

# 面向 CDMA 蜂窝网的无线定位技术

田孝华<sup>1</sup>, 廖桂生<sup>2</sup>, 赵修斌<sup>1</sup>, 王晓薇<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077; 2. 西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 蜂窝通信系统中移动台定位问题作为研究的热点之一, 受到了广泛的关注. 实现蜂窝通信系统中移动台定位, 需要解决定位算法与定位参数估计问题. 本文以定位算法与定位参数估计为主线, 综述了蜂窝通信系统中移动台定位的发展过程、现状、取得的进展以及面临的挑战, 特别是对减轻非视距传播影响的定位算法进行了详细讨论.

**关键词:** 无线定位; 参数估计; 非视距传播

**中图分类号:** TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2196-08

## Wireless Location Technologies for CDMA Cellular Radio Networks

TIAN Xiao-hua<sup>1</sup>, LIAO Gui-sheng<sup>2</sup>, ZHAO Xiu-bin<sup>1</sup>, WANG Xiao-wei<sup>1</sup>

(1. The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Eng. Univ., Xi'an, Shaanxi 710077, China;

2. National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Wireless position location has received considerable attention in CDMA cellular radio networks over the past few years. The process of calculating the location estimate can be views as consisting of two parts. The first part provides estimates of location parameters and the second part is the algorithm that uses the parameters to determine the MS's position. Based on the methods of location estimating and location parameter estimating, the development history of current and future challenges in wireless position location are reviewed and location estimating techniques for mitigating the influence of non-line-of-sight (NLOS) propagation are discussed.

**Key words:** wireless location; parameter estimation; non-line-of-sight (NLOS) propagation

## 1 引言

定位通常是指确定地球表面某个物体在某一参考坐标系中的位置. 无线电定位作为定位的一个重要类型, 与其它类型的定位一样, 最初也是应用于导航定位系统中. 用户接收机根据接收的无线电导航台发射信号的频率、相位、时间等参数的变化, 通过特定的方法来计算出自己的位置. 专用于给飞机、舰船提供定位服务的典型无线电导航定位系统有罗兰-C (Loran-C)、奥米加 (Omega)、塔康 (Tacan)、雷达 (Radar) 及伏尔/地美依 (VOR/DME) 等<sup>[4~8]</sup>. 20 世纪 60 年代国际上开始研究应用于其它领域的无线电定位系统, 如自动车辆定位 (AVL) 系统<sup>[113]</sup>, 它在公共交通管理、货物运输以及出租车管理中得到广泛应用. 随着第一颗人造地球卫星的发射成功, 以卫星为基地的卫星导航系统, 由于既具有天体导航覆盖全球的优点, 又具有地面无线电导航系统的全天候和高精度的长处, 从开始到现在一直得到空前的重视. 相继出现以及计划实施的卫星导航系统有子午仪卫星导航系统 (Transit)、全球定位系统 (GPS)、GLONASS 系统、北斗双星定位系统以及伽利略 (Galileo) 卫星导航定位系统. 其中 GPS 系统是目前技术上最成熟且已广泛使用的一种卫星导航定位系统, 能够廉价便捷

地提供高精度和连续的位置、速度、航向、姿态和时间信息. 但采用 GPS 定位会受到以下因素限制而无法提供所需的全地形可靠覆盖和强有力紧急服务. 第一, GPS 接收机完成一次定位, 至少能同时收到 4 个卫星的定位信号, 这在密集的市区高楼之间以及建筑物内一般均无法满足; 第二, GPS 系统可能要求多至几分钟才能提供定位, 这在有生命危险的情况是非常显著的耽搁; 第三, GPS 接收机只能对其自身定位, 系统无法得到该定位信息进而采取相应救护措施, 所得到的位置信息还必须通过无线或有线通信方式传递到系统或控制中心.

80 年代以来, 随着人们对智能交通运输系统 (ITS) 的需要及蜂窝移动通信系统的出现, 对无线电定位技术有了新的要求. 美国在 1991 年开始实施的智能运输系统通信标准中, 提出了通过移动通信网提供定位业务的要求<sup>[11~6]</sup>. 1996 年, 美联邦通信委员会 (FCC) 正式将位置信息的提供列为 911 急救业务的必备要求, 并要求在 2001 年 10 月前各种无线蜂窝网必须能对发出 E-911 紧急呼叫的移动台提供定位服务, 且精度在 125 米以内的概率不低于 67%, 在 2001 年以后提供更高的定位精度与三维位置信息. 该委员会于 1998 年及 1999 年两次对标准进行了修改与补充. 在 1998 年提出了定位精度在 400 米以内的概率不低于 90% 的服务要求. 在 1999 年 12 月

收稿日期: 2004-06-29; 修回日期: 2005-06-20

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60172028); 空军工程大学电讯工程学院学术基金 (No. 120051)

FCC99-245 将 E-911 的需求做了进一步的修改和细化,它不仅为网络设备和手机生产商、网络运营商等对定位技术在网络设备和手机中的实施和支持提出了明确要求和目标安排,而且根据定位的类型不同,对定位精度做出了更为明确的规定。即基于蜂窝网络的定位(不改动终端),要求定位精度在 100 米以内的概率不低于 67%,在 300 米以内的概率不低于 95%;基于移动台的定位(可以改动终端),要求定位精度在 50 米以内的概率不低于 67%,在 150 米以内的概率不低于 95%<sup>[52]</sup>。虽然对蜂窝网中移动台定位的要求最初是由美 FCC 为满足 E-911 要求而提出的,但对网络中的移动台进行定位还具有以下优点:系统可以利用移动台的位置信息来增加系统性能、改进系统设计、有效管理网络资源、调节系统容量、实行灵活收费、提供信息服务以及为快速破获利用移动电话进行的经济欺诈提供可能<sup>[4~6]</sup>。自 E-911 要求颁布以来,由于政府的强制性要求和市场利益的驱动,定位服务成为了现代移动通信系统必须具备的一个基本功能。3GPP 和 3GPP2 对定位要求的更加具体化,促使国际上出现了对移动定位的研究热潮。许多通信公司、大学和研究所均进入了此项技术的研究。特别是各国主要大公司均就 GSM、IS-95 和第三代移动通信系统等网络开始制定各自的定位实施方案。

