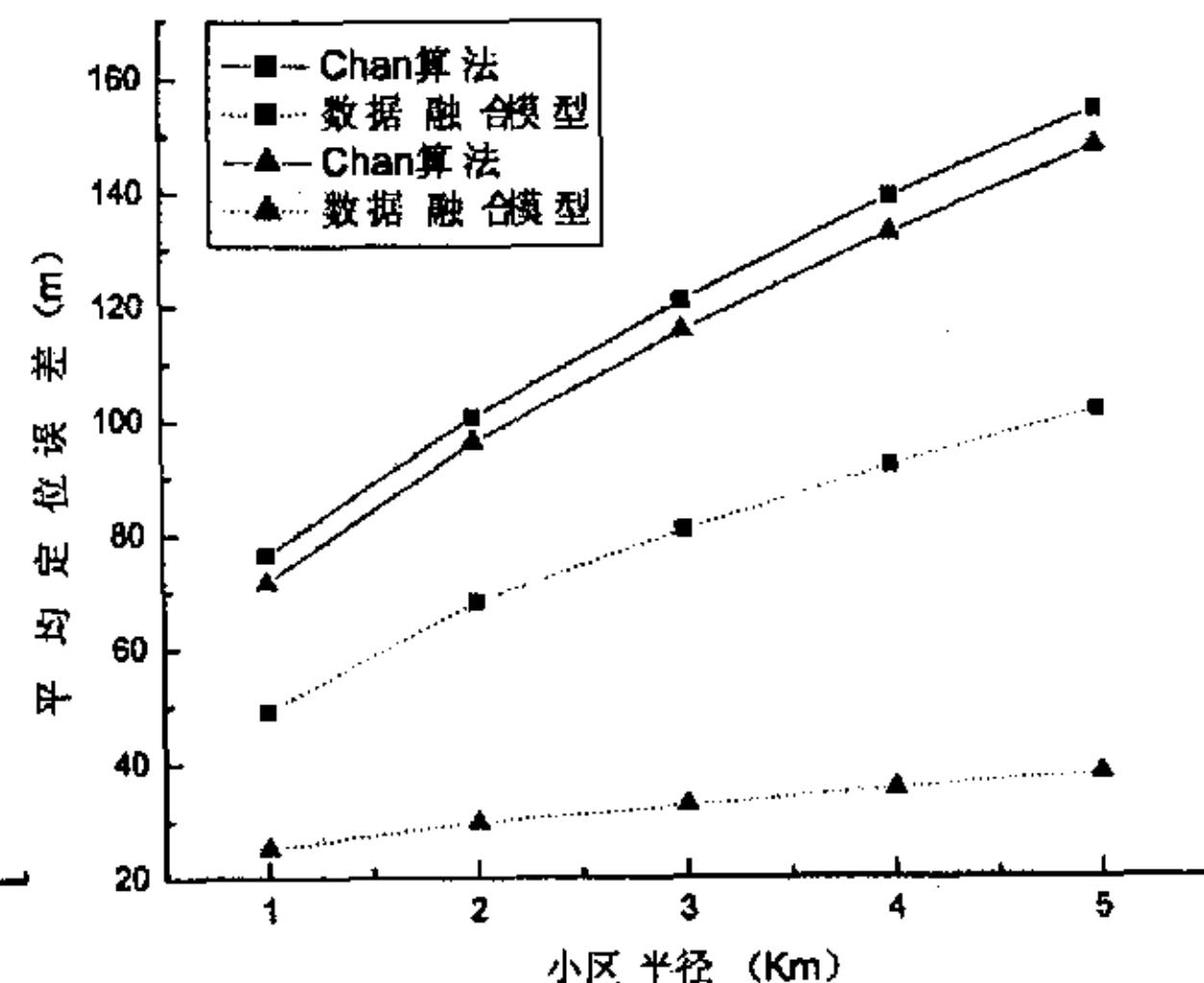


图 5.4 市区环境仿真结果

Fig. 5.4 Simulation result in urban environment

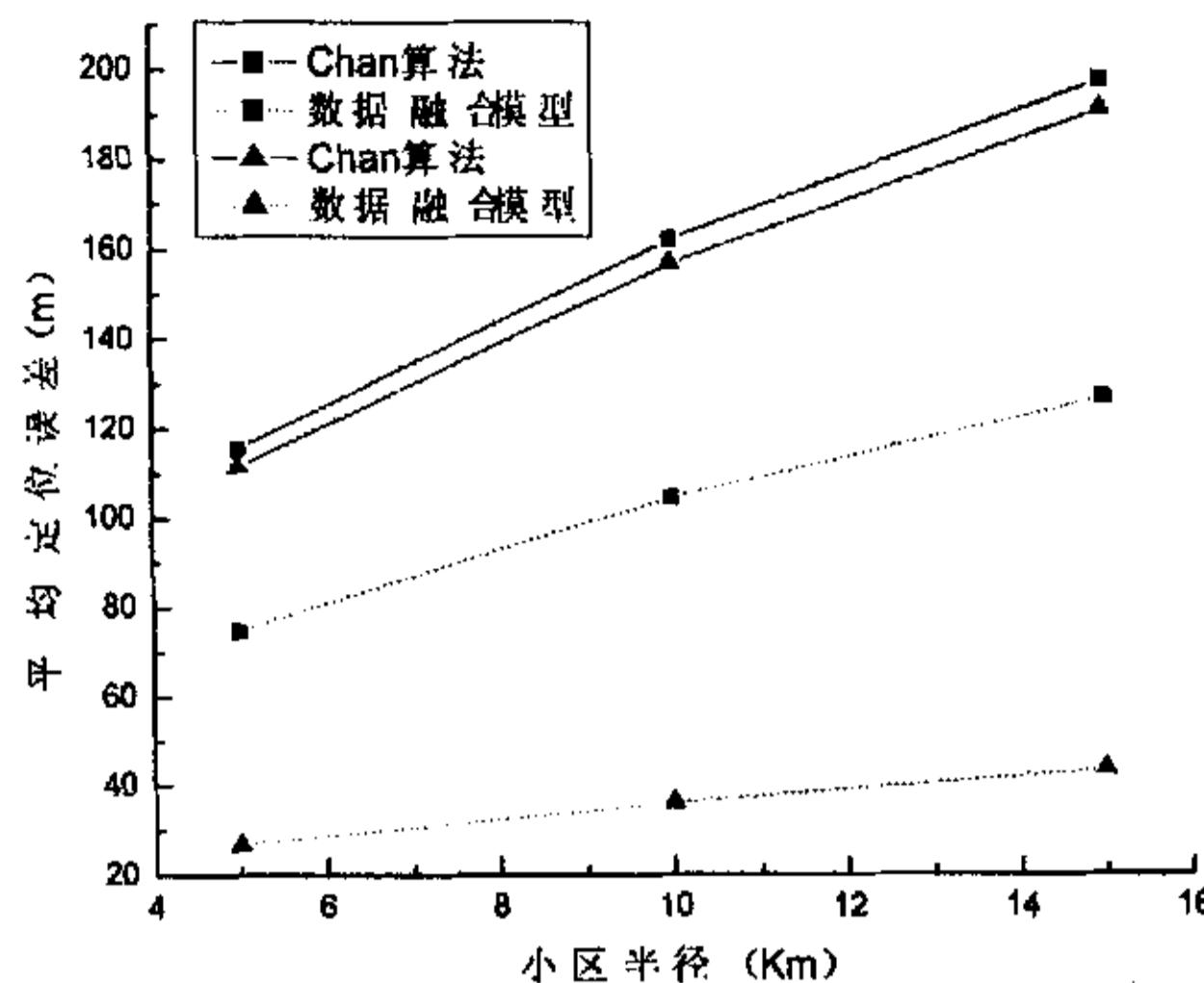


图 5.5 郊区环境仿真结果

Fig. 5.5 Simulation result in suburb environment

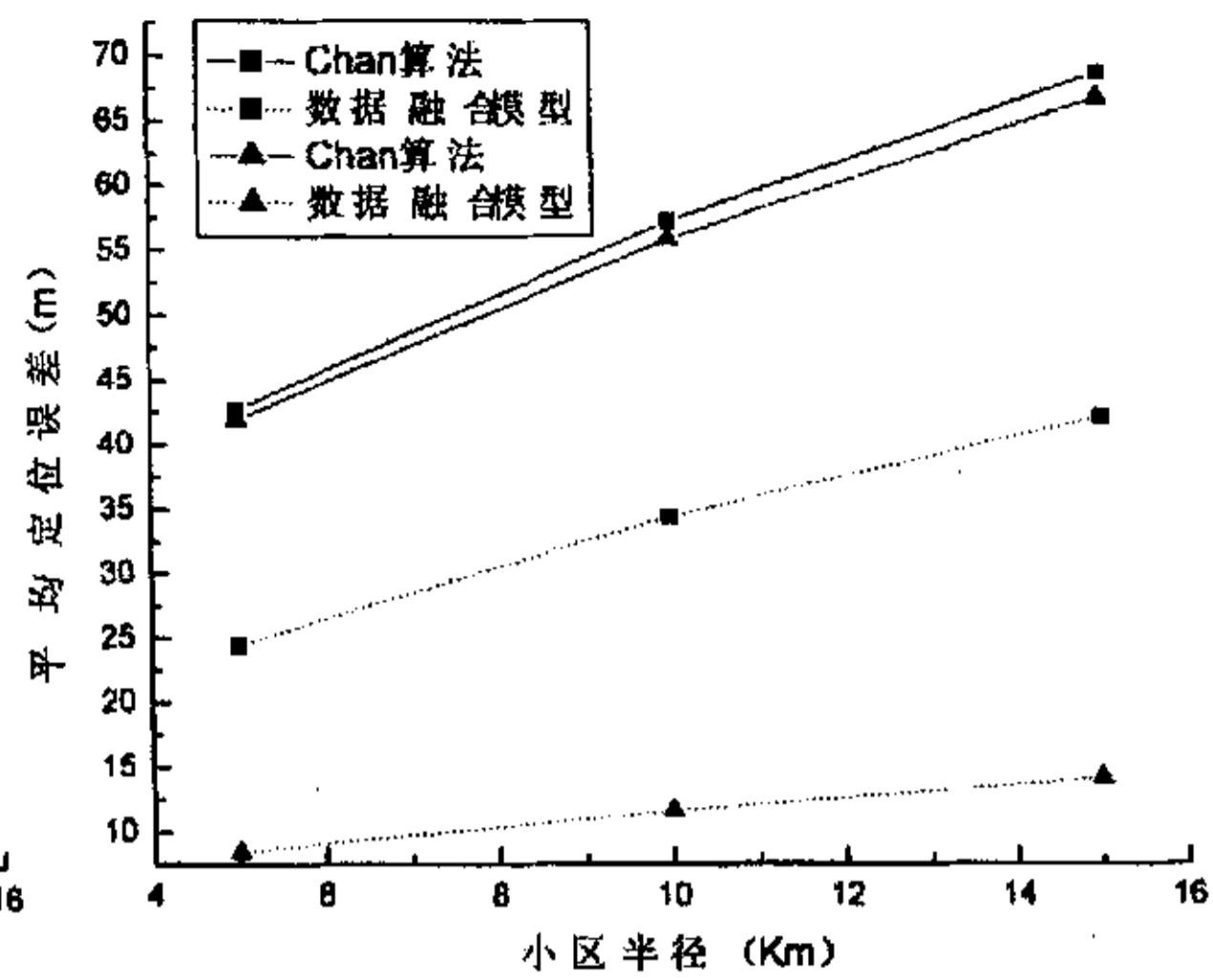


图 5.6 乡村环境仿真结果

Fig. 5.6 Simulation result in rural environment

由这些图中结果可以看出，在四种典型的移动通信环境下，在所选择的参与仿真的各种小区半径下，以及在出现 NLOS 概率不同环境下，所提出的数据融合方法对比 Chan 算法都能够大幅度提高定位精度并且提高的幅度非常稳定。同时还可以注意到，当无线电波传播环境更加恶劣，也就是 NLOS 出现概率更大时，本文提出的方法对于定位精度的提高效果也就越明显。

对于平均定位误差的提高效果在表 5.2 中详细列出。

表 5.2 各种典型环境下算法的定位精度改善程度 (%)

Table 5.2 Improvement of the location accuracy by the proposed data fusion location model in different propagation environments

	闹市*	闹市	普通市区*	普通市区		郊区*	郊区	乡村*	乡村
1(km)	44.0	57.9	35.6	64.9	5(km)	35.2	76.1	42.6	79.8
2(km)	43.7	60.2	32.2	69.1	10(km)	35.5	77.0	39.7	79.2
3(km)	40.3	61.4	32.2	71.8	15(km)	35.9	77.4	38.8	79.0
4(km)	37.8	62.1	33.9	73.2					
5(km)	35.9	62.8	34.0	74.2					

注：标 * 列数据对应 P_{nlos} 为 (0.4, 0.7)，其余对应 P_{nlos} 为 (1, 1)

图 5.7 到图 5.10 为所提出的定位方法与 Chan 算法在累积误差概率方面的性能对比。
(仿真条件：小区半径 5km，测量误差 (0, 25m)， P_{nlos} 为 (0.4, 0.7))

从图 5.7 到图 5.10 中可见，在四种环境中，所提出的基于数据融合的方法对比 Chan 算法都能取得更好的定位效果。在小区半径为 5km 的条件下，在除闹市以外的其余三种环境中，所提出的数据融合定位模型均能满足 FCC 颁布的 E911 紧急定位第三阶段的要求，也即保证定位误差在 125 米以内的概率不超过 67%。在四种环境下，小区半径为 5km 的条件下定位误差在 125 米以内的概率分别为：5.2%，79.6%，93.2% 和 100%。而

