

无线定位技术的物理基础及其关键技术分析^{*}

龙海燕¹, 张葡青²

(1. 佛山教育学院物理系, 广东 佛山 528000;

2. 暨南大学物理系, 广东 广州 510632)

摘要: 无线定位技术受到越来越多的关注, 推动了对无线定位技术的研究及测距技术的发展。研究无线定位技术的物理原理, 讨论了几种常用的无线定位方案, 移动通信信道特性与定位误差的关系以及基本的定位算法, 并较详细地研究了基于时间的两种方案 TOA 及 TDOA 的定位算法, 并指出有待进一步研究的方向。

关键词: 无线定位; 到达时间 (TOA); 到达时间差 (TDOA); 定位误差

中图分类号: TN925 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 03-0042-04

实现无线定位主要有两大类解决方案, 第一类是由移动站 (MS) 主导的定位技术。单从技术角度讲, 这种技术更容易提供比较精确的用户定位信息, 它可以利用现有的一些定位系统。但这类技术需要在移动站上增加新的硬件, 这将对移动站的尺寸和成本带来不利的影响。第二类是由基站 (BS) 主导的定位技术, 这种解决方案需要对现存的基站、交换中心做出某种程度的改进, 但它可以兼容现有的终端设备。其可选用的具体实现技术主要包括: 测量信号方向 (信号的到达角度, 简称 AOA) 的定位技术、测量信号功率的定位技术、测量信号传播时间特性 (到达时间, 简称 TOA; 到达时间差, 简称 TDOA) 的定位技术^[1]。由于第二类的解决方案能更好的利用现有的网络及其终端设备, 因而具有更广泛的应用前景, 所以本文将它作为讨论的主要内容。

1 TOA 与 TDOA 定位的物理基础

定位的基本物理原理是通过测出电波从发射机传播到多个接收机的传播时间或时间差来确定目标移动站的位置。TOA 原理是电波从发射机传播到接收机的距离与电波传播时间成正比。若电波从目标发射机到第 i 个固定位置接收机的传播时间为 T , 电波传播速度为 C , 发射机的位置坐标为 X_0, Y_0 , 接收机位置坐标为 X_i, Y_i , 则发射机必定处在以 X_i, Y_i 为圆心, 以 CT 为半径的圆上。在多个接收机上进行上述计算, 则目标发射机的二维位置坐标可由三个以上圆的相交点确定。TDOA 原理是通过

检测电波到达两个接收机的时间差, 而不是由到达的绝对时间来确定移动站的位置。发射机必定位于以两个接收机为焦点的双曲线方程上, 确定发射机的二维位置坐标需要建立两个以上双曲线方程, 两双曲线的交点即为发射机的二维位置坐标。

TOA 测量要求 MS 的发射与所有基站的接收精确同步, 并且在其发射信号中要包含发射时间标记以便接收基站信号到达时间确定信号所传播的距离。TDOA 测量的是 MS 发射的信号到达不同 BS 的传播时间差而不是确切的传播时间, 因此不需要 MS 与 BS 间的精确同步, 也不需要在其发射信号中加上发射时间标记, 即不需增加上行链路的数据量^[2]。

2 移动定位算法分析

2.1 TOA 定位算法分析

最常用的方法是最小二乘法。其算法可总结如下^[3]。

设移动站与基站处在同一个平面上 (见图 1)。设移动站的位置坐标为 (x, y) , 在 τ 时刻发射信号, N 个基站的位置坐标分别为 $(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)$, 并分别在 $\tau_1, \dots, \tau_N$ 时刻接收到移动站 MS 发来的信号。我们构造如下的函数

$$f_i(X) = c(\tau_i - \tau) - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (1)$$

这里 c 为光速, $X = (x, y, \tau)^T, i = 1, \dots, N$ 。

* 收稿日期: 2004-10-22

基金项目: 教育部高等学校专项科研基金资助项目 (20030013006)。

作者简介: 龙海燕 (1955 年生), 女, 讲师; E-mail: fslhy@sina.com

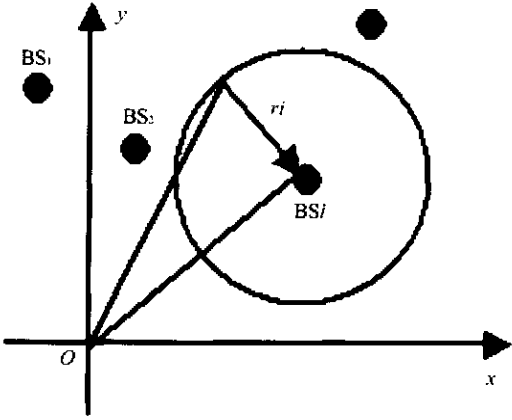


图1 基于 TOA 的定位算法示意图

Fig 1 An illustration of location arithmetic based on TOA

如果选择适当的 x, y, τ , 就可使所有的 $f_i(X) = 0$ 。实际上, 由于测量仪器不够准确、非视距信号 (NLOS)、多径传播等的影响, τ_i 往往含有较大的误差。如 NLOS 传播时, 基站接收信号的可信任程度就小。如果将式 (1) 的 $f_i(X)$ 用泰勒级数展开并线性化, 就可得到 N 个线性方程, 解线性方程组就得到未知参数 x, y, τ , 即得到移动站位置的估计值。还有其它的方法如梯度下降法等对式 (1) 作变换, 得到其它的算法^[4]。