## 2 无线定位的分类与存在的难点

无线电定位系统中对移动台的定位是通过检测移动台与多个位置已知基站间信号的电参量,并将电参量转换成对应的定位参数,然后采用相应的定位算法来实现的。常用的三个定位参数为距离、距离差和信号到达角(AOA, DOA)。无线电定位根据采用的位置线不同可分为圆位置线定位、双曲线位置线定位、直线位置线定位和混合位置线定位四种类型<sup>[4,7]</sup>。根据进行定位的主体和利用的设备不同可将对移动台的无线定位分为基于移动台(终端)的定位、基于网络的定位及 GPS 辅助定位三种类型<sup>[1,2,4,10]</sup>。基于移动台的定位是由移动台根据接收到的多个位置已知的基站信号的电参量,确定出移动台与基站间几何关系,并由集成在移动台中的定位算法,估计出移动台的位置。采用这种定位方案的优点是不需要增加网络负荷,缺点是必须对终端进行改动;基于网络的定位是由多个位置已知的基站同时检测移动台发射的信号,并将各接收信号携带的某种与移动台位置有关的特征信息送到网络的移动定位中心(MLC)进行处理,估计出移动台的位置。采用这种方法的优点是终端不需要改动,其缺点是由于 CDMA 蜂窝系统是功率受限系统,当移动台发射信号不能被多个基站收到时,定位将无法实现。另外,由于对网内所有用户的定位均集中在移动定位中心,对定位算法的高效性、实时性均有很高要求;GPS 辅助定位是由集成在移动台中的 GPS 接收机和网络中的 GPS 辅助设备,利用 GPS 系统实现对移动台的自定位。这种定位方案将网络信息与 GPS 信息相结合,改善了定位的可用性、灵敏性、精确度,但在移动台内部集成 GPS 接收机存在体积偏大、能耗过大、GPS 接收机首次定位时间过长、成本较高等问题<sup>[2,6,4,10]</sup>。上面定位均是通过测量定位参数来完成,在对移动台的定位中还存在一种不需要测量定位参数的

定位技术。这种定位技术被称为起源蜂窝小区(COO)定位技术<sup>[6]</sup>,它是通过采集移动台所处小区的识别号来确定用户的位置。其优点是定位时间短,其缺点是定位精度与小区半径成反比。

虽然从 70 年代末期就开始了蜂窝移动通信系统的研究,并在 90 年代由数字蜂窝移动通信取代了原来的模拟蜂窝移动通信,但对蜂窝网中的移动台提供定位服务却是在 90 年代后期才开始进行研究。尽管对移动台进行定位的基本原理与导航中的无线电定位原理相同,但由于二者的无线传播环境、工作范围、信号格式及系统的功能不同,引起定位误差的原因、解决的重点、难点均存在巨大差异<sup>[1,8]</sup>。对于无线电导航定位系统来说,作用距离较远,其功能比较单一(主要为飞机或舰船提供定位服务),发射台与接收机之间存在视距(LOS)传播,接收机收到信号主要来自发射台,信号数少,定位误差主要由定位参数的测量误差引起,由几何淡化因子(GDOP)导致的定位误差,一般可通过合理设置发射台的位置来减小。另外,由于发射台的成本很高,一般不提供多余的定位参数;而对于蜂窝移动网来说,其主要功能是实现用户的有效通信,定位只是基本功能之一,因此对基站的选址也主要考虑通信的有效性,而无法兼顾几何淡化因子对定位精度的影响,基站与移动用户之间一般为非视距(NLOS)传播,接收设备接收的信号是一个经过时间扩展、多谱勒频率扩展和角度扩展的多径信号的合成<sup>[1,24]</sup>。特别对于 CDMA 系统来说,基站除了接收定位用户的信号外,还会收到大量的多址干扰信号<sup>[4,81]</sup>,这都将影响对定位参数的估计精度。引起定位误差的因素有:设备测量误差、几何淡化因子效应、非视距传播效应、多径效应、多址干扰及远近效应<sup>[1~6]</sup>。尤其是非视距传播效应将导致定位精度的严重下降,采用传统的定位技术(即存在视距传播的定位技术)将无法达到 E-911 的定位精度要求。减小非视距传播影响的定位算法和对定位参数的有效估计成为了近年来的研究热点与难点。

## 3 无线定位算法

根据对定位参数的处理方法不同,无线定位算法可分为基于几何结构的位置线交叉方法和统计定位方法;根据应用场合不同,可分为视距定位算法和非视距定位算法。无线定位技术最初是在无线导航领域获得应用,而对于无线导航系统来说收发设备间一般存在视距传播,因此,早期定位算法均为视距定位算法<sup>[11~20]</sup>。随着美 E-911 定位要求的提出,由于采用蜂窝网对移动台进行定位时,收发设备间一般为非视距传播,因此,后期的定位算法以非视距定位算法为主<sup>[21~42]</sup>。基于几何结构的位置线交叉方法是一种根据位置线与定位参数的关系,通过计算位置线交点来得到目标位置的方法<sup>[11,42]</sup>。由于这种方法需要计算所有独立位置线的交点,当估计出的定位参数与定位的位置坐标数相等或相差不多时,可采用这种方法;当估计出的定位参数远大于定位的位置坐标数时,计算量太大。另外,采用这种方法可能还会存在由于定位参数的估计误差而导致几条位置线没有交点而无法得到目标位置的问题。