对于闹市区而言，虽然对比 Chan 算法的定位性能有大幅度的改善，但是仍然不能满足要求。在闹市区内，由于高大建筑物十分密集，信号传播受非视线路径传播影响非常严重。目前已检索到的各种基于蜂窝网络的定位算法大部分无法在闹市区取得良好的定位效果^[9,21,46]，因此如何提高定位算法在闹市区的定位性能就值得进一步深入的研究。

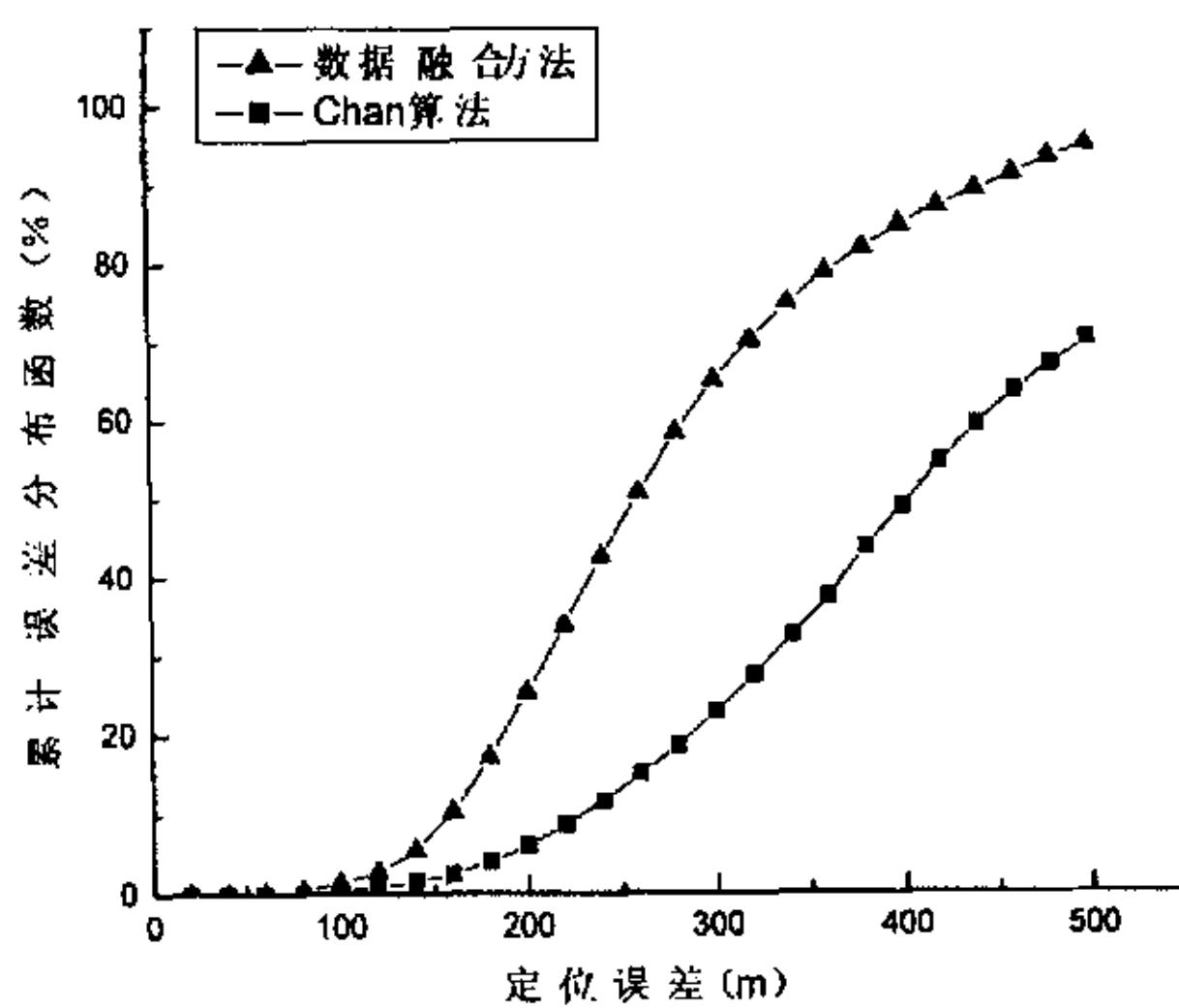


图 5.7 闹市环境误差累计分布函数

Fig. 5.7 Error cumulative distribution function in bad urban environment

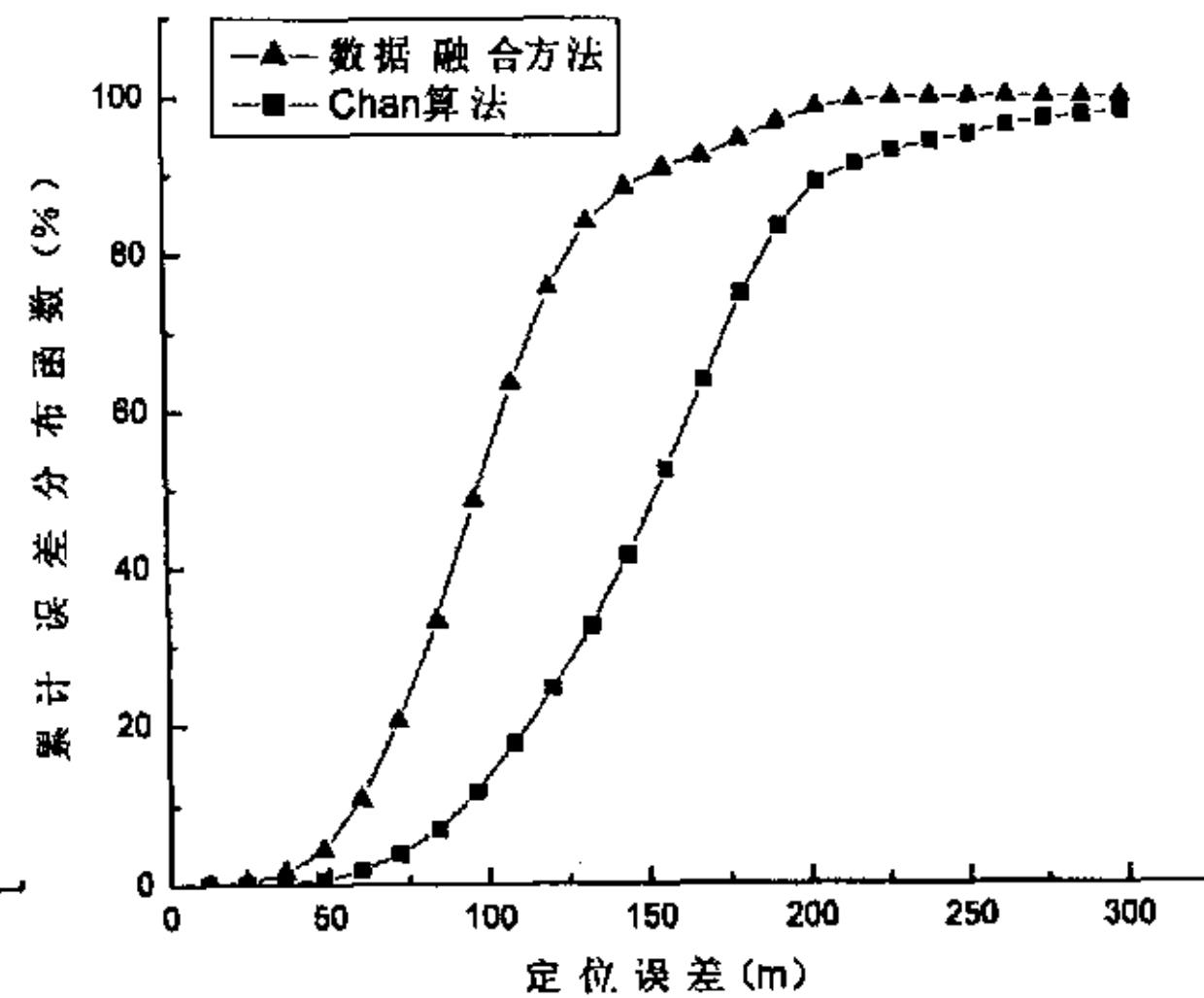


图 5.8 市区环境误差累计分布函数

Fig. 5.8 Error cumulative distribution function in urban environment

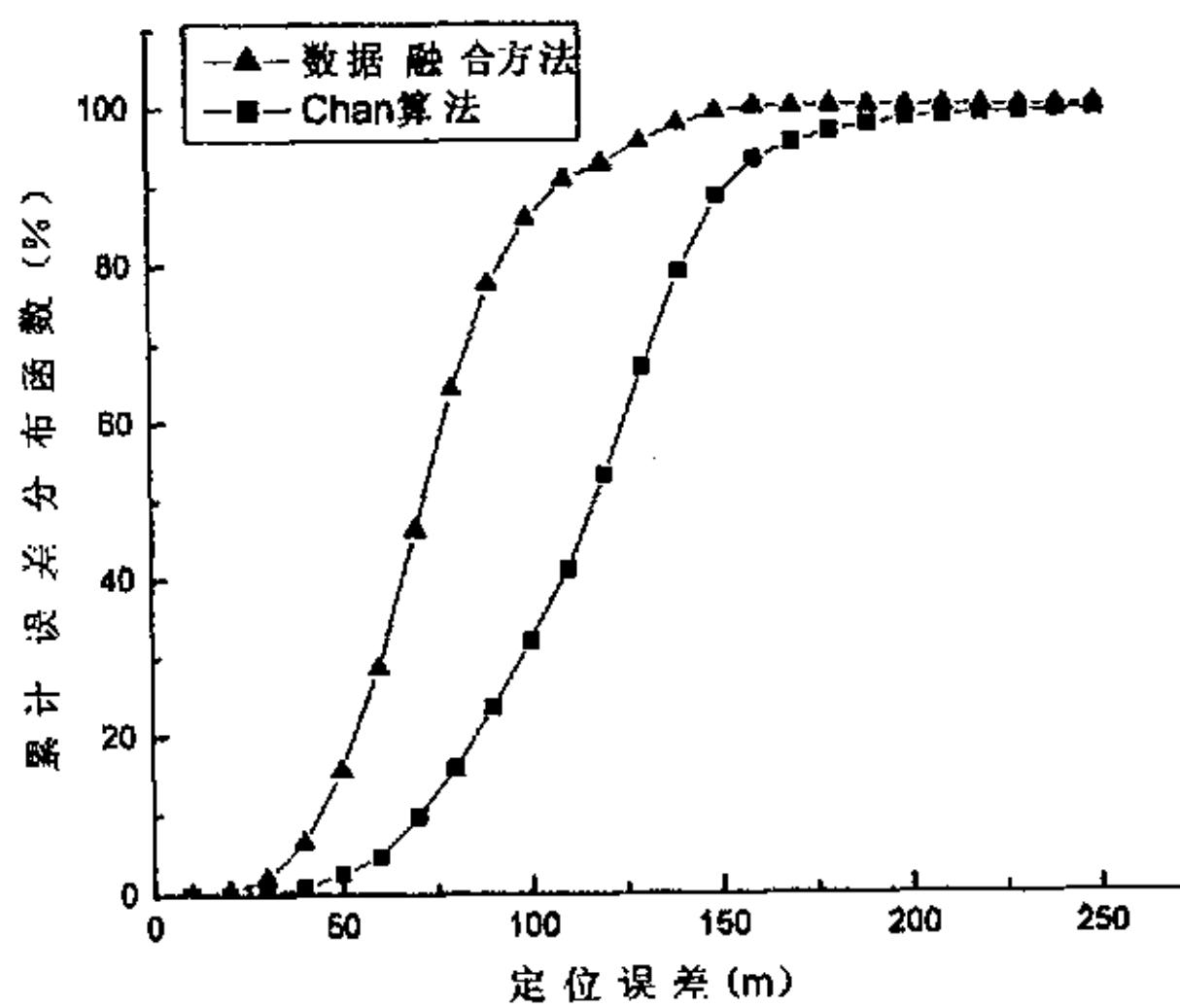


图 5.9 郊区环境误差累计分布函数

Fig. 5.9 Error cumulative distribution function in suburb environment

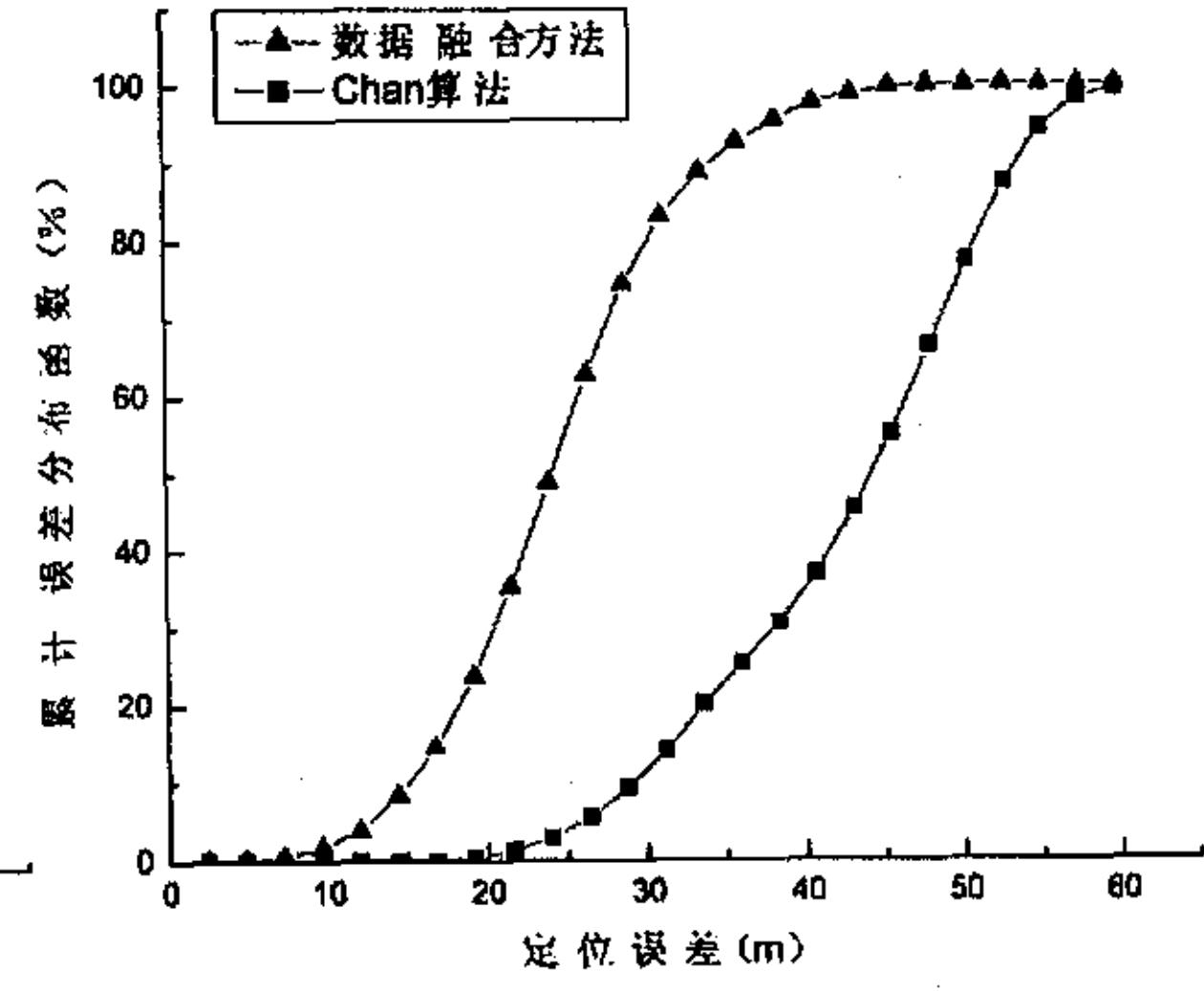


图 5.10 乡村环境误差累计分布函数

Fig. 5.10 Error cumulative distribution function in rural environment

图 5.11 为在不同测量误差标准差 (25m、50m 和 100m) 时的平均定位误差仿真结果。对于闹市和普通市区环境仿真小区半径为 1 至 5km，对于郊区和乡村环境仿真小区半径为 5、10 和 15km。

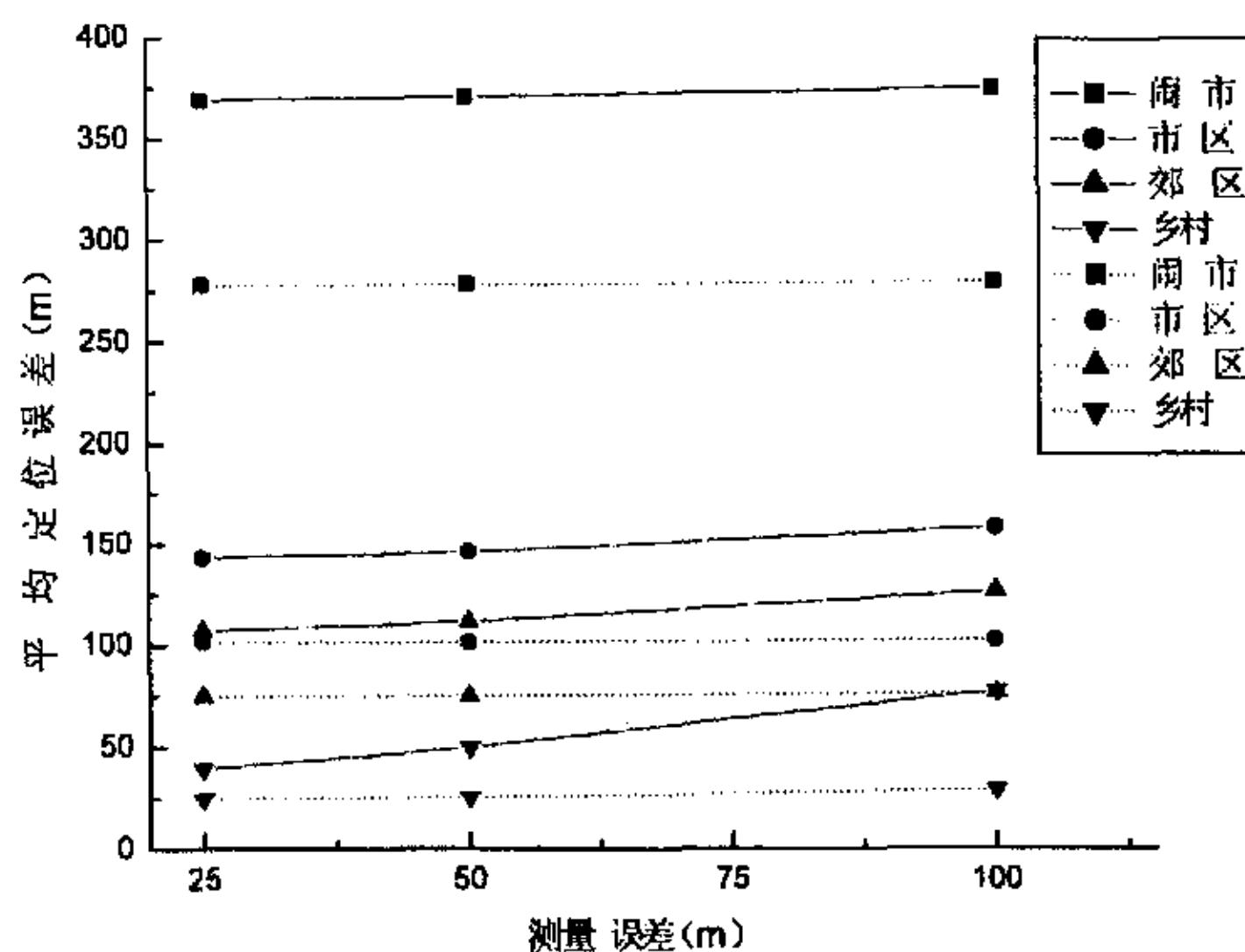


图 5.11 不同测量误差下的定位性能

Fig. 5.11 Location error in different measurement error

总结：

从前面的仿真结果分析表明，在四种典型的移动通信环境下，对于不同的测量误差，我们在 5.1 节中提出的定位模型均能够比传统的 Chan 算法获得更高的定位精度和性能。对比 Chan 算法，该模型除了预期的能够提高定位精度以外，还有另外一种潜在的好处，就是可以减少由于定位结果不满足条件而造成定位失败的概率。由于要对 Chan 估计器获得的三个估计位置进行判断，将处于小区或者所在扇区以外的估计位置淘汰，这样当对某个点进行位置估计时就有可能出现多次测量所获得的定位估计均不能满足要求从而造成定位失败的情况，这在实际应用中当然是不希望出现的。在采用数据融合模型后，由于同时利用了三组定位估计供选择，如果某组数据出错，仍然可以利用另外几组数据，而三组数据同时失败的几率非常微小，这样就可以大大减少定位失败的概率。对多次仿真结果数据的统计表明，该方法对比 Chan 算法定位失败率可以下降 88%。

在计算量方面，由于不需要对不同类型的测量数据 (TDOA/TOA 和 AOA) 进行组合计算，也不需要同时利用不同的算法（如 Chan 算法，Taylor 级数法）（不同类型之间的测量数据的以及不同算法之间的融合需要大量的复杂运算）而只是利用了一种测量数据 (TDOA) 和一种算法 (Chan 算法) 的不同阶段的中间结果，因此，与 TOA/AOA 以及 TDOA/AOA 等融合方法相比，本方法在计算量方面具有的优势是明显的。