TOA 算法要求参加定位的各个基站在时间上要严格同步, 由于电磁波的传播速率很高, 微小的误差将会在算法中放大, 使定位精度大大降低。传播中的多径干扰、NLOS 以及噪声等干扰造成的误差会使圆无法交汇, 或者交汇处不是一点而是一个区域。因此 TOA 对系统同步的要求很高, 并且需要在信号中加时间戳, 而实际参加定位的基站一般在 3 个以上, 误差是不可避免的。这时候可以利用其他补偿算法来估计位置, 提高算法的精确度, 但同时增加系统的开销和算法复杂程度, 因此单纯的 TOA 算法在实际中应用很少。

2.2 基于 TDOA 技术的定位算法

采用 TDOA 定位法对移动站进行定位时, 需采用计算复杂性低, 定位精度高, 具有高可靠性和健壮性的定位算法^[5]。

CHAN 氏算法是一种具有解析解的非递归算法。当有 4 个以上基站能进行有效 TDOA 测量时, 该算法能利用网络提供的所有 TDOA 测量值, 并取得较好的定位功能。

采用 TDOA 技术对移动站进行精确定位的前提是必须得到精确的 TDOA 测量值。获得 TDOA 测量值一般有两种方法: 通过直接计算两个基站测得的信号到达时间的差值; 采用广义互相关技术, 对两

个基站接收到的信号进行互相关运算。在取得三个以上的 TDOA 测量值, 可以建立一个双曲线方程组, 求解该方程组就能得到 MS 的估计位置。假定所有 TDOA 是参照于 BS 发射的信号, 以 $i=2, 3, \dots, M$ 。设 (x, y) 为 MS 的待估计位置, (X_i, Y_i) 为第 i 个基站发射机的已知位置, 则 MS 和第 i 个基站发射机之间的距离:

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \tag{2}$$

参照于基站 1 的距离差为

$$R_{i,1} = \Delta_{i,1} = R_i - R_1 = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \tag{3}$$

其中 C 为电波传播速度, $R_{i,1}$ 为 TDOA 测量值, 该方程组是对于 MS 位置坐标的非线性方程组, 令 $Z_a = [Z_p^T, R_1]^T$ 为未知矢量, 其中 $Z_p = [x, y]^T$, 可得到具有 TDOA 噪声的误差方程:

$$h = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - X_2^2 - Y_2^2 + X_1^2 + Y_1^2 \\ R_{3,1}^2 - X_3^2 - Y_3^2 + X_1^2 + Y_1^2 \\ \vdots \\ R_{M,1}^2 - X_M^2 - Y_M^2 + X_1^2 + Y_1^2 \end{bmatrix}$$
$$G_a = \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} & R_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} & R_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{M,1} & Y_{M,1} & R_{M,1} \end{bmatrix} \tag{4}$$

误差矢量为具有以下协方差矩阵的高斯随机矢量为

$$\Psi = E[\Psi\Psi^T] = C^2 BQB \tag{5}$$

式中 Q 为 TDOA 协方差矩阵, C 为电波传播速度, 而 B 矩阵定义为: $B = \text{diag}\{R_2^0, R_3^0, \dots, R_M^0\}$ 。

求解该非线性方程组的步骤为: 首先假定 x, y 和 R_1 之间无关, 采用第一次 WLS 计算得到初始解, 然后通过利用第一次得到的估计位置坐标及附加变量等已知的约束条件来进行第二次 WLS 估计, 便可得到改进的估计位置, 得到:

$$z_a = (G_a'^T \Psi'^{-1} G_a')^{-1} G_a'^T \Psi'^{-1} h'$$

其中, $\Psi' = h' - G_a' z_a'$

$$h' = \begin{bmatrix} (Z_{a,1} - x_1)^2 \\ (Z_{a,2} - x_2)^2 \\ \vdots \\ Z_{a,2}^2 \end{bmatrix} \quad G_a' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$
$$Z_a' = \begin{bmatrix} (x - x_1)^2 \\ (y - y_1)^2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

Ψ 的协方差矩阵为

$$\Psi' = E[\Psi'\Psi'^T] = 4B' \text{cov}(z_a) B'$$

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

最终 MS 定位计算结果为:

$$Z_p = \sqrt{Z_a} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \quad Z_p = -\sqrt{Z_a} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