统计定位方法是一种利用估计参数误差的统计特性来实现目标定位的方法<sup>[12~18]</sup>。在视距传播条件下,定位参数的估计误差一般可用零均值的高斯分布来表示。由于定位参数与位置坐标呈非线性关系,因此,统计定位问题实质上是一个求解非线性最优化问题,而直接求解非线性最优化问题非常复杂,人们开始寻找简单方法求解非线性最优化问题,并获得了丰硕的成果<sup>[12~18]</sup>。对视距统计定位方法的研究可归纳为两类。一类是通过适当近似将非线性优化问题转化为线性优化问题,这样,既降低了运算的复杂性,又不会对定位精度有太多损失,是一种求解非线性优化问题的次最优方法。典型方法为 Foy 提出的 Taylor 级数定位方法<sup>[17]</sup>。该方法是一种基于 Taylor 级数展开的加权最小二乘(WLS)估计的迭代算法。它利用估计的所有定位参数来改善定位精度,是一种对各种定位类型均适用的方法。其核心思想为:首先,在目标位置的初始猜测点(或估计点)用 Taylor 级数展开,并忽略高次项的影响,将非线性方程变为线性方程;然后,采用加权最小二乘(WLS)对偏移量进行估计,并用估计的偏移量修正目标位置,不断迭代,直到估计的目标位置逼近真实位置。另一类是在不进行任何近似的条件下,利用其它信息或多余的定位参数,将非线性方程转化为线性方程,从而用线性最小二乘(LS)方法估计目标位置<sup>[12~16,18,42]</sup>。其中最具有代表性的方法是 Chan<sup>[18]</sup>方法和 Caffery<sup>[42]</sup>方法。Chan 方法是针对波达时间差(TDOA)定位系统而提出的一种定位方法。当定位参数与未知变量相等时,它等效为线性交叉方法;当估计的定位参数大于未知数时,它是一种最大似然(ML)估计的近似实现方法,在参数误差很小时能达到 C-R 下界。其核心思想为:引入一个中间变量,将非线性方程变为线性方程,并用加权最小二乘方法对目标位置进行粗略估计;然后利用中间变量与目标位置变量的确定关系,再次用加权最小二乘方法对目标位置进行精确估计。Caffery 方法是针对波达时间(TOA)定位系统而提出的一种定位方法。其核心思想是:用两圆相交的交点连线作为测距位置线,将非线性方程转化为线性方程,然后用最小二乘方法对目标位置进行估计。它不需要引入中间变量,但要求测量的定位参数多于未知变量个数。

进入 90 年代以后,随着美国 E-911 定位要求的提出,移动台定位技术在国外受到高度重视和深入研究。近年来在 IEEE 的有关期刊和会议,特别是 VTC 上发表了大量的研究论文。各大公司(Motorola, Nokia, Ericsson, QUALCOMM, Samsung 等)也积极开展了对基于 GSM, IS-95 和第三代移动通信系统中的 WCDMA 和 CDMA2000 等网络采用的定位技术的研究,研究的内容涉及到蜂窝网移动台定位的各个方面。由于移动台与基站间很少存在视距传播,因此,定位误差主要由非视距传播引起。为了满足 E-911 定位精度要求,对定位算法研究的重点也集中到了怎样减小非视距传播影响的问题上,并提出了大量算法。归纳起来可分为以下几类。第一类是由 M P Wylie 提出的视距重构方法<sup>[24]</sup>。它首先从测量参数误差的方差判断是否为视距传播。若不是视距传播,则利用测量方差重构视距传播值,并对重构的视距值进行滤波,然后用视距定位算法估计移动台位置。S S Woo 将该方法应用到了采用 AOA/TDOA 定

位的 CDMA 系统中<sup>[26]</sup>;第二类为非视距加权方法<sup>[4,31]</sup>。文献[4]对测量值进行视距与非视距判断,并对非视距测量值加小权重来改善定位性能,文献[31]直接利用 GDOP 作为加权因子来改善定位性能;第三类为数据平滑方法<sup>[45,46]</sup>。将不同时刻的测量值进行平滑、滤波处理,以减小 NLOS 的影响;第四类为最大似然参数估计方法<sup>[19,20]</sup>。根据在 NLOS 环境下, AOA, TOA, TDOA 测量误差的概率分布函数,采用最大似然准则来估计移动台的位置;第五类为不等式约束的非线性优化方法<sup>[4,21,28~30]</sup>。其中文献[4,21]是利用测量时间总是不小于视距传播时间这一特性,对测量值进行不等式约束,然后解不等式约束的非线性优化问题来减少 NLOS 的影响。文献[28~30]是利用空时信道模型对测量参量进行不等式约束,从减小可行域的角度提高定位精度;第六类为视距重构与平滑处理相结合的方法<sup>[27]</sup>。利用引起附加时延服从已知分布直接重构视距参数,然后对定位结果进行平滑处理。除此以外, X M Shen 提出了一种将模糊信息处理与平滑处理相结合的定位技术<sup>[32]</sup>, R Estrada 提出了利用参数检测方法估计移动台的位置<sup>[33]</sup>, S Mangold 提出了基于隐含 Markov 模型的模式识别技术估计移动台的位置<sup>[41]</sup>及其它非线性方法<sup>[34]</sup>。虽然这些算法都是从减小非视距传播影响的角度提出的,但从算法的运算量、有效性、实时性以及精确度来看,各有特点,因此,在算法的选择上应结合实际的应用场合。另外,在进行定位算法研究的同时,对算法的性能也进行了分析<sup>[4,48~52]</sup>。一部分是用仿真或实验方法对定位性能进行定性分析,一部分是从理论角度对定位性能进行定量分析。具有代表性的文献为[4,48~50]。国内对蜂窝移动定位算法的研究起步较晚,在国内外有影响杂志上发表论文也相当有限。从事该项技术研究的有中国科技大学、清华大学、复旦大学、西安电子科技大学、电子科技大学、北京邮电大学、西南交通大学、吉林大学、华中科技大学等少数院校及华为、中兴等通信公司。