在定位性能方面，虽然没有对采用 TOA/AOA 以及 TDOA/AOA 等融合方法进行仿真，但是通过相关文献中各种算法的定位性能图表^[9,22]可以发现所提出的定位模型可以获得与这些算法非常接近的定位性能。

5.3 定位时间分析

定位计算过程主要分为 Chan 算法中间定位估计的计算阶段和数据融合计算阶段，下面对这两个阶段进行分别讨论。

1. Chan 算法中间定位估计计算阶段：

在 3.3.2 节中已经说明，Chan 算法完成定位需要两个主要的计算阶段，即：1) 获得初始位置估计；2) 根据阶段 1) 的结果选择采用远距离估计或近距离估计计算。

本章提出的数据融合算法的中间结果初始估计阶段与 Chan 算法的阶段 1) 完全相同，而对于 Chan 算法第 2) 阶段，数据融合算法需要将远距离定位和近距离定位两部分都计算出来。也就是说，这一部分计算仅增加了远距离或近距离部分的计算量。经过 Matlab 仿真可知，Chan 算法与数据融合算法在这个阶段的计算量基本相同。

2. 数据融合计算阶段：

5.1 节定位模型的核心部分在于数据融合技术，只是选择 Chan 算法的中间结果作为融合对象。相关文献^[9,42,44]的研究结果表明，采用数据融合技术的各种定位模型在提高定位精度的同时，计算时间以及计算复杂度都会有不同程度的增加。

下面就数据融合阶段计算量的增加与定位延时的问题加以简要分析。

在 5.1 节定位模型中，第一层和第四层的融合运算只是线性加减与选择判断，不涉及大规模矩阵运算，因此计算量的增加很微小。第二层数据融合采用按方差进行加权运算，计算相对复杂，也是造成计算量增加的主要环节。

经 Matlab 仿真可知，在获得所有 TDOA 测量值以及相应的 Chan 算法中间数据结果后进行数据融合，数据融合时间即定位延时稳定在约 0.063 秒。对四种移动环境在小区半径为 5km 的条件下分别采用 50, 25, 10, 5 组 TDOA 测量值进行了仿真，表 5.3 显示定位融合时间非常稳定，图 5.12 的仿真结果显示出平均定位误差性能也基本稳定。当 TDOA 测量数目在 50 和 10 之间时，定位性能随着测量数目的减小呈缓慢下降的趋势，当测量数目为 5 时，定位性能下降的较为明显，但是性能仍然可以接受。由此可以推断，5.1 节所提出的基于数据融合的定位模型在获得越多组 TDOA 测量值时可以获得更优的定位性能。但是由图 5.12 中的曲线也可以推测出，当小于 5 组测量时，5.1 节的定位模型的定位性能将急剧下降；当超过 50 组测量时，定位性能改善将不再明显而相关的计算时间却要继续增大。因此，该定位模型采用的理想的 TDOA 测量数目在 10~50 之间。

表 5.3 不同数目 TDOA 测量下的数据融合时间（秒）

Table 5.3 Location time cost with different TDOA measurements

	5	10	25	50
闹市	0.063	0.063	0.062	0.063
城市	0.062	0.062	0.062	0.062
郊区	0.062	0.063	0.063	0.063
乡村	0.062	0.063	0.063	0.062

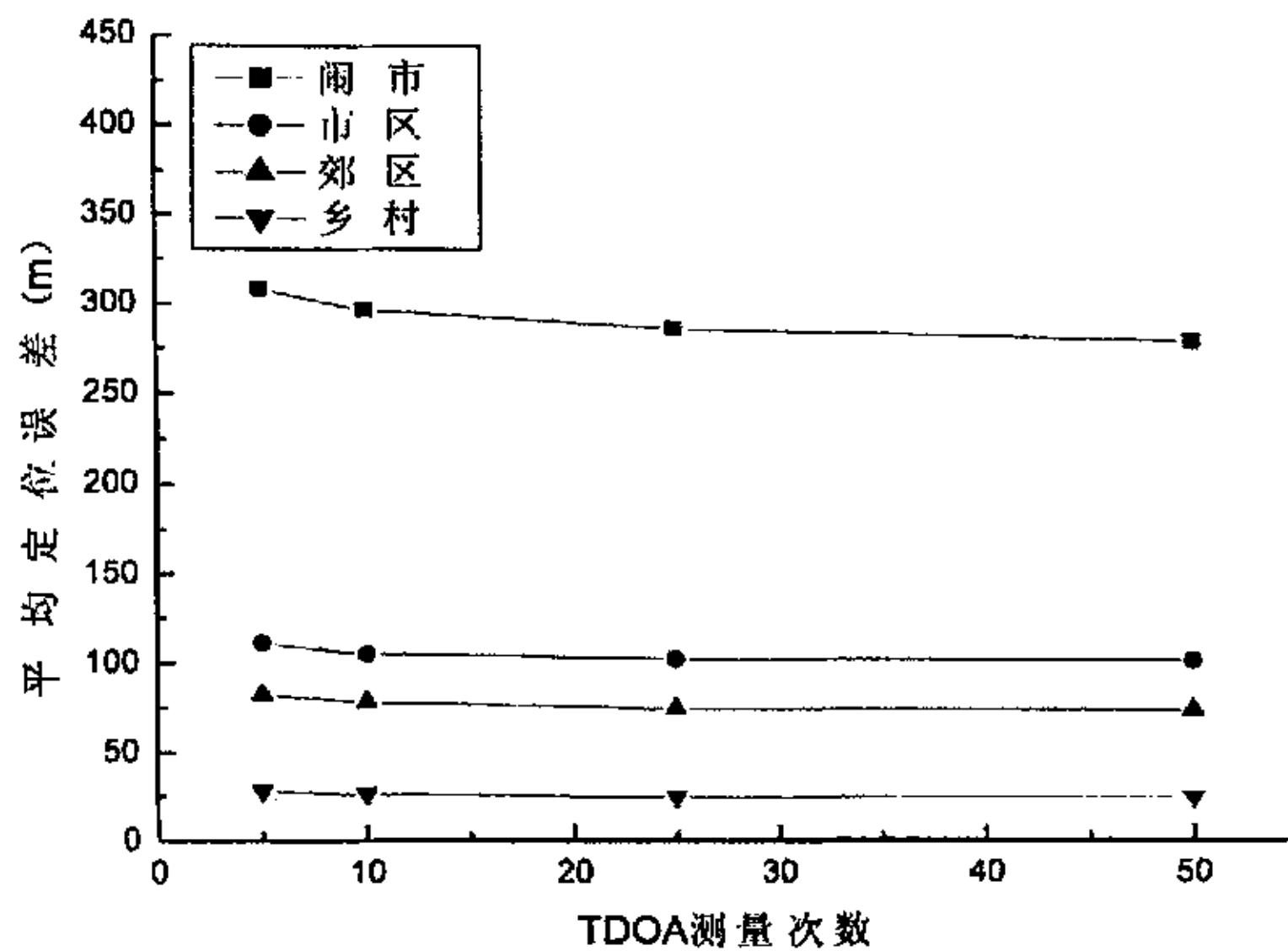


图 5.12 不同数目 TDOA 测量下的平均定位误差

Fig. 5.12 Mean Location error with different TDOA measurements

当采用更少数目的 TDOA 测量值时，虽然用于数据融合计算的时间不变，但是由于中间定位估计阶段计算量的减少（利用 Chan 算法获取中间估计的次数减少），总的定位时间必然随之下降。

3. 应用于实际定位系统时的定位时间分析

在实际应用中，对定位的实时性要求较高，而且系统可能同时需要对多个用户进行定位，因此定位时间对于定位算法来说十分关键。下面讨论一下 5.1 节提出的数据融合算法在不同需求下的定位应用。

在仿真中对于每个 TDOA 测量值，利用 Chan 算法获取中间估计值需耗时约 0.016 秒，这样，若系统以 0.02 秒的间隔提供 TDOA 测量值时，中间估计值的计算就不会影响 TDOA 测量值的给出。而在前文已经提到过，系统对于待定位的用户每秒种可以提供多达 100 次的 TDOA 测量值。

- 以 0.02 秒间隔利用 50 组 TDOA 测量值进行定位时的情况

此时对应的情况是只对一个移动台进行定位，系统能够以较高的频度提供 TDOA 测量值，同时不要求高速给出定位估计值。

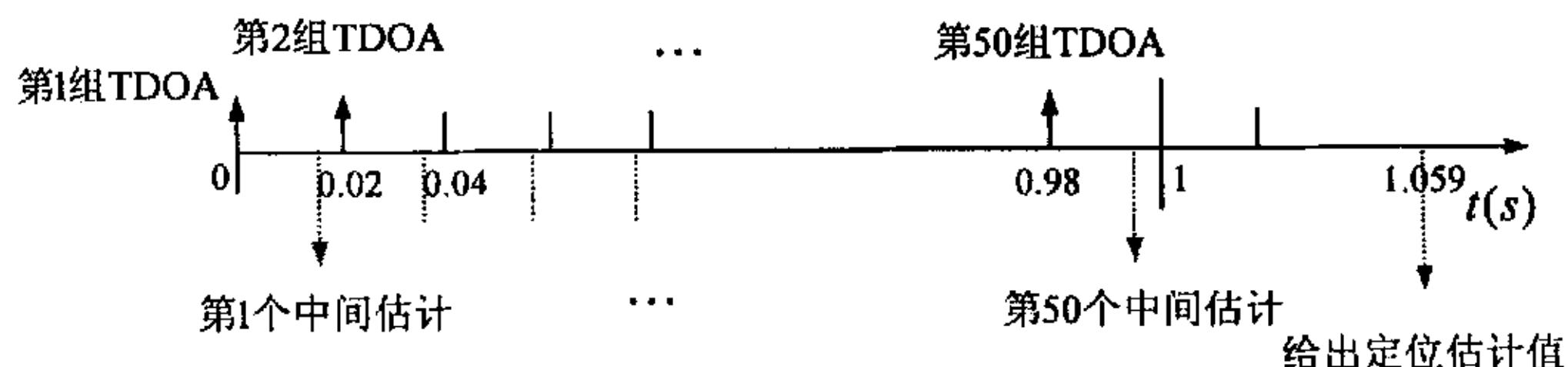


图 5.13 0.02 秒间隔 50 组 TDOA 测量的定位时间

Fig. 5.13 Location time with 50 groups TDOA measurement and 0.02second interval

如图 5.13 所示，此时约每 1.059 秒给出一个定位估计值。

- 以 0.1 秒间隔利用 10 组 TDOA 测量值时的情况

此时对应的是待定位移动台数目较多，系统能够以较高频度提供 TDOA 测量值或者待定位移动台数目不多但是系统为节约网络开销而以低频度提供 TDOA 测量值的情况。对于前一情况，可以在为某个移动台提供 TDOA 测量值的间隙为其他待定位移动台提供 TDOA 测量；对于后一种情况，则在测量 TDOA 间隙不进行其他的定位操作。

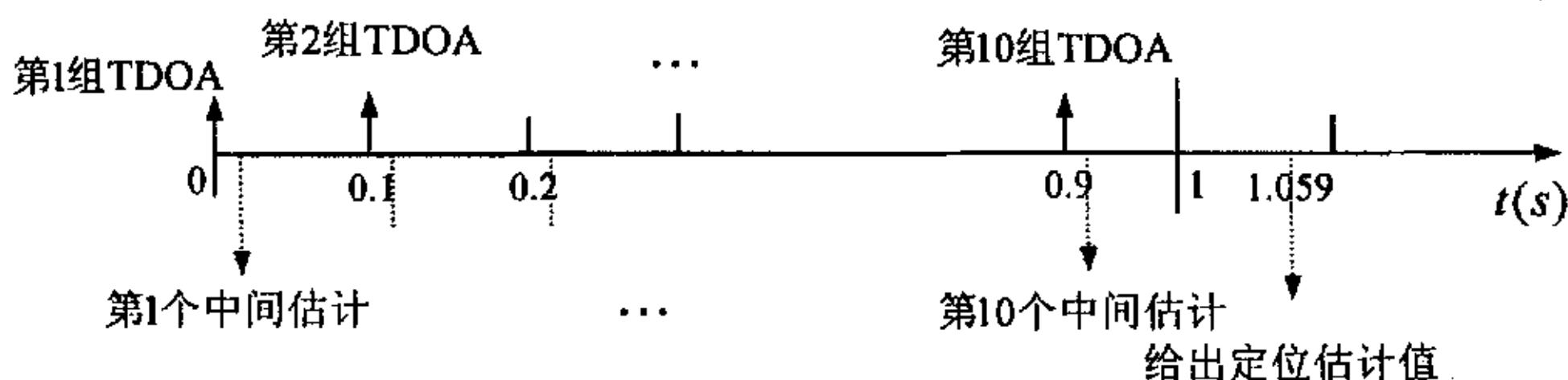


图 5.14 0.1 秒间隔 10 组 TDOA 测量的定位时间

Fig. 5.14 Location time with 10 groups TDOA measurement and 0.1second interval

如图 5.14 所示，此时约每 1.059 秒给出一个定位估计值。

- 以 0.02 秒间隔利用 10 组 TDOA 测量值的情况

此时对应的是待定位移动台数目不多，系统能够高频度提供 TDOA 测量值同时要求尽可能快地提供移动台估计位置的情况。

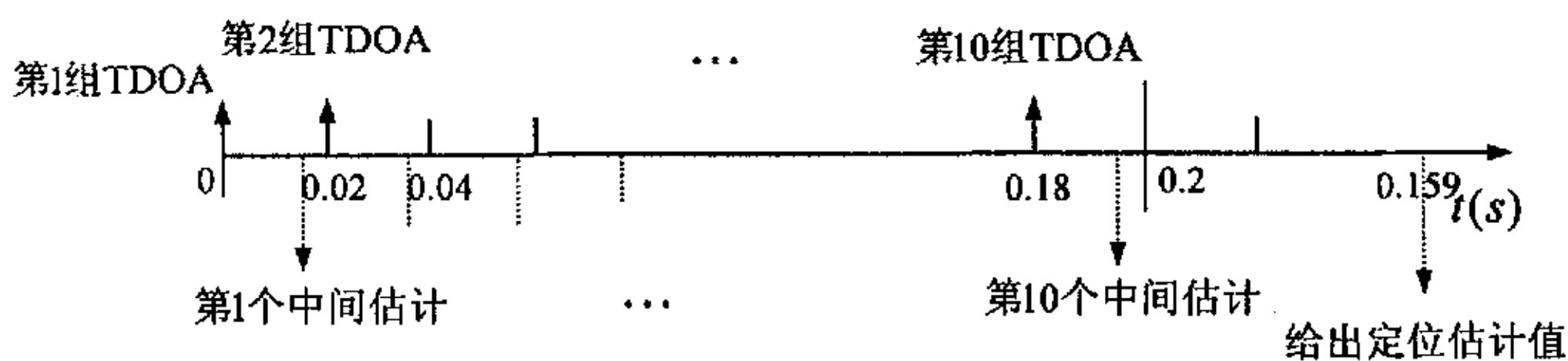


图 5.15 0.02 秒间隔 10 组 TDOA 测量的定位时间

Fig. 5.15 Location time with 10 groups TDOA measurement and 0.02second interval

如图 5.15 所示，此时约每 0.259 秒给出一个定位估计值。如果采用 5 组 TDOA 测量值进行定位时，则每 0.159 秒就可以给出一个定位估计值。

值得注意的是，我们在本节中提到的定位时间都是采用 Matlab 软件仿真获得的结果，该软件在快速计算方面并不具有优势。如果采用其它软件平台（如 C 语言）并进行程序优化，可以预期将进一步减少定位延时时间，这意味着可以同时为更多移动台提供定位或者为某个移动台提供更快速的定位服务。

5.4 改进的定位系统模型

利用数据融合技术往往可以给系统带来性能上的改进,但是在具体问题中实现有效的数据融合并不总是那么简单。实际上,与利用数据源中最理想的数据获得的结果相比,对所有数据进行融合后往往可能产生更坏的结果,这是因为试图把准确的数据和偏差较大的数据组合在一起的缘故。因此,在利用数据融合技术时,提高数据源或者原始融合数据的精度就有可能提高数据融合的效果。

在 3.4.2 节中提到过的残差加权算法可以较为有效的抑止 NLOS 误差,因此,我们利用残差加权算法修改图 5.1 中的第一层数据融合,通过改善第一层数据融合估计的数据质量来对 5.1 节的模型的性能加以改进。改进后的第一层数据融合结构如图 5.16 所示,

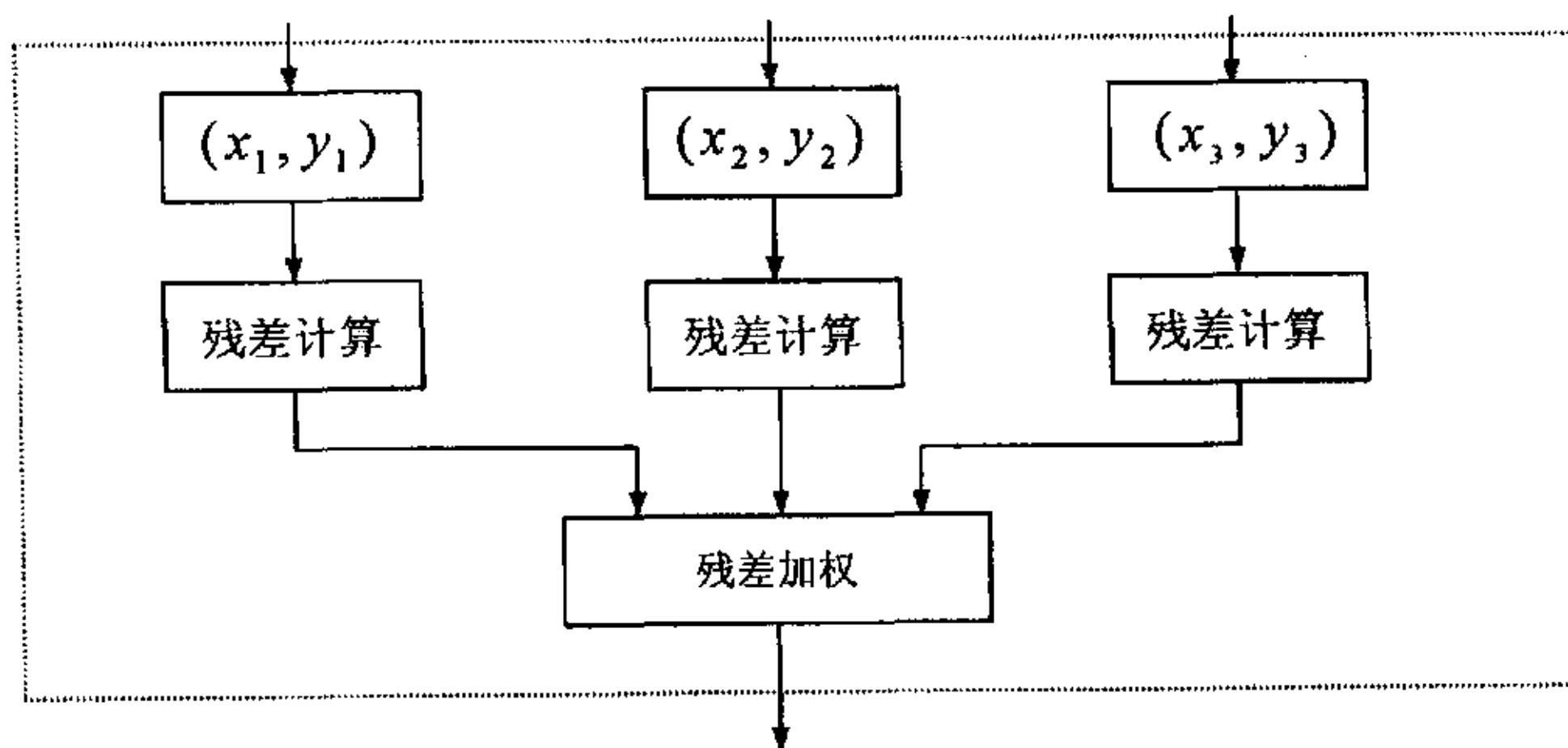


图 5.16 改进后的第一层数据融合结构

Fig. 5.16 Amended structure of the first level data fusion

具体过程为,利用 Chan 算法获得的单个估计位置分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , 设参与测量的服务基站坐标为 (X_1, Y_1) , 其余的基站坐标为 (X_i, Y_i) , 第 i 个基站到服务基站的 TDOA 测量值为 τ_i 。