#### 4 CDMA 蜂窝网定位参数估计技术

对移动台的位置进行估计,需要估计的定位参数为距离、距离差和到达角。距离信息可通过对电波的场强测量<sup>[21,22,43~47]</sup>或对信号的波达时间测量<sup>[53,54,69,76]</sup>得到;距离差信息可通过测量信号的波达时间,然后相减得到,或直接测量时间差<sup>[60,61,69,75]</sup>得到;到达角主要通过对基站的阵列天线接收信号处理得到。考虑到 CDMA 蜂窝系统是一个功能受限系统<sup>[4,81]</sup>,它采用了功率控制技术,使到达基站的所有用户的信号强度基本一致,另外,信道的衰落和非视距效应使得通过对信号功率测量来估计基站与移动台间的距离变得相当不精确。因此,在 CDMA 系统中,距离信息主要通过测量信号的波达时间得到。考虑到距离与时间的线性关系,在 CDMA 系统中实现对移动台的定位,测量(或估计)的参数为波达时间(TOA)、波达时间差(TDOA)和到达角(DOA, AOA)。

波达时间的传统扩频测量方法有两种<sup>[53~58,61,69]</sup>:一种是采用滑动相关或匹配滤波器的粗测方法,它能将时延估计值锁定在一个码片内;另一种采用延时锁相环(DLL)的精测方法,由 DLL 维持本地码与输入 PN 序列的一致。两种方法在

CDMA 定位系统的波达时间测量中均有采用. 在有多径效应和多址干扰的环境中, 传统测量方法将产生误差<sup>[56,59]</sup>. 为了减小多径效应的影响, 在粗测中主要采用子空间方法测量波达时间<sup>[62~67]</sup>, 包括 MUSIC 方法、Root-MUSIC 方法及 TLS-ESPRIT 方法. 在精测中主要采用基于 DLL 的修正技术<sup>[54,57,58]</sup>和基于扩展卡尔曼滤波的技术<sup>[72,75]</sup>测量波达时间. 基于 DLL 的修正技术有 MEDLL (Multipath Estimating DLL) 方法、RAKE-DLL 方法及 2-mode DLL 方法. 采用扩展卡尔曼滤波技术主要用于提高跟踪环在多径下的鲁棒性; 减小多址干扰影响的有效方法是将多用户检测与参数估计联合进行研究<sup>[75]</sup>. 另外, 文献[65]针对幅度和时延缓慢变化信道, 提出了一种基于信号子空间的抗远近效应的参数估计方法, 文献[58]采用扩展子空间方法对时变的时延进行估计, 文献[72]提出了一种将 DLL 与多址干扰对消相结合的码跟踪技术.

波达时间差的直接测量一般采用相关技术来实现<sup>[53,59~61,64]</sup>. 即将一个基站接收的信号与另一个基站接收的信号进行互相关运算. 为了提高估计精度, 在互相关前先对两个接收信号进行滤波. 除了采用相关技术测量波达时间差外, 还有一些高分辨估计的方法, 包括基于相位数据的方法<sup>[73,74]</sup>、最小二乘方法<sup>[88]</sup>、最小均方方法<sup>[70]</sup>以及最大似然方法<sup>[69]</sup>.

国际电联在 2000 年 3 月的会议上指出, 要在 CDMA 系统中采用智能天线技术, 并于 2000 年 5 月确定 IMT-2000 主流无线传输技术为 CDMA 技术. 从而使得 CDMA 系统中的智能天线技术得到广泛研究. 在 CDMA 系统中采用智能天线能有效抑制多址干扰和抗远近效应, 提高系统容量、增大覆盖范围以及提高安全性<sup>[77~81]</sup>. 基站上智能天线技术的采用也为利用波达方向实现移动台定位创造了条件. 波达方向估计的最早方法为机械波束扫描方法. 由于在速度与精度上均满足不了实际需要, 便发展了波束形成技术<sup>[88~91]</sup>. 采用这种方法受瑞利限制的限制, 当干扰信号靠近期望信号的波达方向时, 波束形成主瓣指向会偏离期望信号的波达方向. 为了提高角度分辨力, 便出现了各种超分辨率方法<sup>[62,92~98,102~109]</sup>. 其中极大似然估计方法是一种性能最优的估计方法, 其缺点是运算量太大. 尽管采用交替投影技术使运算量有所减小, 但离实用仍有相当大的差距; 最大熵估计方法和线性预测方法在有噪时性能将恶化; 子空间方法是一类利用输入数据的特征结构进行波达方向估计的次最优方法. 典型算法有 MUSIC 方法、ESPRIT 方法和最小范数方法. MUSIC 方法只有在输入信号不相关及信号数小于阵元数时, 才能准确估计信号的波达方向; 最小范数方法的分辨率虽然高于 MUSIC 方法, 但稳定性较差, 且容易出现伪峰; ESPRIT 方法不需要对信号子空间或噪声子空间进行搜索, 运算量相对于 MUSIC 方法降低. 以上这些子空间方法均要求输入信号不相关或相关性很小. 为了解决输入信号相干时波达方向的估计问题, 提出了一些新的波达方向估计算法, 可归为两类<sup>[107~109]</sup>. 一类是以牺牲阵元数来换取信号的不相关, 一类是在不损失阵元数的条件下, 利用移动阵列或采用频率平滑技术对相干信号进行处理. 由于 CDMA 移动通信系统基站接收的信号数是正在通话的移动用户数乘以基站可

观测到的多径数, 远远大于基站天线的阵元数, 因此, 采用上面方法对期望信号的波达方向进行准确估计非常困难. 能适用于上述情况的波达方向估计算法报道很少<sup>[51,81,110,111]</sup>. 文献[81]提出了一种用空间特征向量对波达方向进行估计的综合方法. 文献[5,110]利用不同用户特征序列之间以及同一用户特征序列时延超过一个码片时相关性很小的特点, 提出了一种对期望用户的波达方向和多径时延联合估计的方法. 文献[5,111]提出用一种新的空时导向矢量对信号子空间或噪声子空间进行空时二维搜索, 实现对期望用户波达方向与多径时延的联合估计方法. 这些方法都具有运算量大的缺点.