对三个定位估计值分别利用式(5-5)计算出对应的残差。

$$R_{esj} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[c\tau_i - ((x_j - X_i)^2 + (y_j - Y_i)^2) \right]^2 \quad j = 1, 2, 3 \quad (5-5)$$

最后通过式(5-6)计算出第一层数据融合的最终估计值。

$$\hat{x}_H = \frac{R_{es1}^{-1} \cdot x_1 + R_{es2}^{-1} \cdot x_2 + R_{es3}^{-1} \cdot x_3}{R_{es1}^{-1} + R_{es2}^{-1} + R_{es3}^{-1}}$$

$$\hat{y}_H = \frac{R_{es1}^{-1} \cdot y_1 + R_{es2}^{-1} \cdot y_2 + R_{es3}^{-1} \cdot y_3}{R_{es1}^{-1} + R_{es2}^{-1} + R_{es3}^{-1}} \quad (5-6)$$

由于利用残差加权算法能够比利用简单平均法更有效的抑止误差，因此经过修改后的第一层数据融合能比 5.1 节定位模型中的同层数据融合获得更好的估计值。

修改后的模型采用与 5.2.1 节类似的仿真条件，小区半径定为 5km，针对四种环境进行了仿真。结果显示，改进后的模型在四种环境下的平均定位误差性能对比 5.1 节的定位模型均有提高，且提高效果比较稳定。但是改善的幅度较小，在 1~3% 之间。

由于定位效果改善的幅度不够明显，并且残差加权运算对比简单平均法要复杂的多，因此在选择本改进定位模型要充分考虑计算量增加的影响。

6 一种基于多基站测量结果组合的定位系统模型

我们在 5.1 节中提出了一种基于 Chan 算法的数据融合定位模型。经仿真验证它可以取得比 Chan 算法更优的定位性能，并且在大部分环境下均可以满足 FCC 颁布的 E-911 紧急定位第三阶段的要求。但是该模型在闹市环境下的性能虽然对比 Chan 算法有显著提高，却不能满足定位精度的要求。因此我们在本节提出一种基于多基站测量结果组合的定位系统模型以求对 5.1 节中所提出的方法进行性能上的改进，主要是针对闹市环境下的定位性能。

6.1 定位系统模型结构

在采用数据融合技术的时候，供融合使用的数据源越多，就越有可能产生更精确的估计^[42]。因此在获取同样数目 TDOA 测量值的时候，如果提供更多的供融合的中间估计，就有可能获得更优的最终估计值。

在 3.4.2 节中曾提到过一种残差加权算法^[34]。该算法主要是针对获得的时间测量值数目要超过所需要的最小测量值数目时的情况，主要思路如下：

1. 从给定的 M 个基站获得的 M ($M > 3$) 个距离测量值中获取 N 个距离测量值组合。
2. 对于每种组合计算出移动台位置向量 x 对应的最小二乘估计。
3. 将估计值按加权值的反比进行组合。

该算法主要针对 TOA 测量值并且采用最小二乘估计法进行定位估计，不过我们可以将这种多基站组合分组测量的思路引入基于 TDOA 测量值的定位估计中，同时对每一种测量组合利用第 5 章中的定位模型获取中间定位估计值，从而提出一种基于多基站测量结果融合的定位模型。

图 6.1 为该模型的主要结构，具体如下：

1. 设有 M 个基站参与测量。

将定位过程划分为 M , $M-1$, $M-2$, ..., 4 个基站分别参与测量的分组。对于参与测量基站数目小于 M 的分组，每种分组均包含有 C_{M-1}^{N-1} 种基站组合，其中 $N = 1 \dots M-1$ 。之所以取 C_{M-1}^{N-1} 是因为当参测基站数目 N 小于 M 时，需要从 M 个参测基站中选择 N 个基站的测量结果进行运算。而服务基站是总要参与测量的，因此问题就转化为从除了服务基站以外的 $(M-1)$ 个基站中选择 $(N-1)$ 个基站的测量结果，共有 C_{M-1}^{N-1} 种情况。

对于有 i ($i = 1 \dots M-1$) 个基站参与测量的分组，其中每种组合均按照 5.1 节中所提出的定位模型进行定位估计。但是与 5.1 节不同的是，所有的 7 个中间结果（初始位置估计，近距离估计，远距离估计，Chan 算法估计，按加权平均融合估计，最小方差估计以及按方差融合估计）都要保留下供下一阶段的数据融合使用，而不仅仅提供一个最优估计值。这样，经过第一阶段定位估计后，每个基站分组均可以获得 $(C_{M-1}^{N-1} \cdot 7)$ 个定位估计值，其中 $N = 1 \dots M-1$ 。

对于 M 个基站参与测量的分组，则只需要按 5.1 节中所提出的定位模型进行定位估计，从而获得一组（7 个）中间结果。

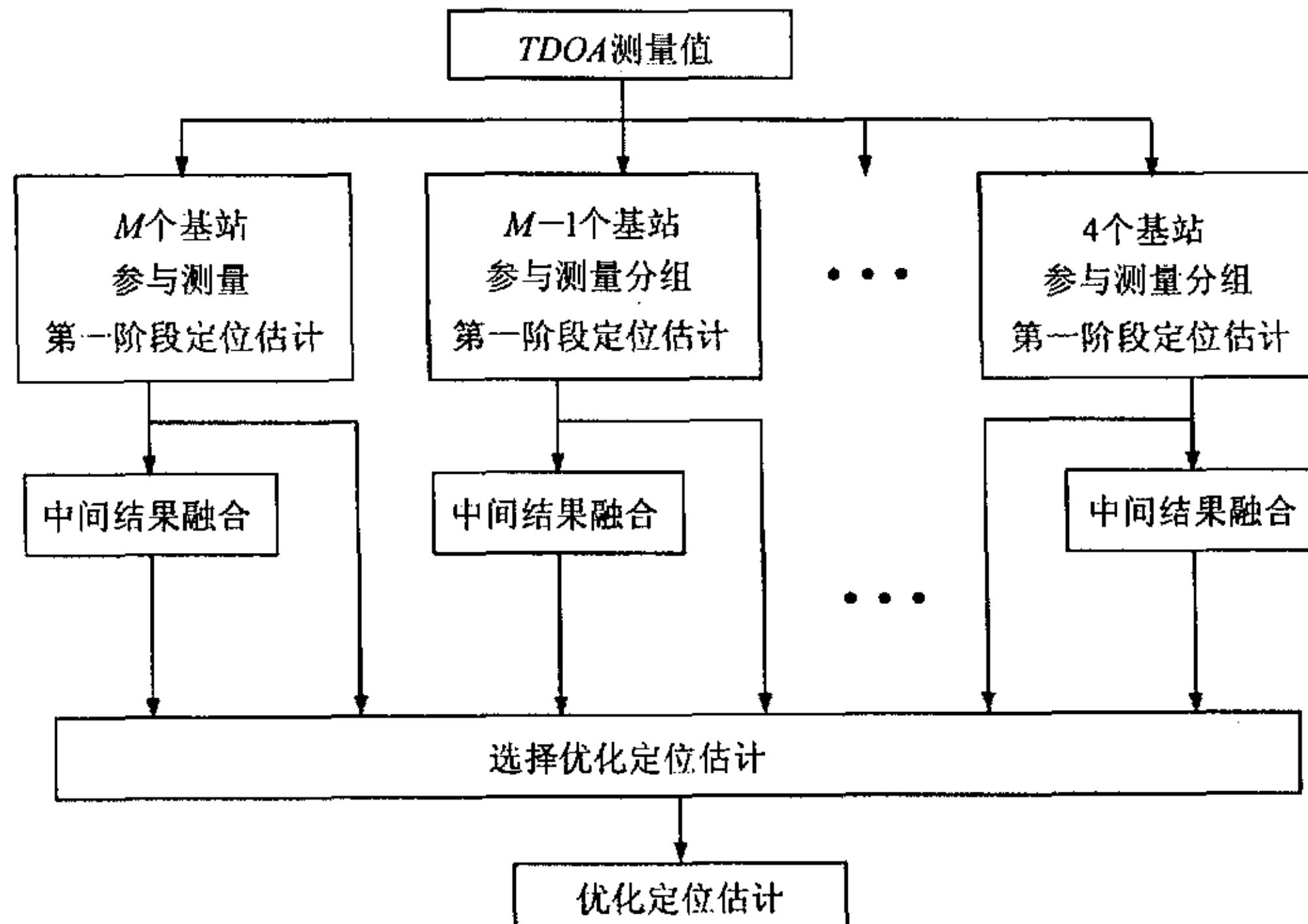


图 6.1 基于多基站组合测量结果融合的定位模型

Fig. 6.1 Structure of the data fusion location model based on the result calculated by the different combination of Bases

2. 中间结果的数据融合

对步骤 1 中每个分组获得的 C_{M-1}^{N-1} 个定位估计值分别进行第一阶段的数据融合，具体结构如图 6.2 所示。

图中， $l = C_{M-1}^{N-1}$ ，代表不同数目基站分组中基站组合的数目， $i = 1 \dots 7$ 分别代表 7 种中间定位估计值。

第一层数据融合规则与 5.1 节中的定位模型的第一层融合规则相同，均为对输入的中间估计值进行平均。

融合后的估计值为：

$$\hat{x}_{i1} = \frac{\sum_{j=1}^l x_{ij}}{l} \quad \hat{y}_{i1} = \frac{\sum_{j=1}^l y_{ij}}{l} \quad (6-1)$$

其中 $i = 1 \dots 7$

第二层数据融合过程直接按输入估计值的定位误差的方差加权。设输入位置估计的均值和方差为 $(x_{ij}, y_{ij}, \sigma_{x_{ij}}^2, \sigma_{y_{ij}}^2)$ ，融合后的定位估计值为：

$$\hat{x}_{i2} = \frac{\sum_{j=1}^l \sigma_{x_{ij}}^{-2} \cdot x_{ij}}{\sum_{j=1}^l \sigma_{x_{ij}}^{-2}} \quad \hat{y}_{i2} = \frac{\sum_{j=1}^l \sigma_{y_{ij}}^{-2} \cdot y_{ij}}{\sum_{j=1}^l \sigma_{y_{ij}}^{-2}} \quad (6-2)$$

其中 $i = 1 \cdots 4, 6, 7$

在第二层数据融合中，同时还根据最小定位误差方差准则从输入估计值中选择一个估计作为本层的另外一个估计值。如果本层融合无法进行，例如所有的输入估计值均无法获取方差（当输入基站组合的数目 l 比较大时，这种情况出现的概率极低），则用第一层融合的结果作为第二层融合估计值，此时的融合输出值只有位置而没有相应的方差信息。

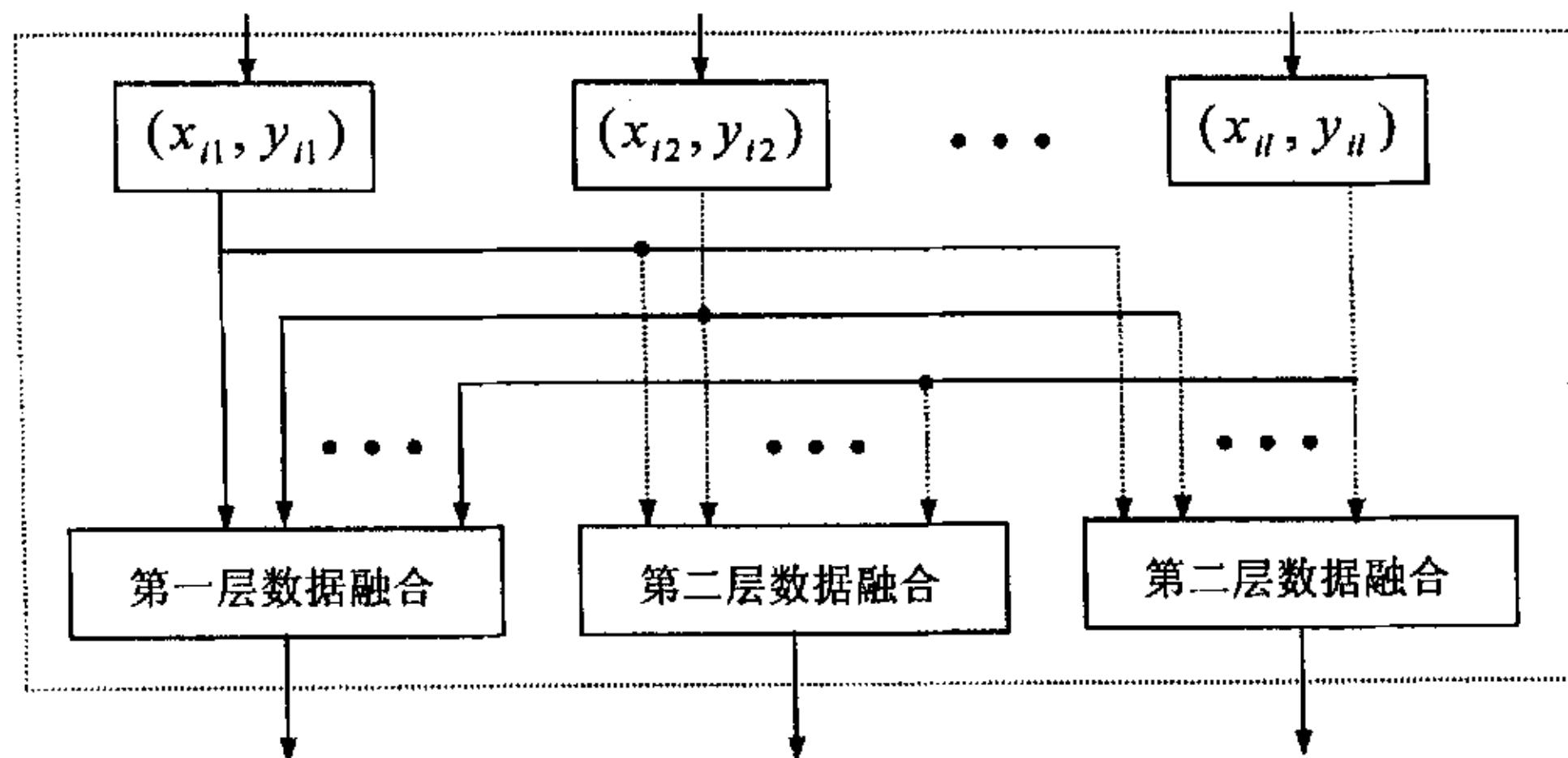


图 6.2 中间结果数据融合结构

Fig. 6.2 Structure of the data fusion model based on the intermediate location estimation