## 5 展望

尽管国内外研究人员对蜂窝移动定位研究取得了一定进展, 有些网络也初步具备了定位功能, 但定位精度还不能达到 E-911 定位精度的要求, 定位算法有待于进一步研究与完善. 具体表现在以下几个方面:

(1) 非视距减轻问题仍然是一个值得研究的问题. 在蜂窝网络定位中, 非视距效应是导致定位精度下降的主要原因. 尽管研究人员对此问题进行了大量的研究工作, 并取得了丰硕成果, 但从结果来看, 离 FCC99-245 的要求还有很大差距, 因此, 寻找出一种最优算法或将几种算法综合或借助于 GPS 等手段来减小非视距的影响, 满足 FCC99-245 的要求, 仍将是今后研究的重点.

(2) 由于 CDMA 系统是一个功率受限系统, 当功率控制不理想时, 会存在远近效应; 同时, 它又是一个自干扰系统, 在估计参数时, 会受到多址干扰的影响; 另外, 受传播环境的影响, 收到的信号将是一个多径合成的信号. 在具有多径效应、多址干扰以及远近效应的环境中, 定位参数估计的准确性会受到严重影响. 如何提高在该环境下对定位参数的估计精度仍有许多工作要做.

(3) 虽然基站智能天线的采用为利用波达方向进行定位提供了条件, 但由于基站接收信号数远远大于天线的阵元数, 在这种情况下, 研究一种实用的算法来估计信号的波达方向, 也是今后需更进一步的工作.

(4) 在实验条件受限的情况下, 一种定位算法的有效性往往是通过仿真来验证. 而在仿真中信道模型起着关键性作用, 虽然存在几个适用于评估定位算法性能的模型, 但对各种情况均适用的信道模型的建立, 仍是今后值得研究的一个问题.

(5) 目前研究的定位算法主要集中在平面二维定位上, 用户高度信息的提供, 需要研究人员在今后的工作中解决.

## 参考文献:

- [1] T S Rappaport, J H Reed, B D Woerner. Position location using wireless communications on highways of the future[J]. IEEE Communications Magazine, 1996, 34(10): 33-41.
- [2] J Reed, K Krizman, B Woerner, T S Rappaport. An overview of the challenges and progress in meeting the E-911 requirement for location service[J]. IEEE Communication Magazine, 1998, 36(4): 30-37.

- [ 3 ] J Caffery, H St über. Overview of radiolocation in CDMA cellular systems [J]. IEEE Communication Magazine, 1998, 36 (4) :38 - 45.
- [ 4 ] J Caffery. Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems [M]. Boston, USA : Kluwer Academic Publishers, 1999. 50 - 111.
- [ 5 ] 田孝华. DS-CDMA 蜂窝网中无线定位与参数估计技术 [D]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2003.  
X H Tian. Study on wireless location and parameter estimation for DS-CDMA cellular radio networks [D]. Xi'an, Shaanxi: Xidian University, June, 2003. (in Chinese)
- [ 6 ] 范平志, 邓平, 刘林. 蜂窝网无线定位 [M]. 北京:电子工业出版社, 2002.
- [ 7 ] 魏光顺, 等. 无线电导航原理 [M]. 南京:东南大学出版社, 1989.
- [ 8 ] 干国强, 邱致和. 导航与定位——现代战争的北斗星 [M]. 北京:国防工业出版社, 2000.
- [ 9 ] J M Zagami, et al. Providing universal location services using a wireless E-911 location network [J]. IEEE Communication Magazine, 1998, 36 (4) :66 - 71.
- [ 10 ] D Steer, D Fauconnier. Location services architecture for future mobile networks [A]. IEEE VTC [C]. Boston: IEEE Press, 2000. 1362 - 1366.
- [ 11 ] B T Fang. Simple solutions for hyperbolic and related position fixes [J]. IEEE Trans AES, 1990, 26 (9) :748 - 753.
- [ 12 ] B Friedlander. A passive localization algorithm and its accuracy analysis [J]. IEEE Journal of Oceanic Eng, 1987, 12 (1) : 234 - 245.
- [ 13 ] H C Schan, A Z Robinson. Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences [J]. IEEE Trans ASSP, 1987, 35 (8) :1223 - 1225.
- [ 14 ] J O Smith, J S Abel. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements [J]. IEEE Trans ASSP, 1987, 35 (12) :1661 - 1669.
- [ 15 ] J O Smith, J S Abel. The spherical interpolation method of source localization [J]. IEEE Journal of Oceanic Eng, 1987, 12 (1) :246 - 252.
- [ 16 ] J S Abel. A divide and conquer approach to least-squares estimation [J]. IEEE Trans AES, 1990, 26 (3) :423 - 427.
- [ 17 ] W H Foy. Position-location solutions by Taylor-series estimation [J]. IEEE Trans AES, 1976, 12 (3) :187 - 194.
- [ 18 ] Y T Chan, K C Ho. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. IEEE Trans SP, 1994, 42 (8) :1905 - 1915.
- [ 19 ] I Ziskind, M Wax. Maximum likelihood localization of multiple source by alternating projection [J]. IEEE Trans ASSP, 1998, 36 (10) :1553 - 1560.
- [ 20 ] S K Oh, C K Un. Simple Computational methods of the AP algorithm for maximum likelihood localization of multiple sources [J]. IEEE Trans SP, 1992, 40 (11) :2848 - 2854.
- [ 21 ] J Caffery, G L St über. Subscriber location in CDMA cellular networks [J]. IEEE Trans VT, 1998, 47 (11) :406 - 416.
- [ 22 ] F Cesbron, et al. Locating GSM mobiles using antenna arrays [J]. Electron Lett, 1998, 34 (16) :1539 - 1540.
- [ 23 ] S Sakagami, et al. Vehicle Position estimates by multibeam antennas in multipath environments [J]. IEEE Trans VT, 1992, 41 (2) :63 - 67.
- [ 24 ] M P Wylie, J Holtzman. The non-line-of-sight problems in mobile location estimation [A]. Proc IEEE Int Conf Universal Personal Communications [C]. Cambridge: Piscataway Publishers, 1996. 827 - 831.
- [ 25 ] S S Wang, M Gree. Mobile location method for non-line-of-sight situation [A]. IEEE VTC [C]. Boston: IEEE Press, 2000. 608 - 612.
- [ 26 ] S S Woo, et al. The NLOS mitigation technique for position location using IS-95 CDMA networks [A]. IEEE VTC [C]. Boston: IEEE Press, 2000. 1887 - 1893.
- [ 27 ] 田孝华, 廖桂生. 一种有效减小非视距传播影响的 TOA 定位方法 [J]. 电子学报, 2003, 31 (9) :1429 - 1432.  
X H Tian, G S Liao. An effective TOA-based location method for mitigating the influence of the NLOS propagation [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31 (9) :1429 - 1432. (in Chinese)
- [ 28 ] 田孝华, 廖桂生, 吴德伟. 一种测量参数有限时的联合定位方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25 (11) :1321 - 1323.  
X H Tian, G S Liao, D W Wu. A joint location estimation method for the less parameter measurements [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25 (11) :1321 - 1323. (in Chinese)
- [ 29 ] 田孝华, 廖桂生, 赵修斌. 非视距传播环境下对移动用户定位的 AOA 方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30 (6) :775 - 779.  
X H Tian, G S Liao, X B Zhao. An AOA location method for the mobile station in NLOS propagation environment [J]. Journal of Xidian University, 2003, 30 (6) :775 - 779.
- [ 30 ] 田孝华, 廖桂生. TOA 与 AOA 定位系统的非视距减轻方法 [J]. 电子与信息学报, 2003, 25 (12) :1664 - 1668.  
X H Tian, G S Liao. A new method for mitigating the effect of NLOS propagation in the TOA and AOA hybrid location system [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2003, 25 (12) :1664 - 1668. (in Chinese)
- [ 31 ] 田孝华, 廖桂生, 王少龙. 利用 GDOP 对蜂窝移动通信系统移动台定位的方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24 (11) :104 - 107.  
X H Tian, G S Liao, S L Wang. A mobile station locating method for cellular communication system based on GDOP [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24 (11) :104