图 6.2 中的虚线部分代表两层含义：

1. 因为第二层融合都需要输入值提供方差信息，如果输入的某个输入数据只有位置估计而没有方差信息（在 5.1 节中对这种情况进行了说明），则将该输入值淘汰而不能作为供第二层融合的数据。
2. 在供本层融合的 7 行 l 列数据中，第 5 行的 l 个数据属于第一阶段数据融合的按加权平均估计输出，因此本身就没有方差信息，所以需要淘汰，而不能供第二阶段数据融合使用。

最终经过第二阶段中间结果数据融合后，共产生 $(\sum_{i=4}^{M-1} (l_i \cdot 7 + 19)) + 7$ 个定位估计值，从中选择一个最优估计作为最终的定位估计输出。其中 l_i 代表参与测量基站数目为 i 时的基站组合数目。

6.2 仿真及性能分析

为了验证定位模型的定位性能，采用 Matlab 对本定位模型与 5.1 节中提出的定位模型以及 Chan 算法进行了仿真性能对比。

选择的仿真条件为：

1. 仿真环境：参与定位测量的仍为图 5.2 所示的 7 基站蜂窝网络系统，服务基站所在的小区划分为三个 120 度扇形无线蜂窝小区。针对的仿真环境为：闹市区，普通市区，郊区以及乡村环境。因为提出本模型的目的主要是针对提高闹市区内的定位性能，

而在前面的仿真结果中, 由图 5.3 可以看到, 在闹市区中, 小区半径为 5km 时算法定位的平均误差最大, 因此本部分仿真小区半径采用 5km。可以预期, 当小区半径小于 5km 时, 闹市环境中的定位性能是肯定优于 5km 时的仿真结果的。

2. 仿真位置选取: 供仿真的位置是与 5.2 节中仿真所采用的相同的位于服务基站所在小区内的 4200 个点。由于计算量过大, 对每个位置的定位仿真运算只进行一次。

3. 引入误差模型与参数: 所采用的误差模型采用 5.2 节中的测量误差与 NLOS 误差模型。对于测量误差, 选择的参数为均值 0 米, 标准差为 50 米。对于 NLOS 误差, 服务基站测量受 NLOS 影响的概率 P_{nlos} 定为 0.4, 对于其余基站 P_{nlos} 定为 0.7。

4. 性能评价标准: 评价算法的性能标准仍然选择平均定位误差以及误差累计分布函数。

5. 仿真结果:

表 6.1 列出了三种定位方法在平均定位误差方面的对比。

表 6.1 各种典型环境下算法的平均定位误差 (米)

Table 6.1 The mean location error of the three location method in different propagation environments

	闹市	市区	郊区	乡村
Chan 算法	412.3062	154.2343	118.8165	53.9958
5.1 节定位模型	273.7423	102.9585	75.8423	25.7114
6.1 节定位模型	119.9920	37.7822	26.0563	11.6055

下面各图为三种定位方法在误差累积概率方面的性能对比。(仿真条件: 小区半径 5km, 测量误差 (0, 50m), P_{nlos} 为 (0.4, 0.7))

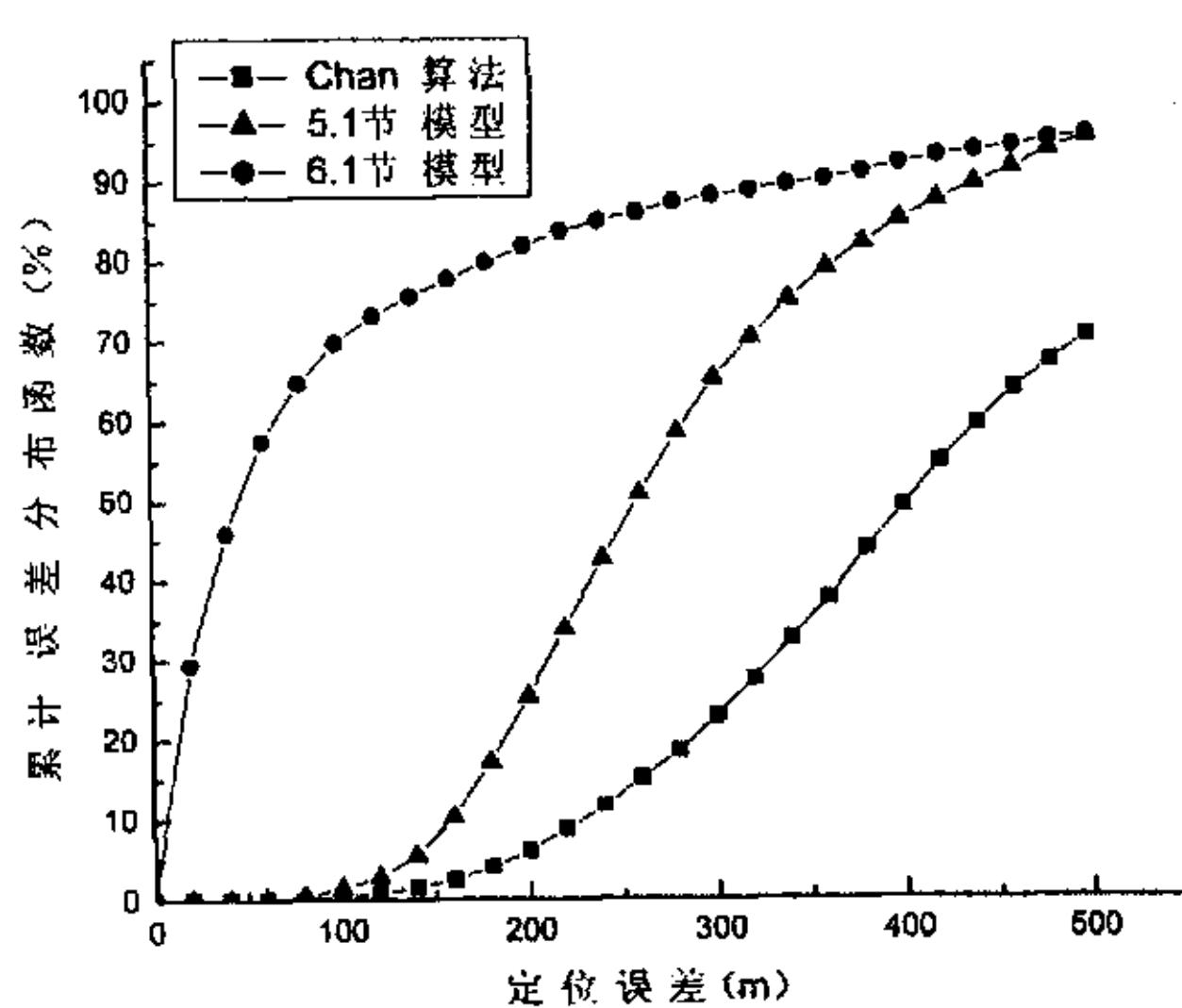


图 6.3 闹市环境误差累积分布函数图

Fig. 6.3 Error cumulative distribution function in bad urban environment

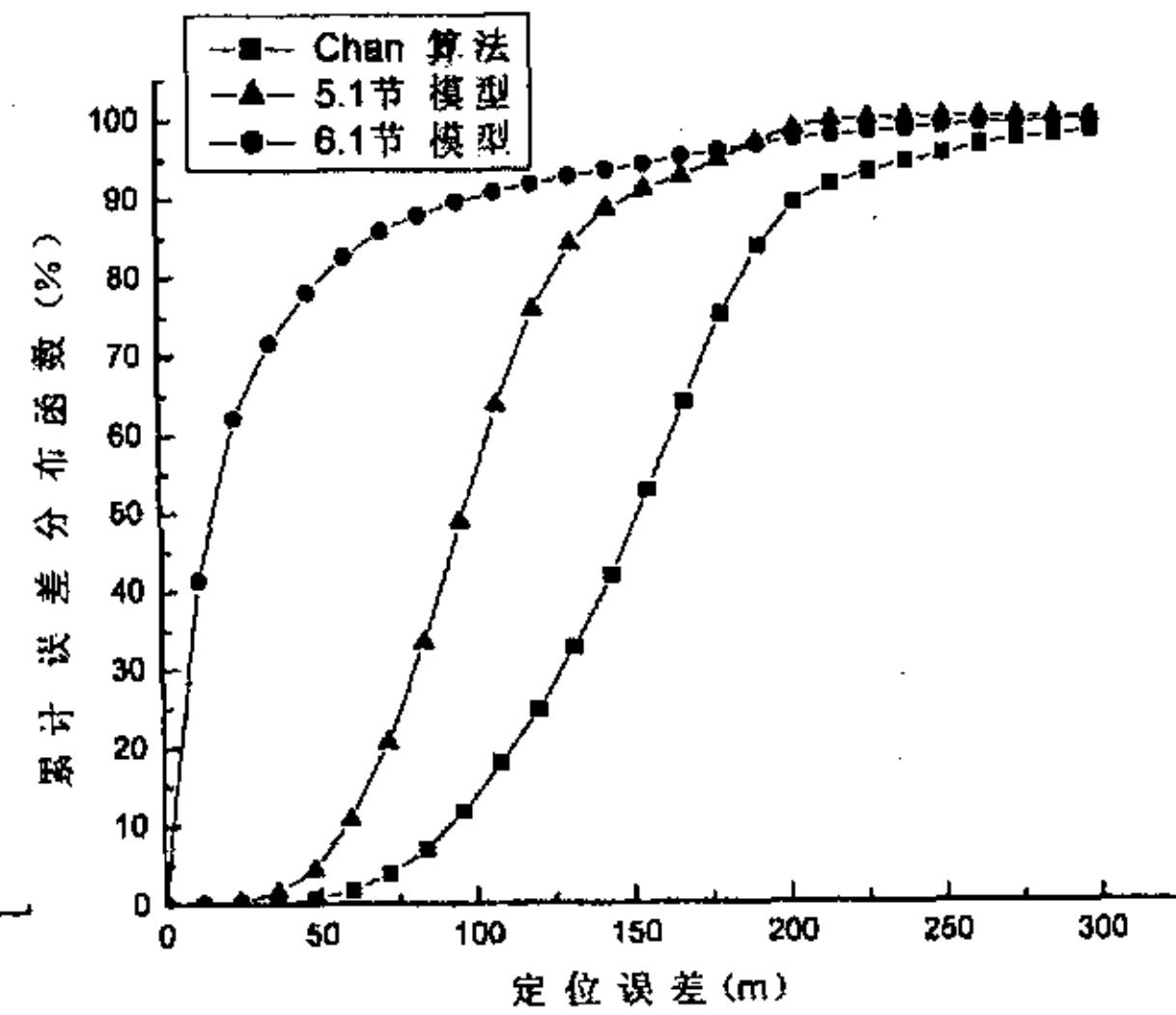


图 6.4 市区环境误差累积分布函数图

Fig. 6.4 Error cumulative distribution function in urban environment

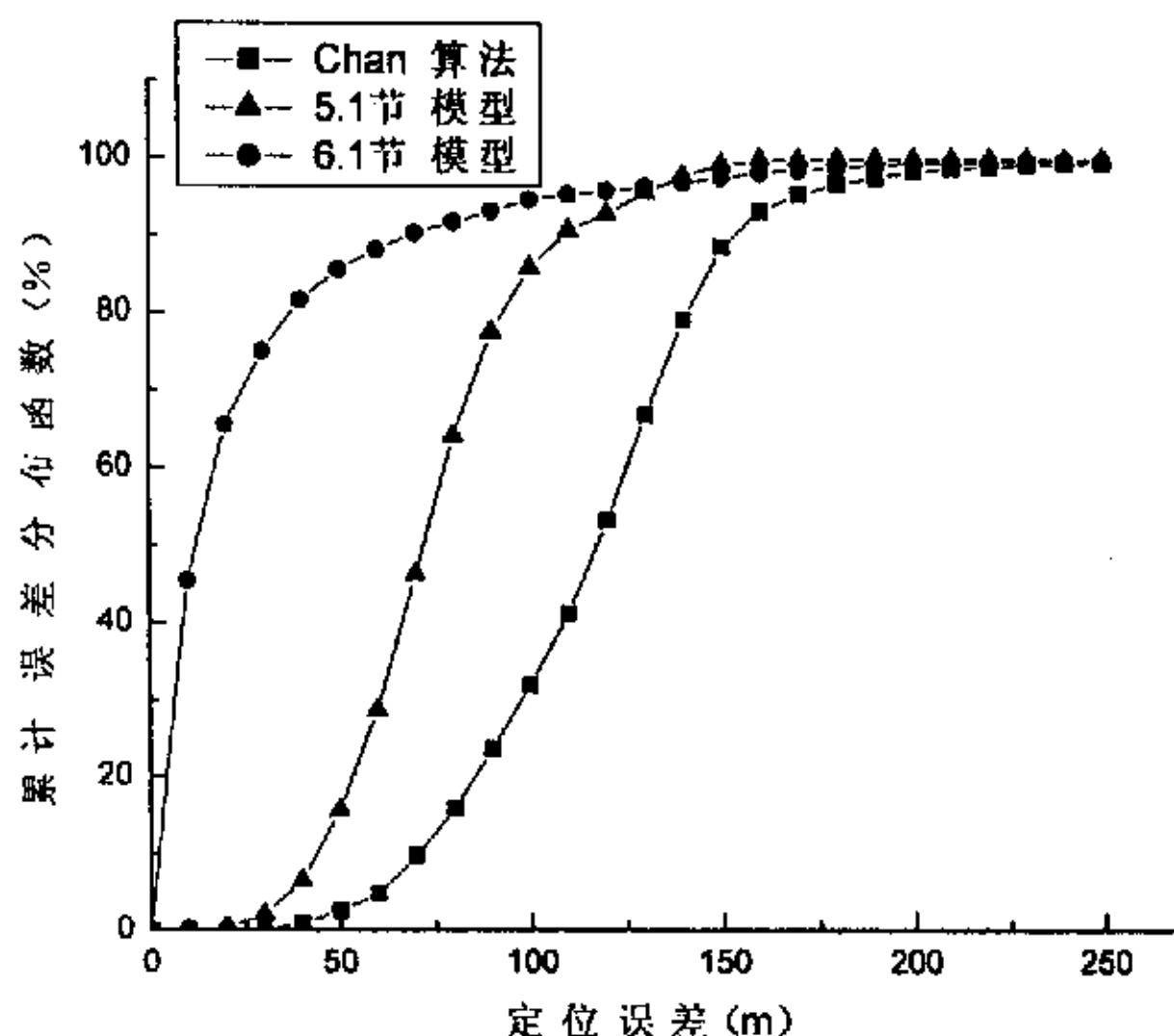


图 6.5 郊区环境误差累计分布函数图

Fig. 6.5 Error cumulative distribution function in suburb environment

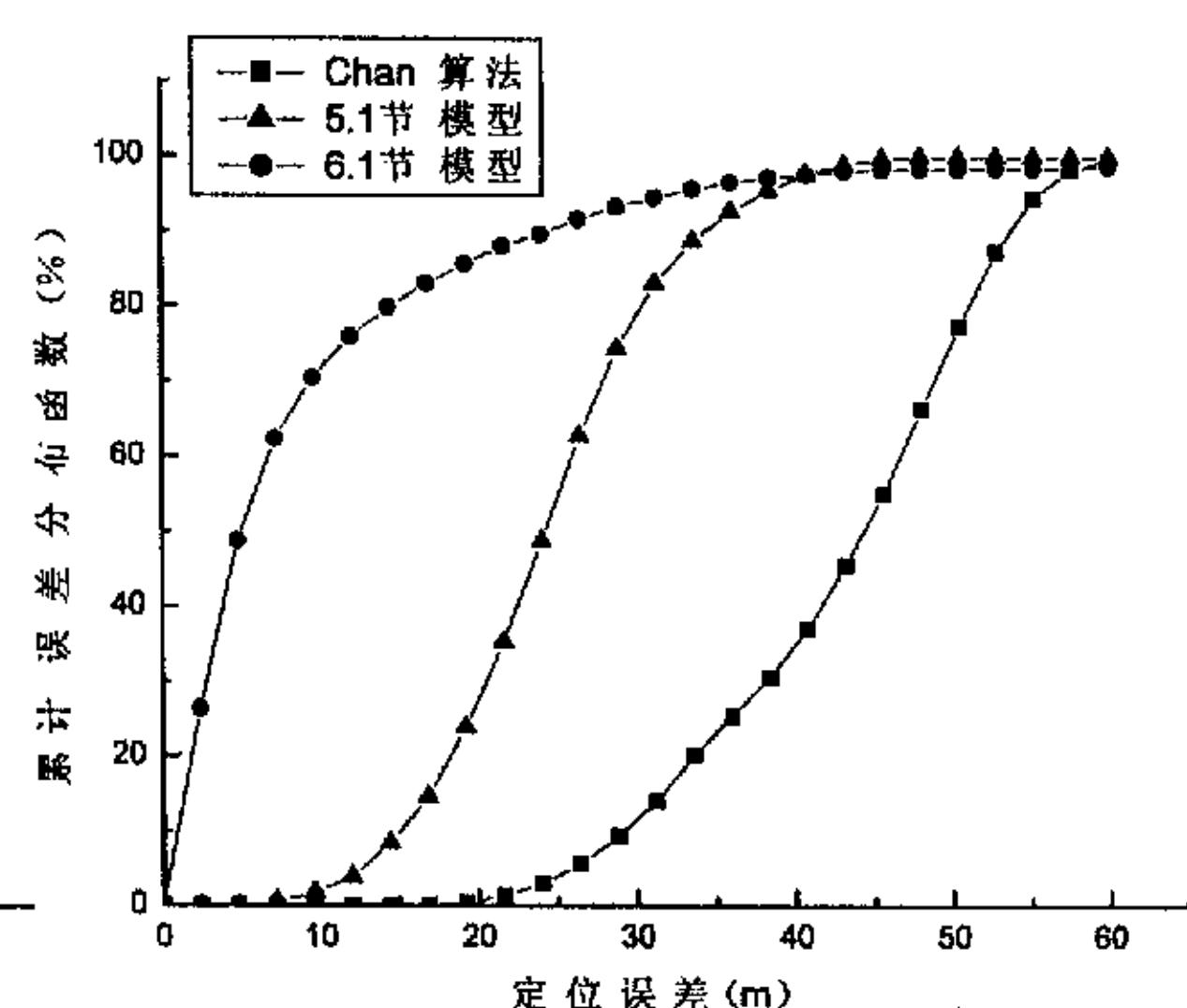


图 6.6 乡村环境误差累计分布函数图

Fig. 6.6 Error cumulative distribution function in rural environment

从图 6.3 到图 6.6 可以看出，在四种环境下，本节提出的算法获得的定位性能要优于 5.1 节的定位模型。定位误差在 125 米以内的概率分别为：71.83%，92.19%，96.02% 和 100%，因此，本节提出的定位模型能够改善 5.1 节中的定位模型在闹市环境下定位效果不佳的缺点，在四种环境下均能满足 FCC 颁布的 E911 紧急定位第三阶段的要求。总结：

由前面的仿真结果表明，在四种典型的移动通信环境下，本节提出的定位模型对比 Chan 算法和 5.1 节中提出的定位模型都能取得更优的定位性能。其中在闹市区内的性能提高正是我们提出本模型时所期望获得的性能。

6.3 定位时间分析

在计算量方面，虽然没有定性的分析，不过仍然可以直观地看出，本定位模型的计算量对比 5.1 节定位模型的计算量有大幅度的提高。这是因为本节中的模型需要计算不同数目基站分组的测量结果，在每个分组内部都要计算不同的基站组合获得的 TDOA 测量值对应的定位估计，经过分组的定位估计后还需要对所有的分组结果进行二次融合，因此在计算量上的提高是惊人的。尤其需要注意的是，这种计算量的提高随着参测基站的数目增加而增加，因为参测基站数目增加必然伴随着不同基站数目分组上的增加。

仿真结果显示，用于最终融合计算的定位时间上升为 0.343 秒，而用于计算 50 次 TDOA 测量值对应的中间融合结果的时间则为惊人的 8.122 秒。显然，这么长的定位时间是根本不适合应用于实际环境中的。虽然利用图 5.12 中所得到的结论，可以利用更少的 TDOA 测量值以减少定位时间同时获取相近的定位精度，但是在利用 15 组 TDOA 测量值进行定位时，总的定位时间仍然长达 5.06 秒。可以分析出，用于供最终融合使用的中间阶段的计算结果占用了大量的运算时间。

虽然该模型的定位时间较长，但是仍存在改善的可能。因为在仿真中发现，有一些

分组的中间融合结果以及某些融合规则的分组不能实现定位性能的提高，而将这部分不能取得性能改善的分组剔除后，可以对模型进行简化从而减少相当一部分计算量。

现在对 6.1 节中提出的定位模型进行如下修改：
只采用图 6.1 中参测基站数目最少也就是组合数目最多那个分组，同时取消图 6.2 中的第一层数据融合过程。经过修改后的定位模型与 6.1 节定位模型的平均误差性能对比见表 6.2。

表 6.2 各种典型环境下算法的平均定位误差（米）

Table 6.2 The mean location error of the three location method in different propagation environments

	闹市	市区	郊区	乡村
6.1 节定位模型	119.9920	37.7822	26.0563	11.6055
6.1 节精简模型	132.1060	50.2067	38.4603	13.2994

由表中可以看出，精简后的定位模型的定位性能有所下降，在闹市区小区半径为 5km 的情况下已经不能满足 FCC 颁布的 E-911 紧急定位第三阶段的要求，但是定位性能对比 5.1 节的定位模型还是有显著提高的。当小区半径小于 3km 时，精简后的定位模型仍然能够满足 E-911 定位第三阶段的要求，定位性能可以满足要求。对于利用 15 组 TDOA 测量值进行定位时的定位时间以及融合时间分别下降为：3.81 秒和 0.2063 秒。

总之，本章中提出的定位模型的性能提高都是以牺牲计算量为代价的。因此，在利用本模型进行定位时要对定位性能要求和计算时间进行综合评估和选择。比如，在闹市环境采用优化后的本模型，而在其它环境中采用 5.1 节的定位模型；或者利用 5.3 节中的结论，在每次定位过程中采用数目较少的 TDOA 测量值，这样就可以在得到符合要求的定位性能的同时将计算时间控制在可以接受的范围内。

6.4 在接近实际环境中的综合仿真验证

前面两节中相关算法的仿真均采用 7 基站参与测量系统，即假设参与测量的基站数目始终为 7 个。而在实际环境中，受可听性问题影响，并不总能获得这么多的参测基站^[8]，而参与测量的基站越多，可能获得的定位精度也就越高^[49]。因此为了验证前面两节提出的算法在更接近真实环境的条件下所能获得的定位性能，进行了进一步的仿真。

6.4.1 仿真条件及环境

选择的仿真条件和环境与在 5.2 节中选择的条件完全相同。假设移动台所处的环境仍为 7 基站蜂窝网络，但是在参与测量基站数目上，每秒种参测基站的数目和位置不是固定而是随机产生的。参测基站数目产生的概率见表 6.3。

由该表可见，参与测量基站的数目越多，其出现的概率也就越小，这是符合实际情况的。在表 6.3 中采用的具体参数主要参考了文献^[2,12]中实际环境中可检测基站数目的统计图表，是经过近似而获得的。

表 6.3 参测基站数目出现的概率

Table 6.3 Probability of the number of base station which take part in measurement

	闹市	市区	郊区	乡村
7	0.2	0.2	0.1	0.1
6	0.3	0.3	0.2	0.2
5	0.6	0.6	0.4	0.4
4	1.0	1.0	1.0	1.0

6.4.2 仿真结果以及分析

表 6.4 给出了三种定位方法在平均定位误差方面的对比。其中每种环境下的子表中左边部分为 6.1 节方法的结果，右边为 5.1 节方法结果。

表 6.4 不同参测基站数目下的平均定位误差（米）

Table 6.4 Mean location error with different base station

	闹市	市区	郊区	乡村
7	132	277	50.2	102.9
6	347	307	146.9	115.5
5	501	370	215.8	140
4	—	496	—	189.8
				75.1
				38.4
				75.1
				13.3
				25.4
				38.2
				29.3
				60.5
				37.3
				—
				139.7
				—
				48.6

由表 6.4 可以明显看出，当参与测量的基站数目越多时所能获得的定位性能也就越好。同时也可以发现，6.1 节提出的定位模型在 7 基站参与测量的情况下可以有效提高定位精度，但是在参与测量基站数目下降到 7 以下时提高效果并不明显，甚至不如 5.1 节所提出的定位模型的效果好。因此在进行定位时，对于 7 基站参与测量的情况选用该模型，而在参测基站数目小于 7 时仍然采用 5.1 节的定位模型。值得注意的是，在闹市的环境下，即使引入 6.1 节的定位模型处理 7 基站参与定位的情况，平均定位误差仍上升为 335.2 米，这样的性能无法满足 E911 第三阶段的定位要求。因此，如何提高参测基站数目较少时算法的定位精度尚待更深入的研究。

6.1 节定位模型最终的平均定位误差如下表所示：

表 6.5 6.1 节定位模型的平均定位误差（米）

Table 6.5 Mean location error of model 6.1

	闹市	市区	郊区	乡村
平均定位误差	335.2	134.2	83.13	31.52

前面的仿真都是在小区半径为 5km 的情况下进行的，也即所得出的结论仅适用于小区半径为 5km 的情况。由图 5.3 可以看出，当小区半径减少时，由于非视线路径误差的减少定位精度显著上升。因此当小区半径小于 5km 时，前面提到的定位模型仍然有获得令人满意精度的可能性。

下面为闹市环境下半径小于 5km 的各种小区内所能获得的平均定位误差以及误差小于 125 米的概率。

表 6.6 平均定位误差（米）以及误差小于 125 米的概率（%）

Table 6.6 Mean location error and the probability when error is less than 125m

	5km	4km	3km	2km	1km
平均定位误差（米）	335.2	202.4	161.8	139.7	112.4
小于 125 米的概率（%）	3.47	17.52	42.82	53.71	68.2

由该表可以看出，当小区半径小于 1km 时，定位性能能够达到 E911 第三阶段的定位要求。考虑到在实际环境中，闹市区的小区半径往往不大，这样就为这种定位模型的应用带来了可能。