- 107. (in Chinese)
- [32] X M Shen ,et al. Mobile location estimation in cellular networks using fuzzy logic [A]. IEEE VTC [C]. Boston: IEEE Press ,2000. 2104 - 2114.
- [33] R Estrada ,et al. Cellular position location techniques a parameter detection approach [A]. IEEE VTC [C]. Houston: IEEE Press ,1999. 1166 - 1171.
- [34] N G Chernoguz. A Smoothed Newton - Gauss method with application to bearing only position location[J]. IEEE Trans SP , 1995 ,43(8) :2011 - 2013.
- [35] K Spingarh. Passive position location estimation using the extended kalman filter[J]. IEEE Trans AES ,1987 ,23(4) :558 - 567.
- [36] S Challa ,F A Furuqi. Non-linear system/ linear measurements approach to passive position location using extended kalman filtering[J]. IEEE TENCON ,Digital Signal Processing Applications ,1996 ,(2) :665 - 669.
- [37] K Becker. An efficient method of passive emitter location[J]. IEEE Trans AES ,1992 ,28(4) :1091 - 1104.
- [38] Dor R Van Rheeden and S C Gupta. A single base station position location approach for enhanced-911 [A]. IEEE VTC [C]. Ottawa: IEEE Press ,1998. 2555 - 2559.
- [39] H Song. Automatic vehicle location in cellular communications systems[J]. IEEE Trans VT ,1994 ,43(4) :902 - 908.
- [40] D Drakoulis ,et al. Improving subscriber position location using a hybrid satellite assisted and network-based technique [A]. IEEE VTC [C]. Boston: IEEE Press ,2000. 2556 - 2560.
- [41] S Mangold ,et al. Applying pattern recognition techniques based on hidden Markov models for vehicular position location in cellular networks[A]. IEEE VTC[C]. Houston: IEEE Press ,1999. 780 - 784.
- [42] J Caffery. A new approach to the geometry of TOA location [A]. IEEE VTC [C]. Boston: IEEE Press ,2000. 1943 - 1949.
- [43] M Hata ,T Nagatsu. Mobile location using signal strength measurements in a cellular system[J]. IEEE Trans VT ,1980 ,29(5) :245 - 252.
- [44] H L Song. Automatic vehicle location in cellular communications systems[J]. IEEE Trans VT ,1994 ,43(11) :902 - 908.
- [45] M Hellembrandt ,et al. Estimating position and velocity of mobile in a cellular radio network[J]. IEEE Trans VT ,1997 ,46(2) :65 - 71.
- [46] M Hellembrandt ,et al. Location tracking of mobiles in cellular radio networks [J]. IEEE Trans VT ,1999 ,48(9) :1558 - 1562.
- [47] R Yamamoto ,et al. Position location technologies using signal strength cellular systems[A]. IEEE VTC[C]. Atlantic City: IEEE Press ,2001. 2570 - 2574.
- [48] D J Torrieri. Statistical theory of passive location systems[J]. IEEE Trans AES ,1984 ,20(3) :183 - 198.
- [49] M A Spirito. On the accuracy of cellular mobile station location estimation[J]. IEEE Trans VT ,2001 ,50(3) :674 - 685.
- [50] H Koorapaty ,et al. Effect of biased measurement errors on accuracy of position location methods [A]. Global Telecommunications Conference , The Bridge to Global Integration IEEE[C]. North Carolina: IEEE Press ,1998. 1497 - 1502.
- [51] K Ho and Y Chan. Solution and performance analysis of geolocation by TDOA[J]. IEEE Trans AES ,1993 ,29(10) :1311 - 1322.
- [52] S Tekinay ,et al. Performance benchmarking for wireless location systems [J]. IEEE Communication Magazine , 1998 ,36(4) :72 - 76.
- [53] G C Carter. Time delay estimation for passive sonar signal processing[J]. IEEE Trans ASSP ,1981 ,29(6) :463 - 470.
- [54] J S Abel ,J O Smith. Source range and depth estimation from multipath range difference measurements[J]. IEEE Trans ASSP ,1989 ,37(8) :1157 - 1165.
- [55] Z Sourour ,S Gupta. Direct-sequence spread-spectrum parallel acquisition in a fading mobile channel[J]. IEEE Trans Communication ,1990 ,38(7) :992 - 999.
- [56] W Sheen ,G Stüber. Effects of multipath fading on delay-locked loops for spread spectrum operation in frequency selective fading environment [J]. IEEE Trans Communication , 1994 ,42(10) :1947 - 1956.
- [57] W Sheen and Stüber. A new tracking loop for direct sequence spread spectrum systems on frequency-selective fading channels[J]. IEEE Trans Comm ,1995 ,43(12) :3063 - 3073.
- [58] J Joutsensalo. Algorithms for delay estimation and tracking in CDMA[A]. IEEE VTC[C]. Phoenix: IEEE Press ,1997. 366 - 370.
- [59] S Hong ,et al. Performance analysis of non-coherent delay-locked loop in multiple Access interference[J]. IEICE Trans Comm ,1995 ,78(6) :935 - 941.
- [60] C H Knapp ,G C Carter. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Trans ASSP ,1976 ,24(4) :320 - 327.
- [61] C K Chan ,W H Lam. A simplified a periodic cross-correlation model for direct-sequence spread-spectrum multiple-access Communication systems [A]. IEEE International Conference on Communications[C]. Houston: IEEE Press ,1994. 1516 - 1520.
- [62] R O Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans AP ,1986 ,34(3) :276 - 280.
- [63] L Dumont ,et al. Super-resolution of multipath channels in a spread spectrum location system [J]. Electronic Lett ,1994. 1583 - 1584.
- [64] H Saarnisari. TLS-ESPRIT in a time delay estimation[A].

- Proc IEEE VTC [C]. Phoenix: IEEE Press, 1997. 1619 - 1623.
- [65] S Bensley, B Aazhang. Subspace-based channel estimation for code division multiple Access Communication systems [J]. IEEE Trans. Comm, 1996, 44(8): 1009 - 1020.
- [66] J Winter, C Wengerter. High resolution estimation of the time of arrival for GSM location [A]. IEEE VTC[C]. Boston: IEEE Press, 2000. 1343 - 1347.
- [67] J O Smith, B Friedlander. Adaptive multipath delay estimation [J]. IEEE Trans ASSP, 1985, 33(4): 812 - 822.
- [68] P C Chig, H C So. Two adaptive algorithms for multipath time delay estimation [J]. IEEE Journal Oceanic Eng, 1994, 19(3): 458 - 463.
- [69] Special issue on time delay estimation [J], IEEE Trans ASSP, 1981, 29(3): 550 - 650.
- [70] H Messer, Y B Ness. Closed-loop least mean square time-delay estimator [J]. IEEE Trans ASSP, 1987, 35(4): 413 - 424.
- [71] T Manickam, et al. Least squares algorithm for multipath time-delay estimation [J]. IEEE Trans SP, 1994, 42(11): 3229 - 3233.
- [72] A Fuxjueger, T Ilitis. Adaptive parameter estimation using parallel kalman filtering for spread spectrum code and doppler tracking [J]. IEEE Trans Comm, 1994, 42(6): 2227 - 2230.
- [73] A Piersol. Time delay estimation using phase data [J]. IEEE Trans ASSP, 1981, 29(6): 471 - 477.
- [74] K Kosbar, J Zaninovich. Periodic PN sequence delay estimation using phase spectrum data [A]. IEEE Global Telecommunications Conference [C]. Houston: IEEE Press, 1993. 1665 - 1669.
- [75] R Ilitis. Joint estimation of PN Code delay and multipath using the extended kalman filter [J]. IEEE Trans Comm, 1990, 38(10): 1677 - 1685.
- [76] M Pent, et al. Method for positioning GSM mobile stations using absolute time delay measurements [J]. Electron Lett, 1997, 33(24): 2019 - 2020.
- [77] H Krim, M Viberg. Two decades of array signal processing research [J]. IEEE SP Mag, 1996, 7(1): 67 - 94.
- [78] A F Nagaib, A Paulraj, T Kailath. Capacity improvement with base-station antenna array [J]. IEEE Trans VT, 1994, 43(3): 691 - 698.
- [79] J H Winters. Smart antenna for wireless systems [J]. IEEE Personal Communication Mag, 1998, 5(1): 23 - 27.
- [80] A J Paulraj, C B Papadias. Space-time processing for wireless communications [J]. IEEE SP Mag, 1997, 14(11): 49 - 83.
- [81] J C Liberti, T S Rappaport. Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Application [M]. New York: Prentice Hall, 1999.
- [82] J C Liberti, T S Rappaport. Analysis of CDMA cellular radio systems employing adaptive antennas in multipath environments [A]. Proc IEEE VTC [C]. Atlanta: IEEE Press, 1996. 1076 - 1080.
- [83] X D Wang, H V Poor. Space-time multiuser detection in multipath CDMA channels [J]. IEEE Trans SP, 1999, 47(9): 2356 - 2374.
- [84] X D Wang, et al. Blind adaptive multiuser detection in multipath CDMA channel based on subspace tracking [J]. IEEE Trans SP, 1998, 48(11): 3030 - 3044.
- [85] P Petrus, J H Reed, T S Rappaport. Geometrically based statistical channel model for macrocellular mobile environments [A]. IEEE Global Telecommunications Conference [C]. London: IEEE Press, 1996. 1197 - 1201.
- [86] R B Ertel, et al. Overview of spatial channel models for antenna array communication systems [J]. IEEE Personal Communication, 1998, 5(1): 10 - 22.
- [87] L J Greenstein, et al. A new path gain/ delay spread propagation model for digital cellular channel [J]. IEEE Trans VT, 1997, 46(2): 477 - 484.
- [88] J Sheinvald. On blind beamforming for multiple non-Gaussian signal and the constant modulus algorithm [J]. IEEE Trans SP, 1998, 46(6): 1878 - 1885.
- [89] A L Swindlehurst, et al. Analysis of a decision directed beamformer [J]. IEEE Trans SP, 1995, 43(12): 2920 - 2926.
- [90] Q Wu, K M Wong. Blind adaptive beamforming for cyclostationary signals [J]. IEEE Trans SP, 1996, 44(11): 2757 - 2767.
- [91] K L Bell, et al. A Bayesian approach to robust adaptive beamforming [J]. IEEE Trans SP, 2000, 48(2): 386 - 398.
- [92] R L Johnson. Eigenvector matrix partition and radio direction finding performance [J]. IEEE Trans AP, 1986, 34(8): 985 - 991.
- [93] A J Barabell. Improving the resolution performance of eigenstructure-based direction finding algorithms [A]. Proc of the Int'l Conf on ASSP-83 [C]. Boston: IEEE Press, 1983. 334 - 339.
- [94] S V Schell, et al. Cyclic MUSIC algorithms for signal selective DOA estimation [A]. Proc of the IEEE Int'l Conf on ASSP-89 [C]. Glasgow: IEEE Press, 1989. 2278 - 2281.
- [95] G Xu, T Kailath. Fast subspace decomposition [J]. IEEE Trans SP, 1994, 42(3): 539 - 550.
- [96] M Agrawal, S Prasad. Broadband DOA estimation using 'spatial-only' modeling of array data [J]. IEEE Trans SP, 2000, 48(3): 663 - 670.
- [97] A Paulraj, et al. A subspace rotation approach to signal parameter estimation [J]. Proceeding of the IEEE, 1986, 74(6): 1044 - 1045.
- [98] R Roy, T Kailath. ESPRIT: Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques [J]. IEEE Trans ASSP, 1989, 37(4): 984 - 995.