6.4.3 小结

由前面的仿真结果分析可知，本章提出的定位模型在参测基站数目较多时可以获得比较满意的性能，但是当参测基站数目较少时只能在很小的范围内应用。由于闹市区的无线传播环境恶劣，非视线路径干扰非常强烈，因此闹市区内定位性能不佳是目前各种算法普遍具有的缺陷。目前的解决途径一方面是尽量改善定位算法在强干扰下的鲁棒性，另外一方面就是通过尽量增加参测基站数目来改善定位性能。目前主要应用的技术是通过在测量周期内增大移动台发射功率来提高移动台被检测到的可能性，从而提高能够检测到移动台信号的基站数目。

本文所做的工作在利用 Chan 算法进行定位的过程中，已经探索了对 Chan 算法中间数据进行融合的各种可能性。受数据源质量的影响，目前看来，已经缺少进一步提高的可能，因此，未来的研究就需要寻找其它更好的方法。

7 结束语

无线电定位技术是一项古老的技术，随着蜂窝移动通信的飞速发展，人们在享受移动通信带来的便利的同时也对手持移动台的用户安全性问题提出了更高的要求，而作为无线电定位技术的一个分支的移动台定位技术正是顺应这种要求而得到飞速发展的。

作为第二代移动通信重要组成部分并得到广泛应用的 IS-95 采用的是 CDMA 码分多址的技术，而第三代移动通信系统又普遍选择了 CDMA 技术，因此研究 CDMA 蜂窝网络中的移动台定位就具有非常重要的意义。由于 CDMA 蜂窝网的特点普遍选用基于 TDOA 测量值的定位算法，而常用的定位算法包括 TDOA 定位算法都会收到非视线路径干扰的影响而使定位性能严重下降。因此改善定位算法在存在非视线路径干扰下的定位性能就成为定位的关键问题。

本文在第五章中针对常用的 TDOA 定位算法-Chan 算法提出了基于 Chan 算法的数据融合定位模型，经过仿真验证在存在非视线路径干扰的情况下对比 Chan 算法可以获得改善的定位性能。改善的效果非常明显且在引入不同的测量误差时定位性能都十分稳定。但是该定位模型也有一定的不足，就是在闹市的环境下，虽然定位性能对比 Chan 算法有大幅提高，但是获得的定位精度尚不能满足 FCC 颁布的 E-911 紧急定位第三阶段的要求。为了进一步提高在闹市环境下的定位精度，在第六章中进一步提出了一种基于多基站组合测量结果的数据融合模型。通过仿真验证，该模型所获得的定位效果可以达到 E911 紧急定位第三阶段的要求。但是该模型的计算量非常巨大，并且随着参测基站的数目增加而增加。并且当参测基站数目较少时，该模型的定位精度急剧下降，只能在很小的范围内应用。因此，关于这个模型的计算量以及参测基站数目较少时的定位性能的改善还需要更为深入的工作。由于仅仅依靠蜂窝网络进行移动台定位所能获得的定位精度有其局限性，未来研究的重点必将转为基于移动台或者与卫星定位相结合的技术，而这些技术所具有的移动台造价高，设备复杂的缺点相信将会由硬件以及处理设备的快速发展弥补。

由于本人水平有限加之时间仓促，对于移动台定位方法的研究可能还不够深入，但是所作的工作可以为后续研究提供一些有益的参考。总之，基于 CDMA 蜂窝网络的移动台定位是一项应用前景非常广阔的技术，值得进一步深入的研究。

参考文献

- (1) FCC Docket No.94-102, Revision of Commission's Rules to Ensure Compatibility with enhanced 911 Emergency Calling Systems, RM-8143, July 26, 1996
- (2) J. H. Reed, K. J. Krizman, B. D. Woerner, T. S. Rappaport. An Overview of the Challenges and Progress in Meeting the E-911 Requirement for Location Service. Communications Magazine, IEEE, 4,April 1998. Vol. 36: pp. 30-37
- (3) Ericsson, Recapitulation of the IPDL positioning method, 3GPP TSG RAN WG1, TSGR1_4 (99)346, http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_04
- (4) Motorola, Timing Aligned IPDL positioning technique, 3GPP TSG RAN WG1, TSGR1_07b (99) b79, http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_07b
- (5) Qualcomm, gpsOne and Navigation, <http://www.cdmatech.com/solutions/products/gpsone.html>
- (6) S. Soliman, P. Agashe, I. Fernandez, A. Vayanos, P. Gaal, M. Oljaca. gpsOneTM: A Hybrid Position Location System, IEEE Sixth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Sept 2000,Vol. 1, No. 4: pp. 330-335
- (7) J. J. Caffery, G. L. Stuber. Overview of Radiolocation in CDMA Cellular Systems, IEEE Communication Magazine, April 1998,Vol. 36, No. 4: pp. 38-45
- (8) J. J. Caffery, G. L. Stuber. Subscriber Location in CDMA Cellular Networks, IEEE Transactions on VT, May 1998,Vol. 47, No. 2: pp. 406-416
- (9) 范平志, 邓平, 刘林. 蜂窝网无线定位. 北京: 电子工业出版社. 2002. 18-20
- (10) 3GPP TS 22.071, 3GPP TS Group Services and System aspects; Location Services(LCS);Services Description-stage1. <http://www.3gpp.org/ftp/spces>
- (11) 3GPP TS 22.071, 3GPP TS Group Radio Access Network; Functional Specification of Location ; Services Description- stage 1. <http://www.3gpp.org/ftp/spces>
- (12) Marko Silventoinen, Timo Rantainen. Mobile Station Locating in GSM, IEEE Wireless Communication System Symposium, 27-28 Nov. 1995: pp. 53-59
- (13) 赵亦林. 车辆定位与导航系统. 北京: 电子工业出版社. 2000. 48-83, 88-108
- (14) 张其善, 吴今培, 杨东凯. 智能车辆定位导航系统及应用. 北京: 科学出版社. 2002. 1-16, 163-173
- (15) Marko Silventoinen, Timo Rantainen. Mobile Station Emergency Locating in GSM, IEEE International Conference on Personal Wireless Communication, 19-21 Feb. 1996: pp. 232-238
- (16) 罗圣美, 邓芳伟, 王炜. CDMA 无线定位业务及其实现. 电信技术. 2002, 3 期: 19-21
- (17) 郑颖. 常用移动定位技术的研究和应用. 通信技术. 2001, 8 期: 79-81
- (18) 郭梯云, 杨家玮, 李建东. 数字移动通信. 第二版. 北京: 人民邮电出版社. 2002. 17-68
- (19) 市惠民, 李白萍. 蜂窝移动通信技术. 西安: 西安电子科技大学出版社. 2002. 19-48, 293-325
- (20) 邬国扬. CDMA 数字蜂窝网. 西安: 西安电子科技大学出版社. 2000. 126-153, 168-171
- (21) 邓平, 李莉, 范平志. 一种 TDOA/TOA 混合定位算法及其性能分析. 电波科学学报. 2002, 6 期 pp.633-636
- (22) 邓平, 刘林, 范平志. 一种改进的 TOA/AOA 混合定位算法. 电路与系统学报. 2003, 4 期 pp.54-57
- (23) 江纪锋, 张毅, 罗元. 无线电通信技术. 2001, 2 期 pp.20-25

- (24) Sung-Shik Woo, Heung-Ryeol You, Tae-Geun Kim. The Position Location System Using IS-95 CDMA Networks. IEEE/AFCEA Information Systems for Enhanced Public Safety and Security. May 2000: pp. 20–24
- (25) P. C. Chen. Location Estimation In CDMA Systems: Enhanced Measurement on Pilot Channels. IEEE International Conference on Communications. June 1999. Vol. 3: pp. 1784–1788
- (26) A. Ghosh, R. Love. Mobile Station Location in A DS-CDMA System. IEEE 48th Vehicular Technology Conference, VTC 98. May 1998. Vol. 1: pp. 254–258
- (27) Yangseok Jeong, Heungryeol You, Won Cheol Lee, Daesik Hong, Dae Hee Youn, Chungyong Lee. A Wireless Position Location System Using Forward Pilot Signal. IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings. May 2000. Vol. 2: pp. 1354–1357
- (28) N. Tyler. CDMA Mobile Station Location. IEEE Colloquium on Novel Methods of Location and Tracking of Cellular Mobiles and Their System Applications. May 1999. Vol. 2: pp. 5/1–5/6
- (29) 王月清, 柴远波, 吴桂生. 宽带 CDMA 移动通信原理. 北京: 电子工业出版社. 2001. 46–61
- (30) 啜刚, 王文博, 常永宇. 移动通信原理与应用. 北京: 北京邮电大学出版社. 2002. 41–55
- (31) 吴伟陵. 移动通信中的关键技术. 北京: 北京邮电大学出版社. 2000. 2–11
- (32) 郭梯云, 杨家玮, 李建东. 数字移动通信. 第二版. 北京: 人民邮电出版社. 2001. 17–67, 232–273
- (33) Sung-Shik Woo, Heung-Ryeol You, Jong-Seog Koh. The NLOS Mitigation Technique For Position Location Using IS-95 CDMA Networks. IEEE 52nd Vehicular Technology Conference. Sept 2000. Vol. 6: pp. 2556–2560
- (34) P. C. Chen. A Non-Line-of-Sight Error Mitigation Algorithm in Location Estimation. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, USA. Sept 1999. Vol. 1: pp. 316–320
- (35) Y. T. Huang, J. Benesty, G. W. Elko. An Efficient Linear-correction Least-squares Approach to Source Localization. IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. Oct 2001, pp. 67–70
- (36) R. Schimidt. Least Squares Range Difference Location. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems. No. 1 Jan 1996. Vol. 32: pp. 234–242
- (37) W. H. Foy. Position Location Solutions by Taylor Series Estimation. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems. March 1976. Vol. AES-12, No. 2,: pp. 187–193
- (38) B. T. Fang. Simple Solutions For Hyperbolic And Related Position Fixes. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems. Sept 1990. Vol. 26. No. 5: pp. 748–753
- (39) Y. T. Chan, K. C. Ho. A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location. IEEE Trans on Signal Processing. Aug 1994. Vol. 42. No. 8: pp.1905–1915.
- (40) P. C. Chen. A Cellular Based Mobile Location Tracking System. IEEE 49th Vehicular Technology Conference. May 1999. Vol. 3: pp.1979–1983.
- (41) 刘同明, 夏祖勋, 解洪成. 数据融合技术及其应用. 北京: 国防工业出版社. 1998. 1–17, 36–79, 126–141
- (42) D. L. Hall, J. Llinas. An Introduction to Multisensor Data Fusion. Proceedings of the IEEE. Jan 1997. Vol. 85. No. 1: pp.6–23.
- (43) J. Llinas, D. L. Hall. An Introduction to Multisensor Data Fusion. IEEE International Symposium

- on Circuits and Systems. June 1997. Vol. 6: pp.537-540.
- (44) T. Kleine-Ostmann, A. Bell. A Data Fusion Architecture for Enhanced Position Estimation in Wireless Networks. IEEE communications letters. 2001. Vol. 5. No. 8: pp. 343-345
- (45) 邓平. 蜂窝网络移动台定位技术研究. 西南交通大学博士学位论文 2002. 5
- (46) P. Deng, P. Z. Fan. An Efficient Position Based Dynamic Location Algorithm. Workshop on autonomous Decentralized System, Chengdu, PRC Sept 2000: pp. 36-39
- (47) L. J. Greenstein, Vinko Erceg, Y. S. Yeh, M. V. Clark. A New Path-Gain/Delay-Spread Propagation Model for Digital Cellular Channels. IEEE Trans on Vehicular Technology. May 1997. Vol. 46. No. 2: pp. 477-485
- (48) N. J. Thomas, D. G. M. Cruickshank, D. I. Laurenson. Channel Model Implementation For Evaluation of Location Services. IEE First International Conference on 3G Mobile Communication Technologies. March 2000. No. 471: pp. 446-450
- (49) Y. A. Abdulla, H. El-Hennawy, S. Mahrous. The Effect of Base Stations Configurations On The Accuracy of Hyperbolic Position Location In Macrocellular and Microcellular GSM Systems. Proceedings of the Eighteenth National Radio Science Conference. March 2001. Vol. 1: pp. 303-313

致 谢

本论文能够顺利完成，是与导师刘军民教授的悉心指导分不开的。在研究生就读期间，刘老师严谨的治学和工作态度都给我留下了深刻的印象，也是我未来工作的榜样。在生活上，刘老师也给了我无微不至的关心。在我遇到困难和挫折时，刘老师的鼓励和支持曾帮助我顺利度过难关。可以说在做学问和做人方面，刘老师给我的影响令人终生难忘。因此，在这里我要特别感谢刘老师给予我的帮助，向刘老师致以深深的谢意和敬意！

同时，魏东兴老师在我就读期间，也在学术上给予了我很大的启发。特别是他一丝不苟的学术作风，正直的为人给我留下了深刻的印象，在这里我也要向魏老师表示衷心的感谢！

尤其要感谢生我养我育我爱我的父母亲以及关爱我的姐姐和姐夫，无论在什么时候，亲人们默默的支持与鼓励都是我度过困难的精神支柱。在论文完成的时候，我非常希望他们能够分享我的快乐。

在平时的生活和学习中，教研室的崔承毅、李武翰等同学、已经毕业的常娥师姐以及其他师兄师姐师弟师妹们也都曾给我热情的帮助，在此一并表示感谢。还要特别感谢在论文修改过程中给予我实质性帮助的吴娜师妹。

最后，要感谢那些一直默默支持我关心我的朋友们，他们是刘石、聂文金、王振辉、周澜、陈业嘉、周殿文、王宏志等等，没有他们的支持，我甚至都不能顺利完成研究生的学业！在此真诚感谢他们。

向关心过我的人们说一声：愿你们一生平安！

大连理工大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“大连理工大学硕士、博士学位论文版权使用规定”，同意大连理工大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连理工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，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

保密口，在____年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密口。

(请在以上方框内打“√”)

作者签名: 张晨

指导导师签名: 刘永凡

2024年4月5日