- [99] V Katkovnik, A B Gershman. A local Polynomial approximation based beamforming for source localization and tracking in nonstationary environments[J]. IEEE SP Lett, 2000, 3(1): 3 - 5.
- [100] Y S Kim, J A Cadzow. Multiple source direction finding: a signal enhancement approach[J]. Digital signal Processing, 1998, 8(1): 82 - 94.
- [101] J Li, et al. Computationally efficient angle estimation for signals with known Waveforms[J]. IEEE Trans SP, 1995, 43(9): 2154 - 2163.
- [102] M C Vanderveen, et al. Joint angle and delay estimation (JADE) for multipath signals arriving at an antenna array[J]. IEEE Comm Lett, 1997, 1(1): 12 - 14.
- [103] Y Y Wang, et al. Joint estimation of DOA and delay using TST-MUSIC in a wireless channel[J]. IEEE SP Lett, 2001, 8(2): 58 - 60.
- [104] M C Vanderveen, et al. Estimation of multipath parameters in wireless communications[J]. IEEE Trans SP, 1998, 46(3): 682 - 690.
- [105] A Van der Veen, et al. Joint angle and delay estimation using shift-invariance techniques[J]. IEEE Trans SP, 1998, 46: 405 - 418.
- [106] J Li, R T Compton. Maximum likelihood angle estimation for signals with known waveforms[J]. IEEE Trans SP, 1993, 41(9): 2850 - 2861.
- [107] S V Pillai, B H Kwon. Toward/ backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification[J]. IEEE Trans ASSP, 1989, 37(1): 8 - 15.
- [108] J Li, R T Compton. Angle-of-arrival estimation of coherent signals using an array doublet in motion[J]. IEEE Trans AES, 1994, 30(1): 126 - 133.
- [109] M D Zoltowski, et al. A vector space approach to direction finding in a coherent multipath environment[J]. IEEE Trans AP, 1986, 34(9): 1069 - 1079.
- [110] 田孝华, 廖桂生. 时变信道中 CDMA 信号波达方向和直接扩频序列盲估计[J]. 电子学报, 2002, 30(9): 1323 - 1326.
- X H Tian, G S Liao. Blind estimation of DOA and direct sequence for CDMA signals in time-varying channel[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(9): 1323 - 1326. (in Chinese)
- [111] 田孝华, 廖桂生, 王洪洋. 用一种新的空时导向矢量联合估计 CDMA 信号的波达方向与多径时延[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1876 - 1878.
- X H Tian, G S Liao, H Y Wang. Joint estimation of DOA and multipath time delay using the new space-time steering vector for CDMA system[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12): 1876 - 1878. (in Chinese)
- [112] 孙仲康, 等. 定位导航与制导[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- [113] 赵亦林. 车辆定位与导航系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [114] 王昕, 王守欣, 刘石. 一种考虑非视线传播影响的 TOA 定位算法[J]. 通信学报, 2001, 22(3): 1 - 8.
- X Wang, Z X Wang, S Liu. A TOA - based location algorithm reducing the errors due to non-line-of-sight propagation[J]. Journal of China Institute of Communications, 2001, 22(3): 1 - 8. (in Chinese)
- [115] 万群, 刘申建, 彭应宁. 基于目标三线坐标校正的定位方法[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 843 - 845.
- Q Wan, S J Liu, Y N Peng. Source location method based on corrected trilinear coordinates[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(6): 843 - 845. (in Chinese)

#### 作者简介:

田孝华 男, 湖南石门人, 1965 年生, 博士, 副教授, 1989 年获空军电讯工程学院无线电导航工程专业学士学位, 1992 年获电子科技大学通信与电子系统专业硕士学位, 2003 年获西安电子科技大学信号与信息处理专业博士学位, 发表学术论文 40 余篇, 获军队科技进步一、三等奖各一次, 感兴趣的研究方向为移动通信中的定位技术、阵列信号处理及非平稳信号处理等. E-mail: xht65@sina.com.

廖桂生 广西灵川人, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 1992 年获西安电子科技大学博士学位, 1999 年 11 月至 2000 年 11 月为香港中文大学高级访问学者, 主要从事统计信号处理、子波变换和神经网络及其在雷达、通信中的应用研究.