以上算法假定了 TDOA 测量误差服从零均值的高斯分布, 在实际都市网络信道环境中, TDOA 误差并不能服从该种分布, CHAN 算法有一定局限性。当环境条件改善时, CHAN 氏算法的性能得到较大改善。其受小区半径大小影响程度相对要小, 更适合宏小区的定位, 仅当小区半径超过 3 000 m 时, 该算法性能才受到较大影响^[9]。

3 影响定位误差的因素及解决办法

影响无线定位算法的主要因素包括多径传播、非视距信号传播、多址接入干扰、远近效应等。下面我们提出一些解决方法。

3.1 多径传播

多径传播主要影响基于 AOA (信号的到达角度) 的定位算法和信号强度的定位算法, 导致很大的误差。当然它也影响基于时间的定位算法。纵使移动站与基站之间传播的是视距信号, 多径传播也可能影响时延估计的准确性。这是因为传统的时延估计都是通过作相关技术来实现的。假设多径传播的第 2 径信号到达的时间与第 1 径信号到达的时间的间隔在 1 个码片内, 且第 2 径信号功率大于第 1 径信号功率, 传统的时延鉴相器只能检测到第 2 径信号^[7]。目前已有几种办法可以减轻多径干扰的影响, 包括高分辨率的频率估计和最小均方估计 (DLMS), 超分辨率的 AOA 算法如 Root-MUSIC、TLS-ESPRIT、WFS 等, 基于扩展的卡尔曼滤波器 (EKF) 等。

3.2 非视距信号 (NLOS) 传播

NLOS 信号是指从发端发出的信号经过反射、衍射或散射后到达接收端, 它所经过的路径比直接到达的路径要长。NLOS 信号主要影响 TOA 或 TDOA 的估计精度, 使得基于 TOA 或 TDOA 算法的定位估计成为有偏估计。解决的办法有以下几种。

(1) 由于用 NLOS 信号的测量值得到的距离标准方差往往比 LOS 信号的大, 因此可以根据此特性将 NLOS 和 LOS 信号区分开。如果有关于 NLOS 传播的基础知识, 就可以对 NLOS 传播信号进行修正, 使之成为较正确的 LOS 传播信号。

(2) 在使用最小二乘的算法时, 可以将 NLOS 传播信号的权重值减小。

(3) 增加约束项。设移动台与基站处在同一个平面上 (见图 1)。设移动台的位置坐标为 (x, y), 在 τ 时刻发射信号, N 个基站的位置坐标分

别为 $(x_1, y_1), \dots (x_N, y_N)$, 并分别在 $\tau_1, \dots, \tau_N$ 时刻接收到移动站 MS 发来的信号^[8]。

因为 NLOS 传播引起的距离误差都是正误差。例如: 在图 1 中, 移动台真正的位置一定在 $r_i = c(\tau_i - \tau)$, $i = 1, \dots, N$ 内, 然而有时算法得到的结果却可能违背此原则。由图 1 可以看出, 当有 NLOS 传播时, 显然有

$$r_i^2 = (c(\tau_i - \tau))^2 \geq (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = K_i - 2x_ix - 2y_iy + R \quad (8)$$

因此在 TOA 或 TDOA 算法中加入松弛变量 γ_i , 不等式 (8) 就可以转化为等式

$$r_i^2 = K - 2x_ix - 2y_iy + R + \gamma_i$$

$$0 \leq \gamma_i \leq \gamma_i^2, i = 1, \dots, N \quad (9)$$

非视距传播造成定位算法性能的显著下降, 事实证明即使在无多径效应和采用高精度定位技术的情况下, NLOS 传播也会引起测量误差。因此, 如何降低 NLOS 传播的影响是提高定位精度的关键。

3.3 远近效应与多址接入的影响

对于数字蜂窝系统的用户定位, 即使有功率控制, 远近效应影响仍然存在, 从而带来较严重的多址接入干扰。为了较好地理解其中原因, 可借助图 2 加以说明。

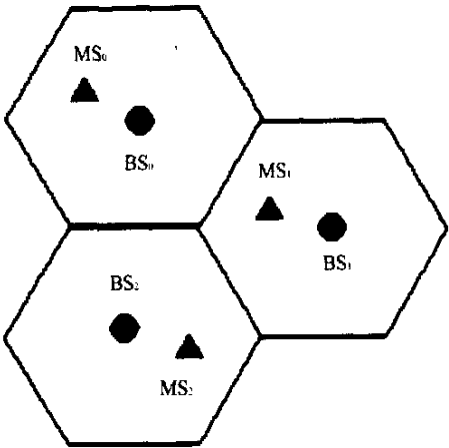


图 2 远近效应与多址接入互相影响的示意图
Fig 2 An illustration of the near-far effect and multiple access interference

移动站 MS0、MS1、MS2 各自的服务基站为 BS0、BS1、BS2, 且均进行了功率控制。由于 TOA 或 TDOA 算法要利用多基站来进行定位估计, MS0 就要接入 BS1 和 BS2, 但这 2 个基站不是 MS0 的服务基站, MS0 就它们而言没有进行功率控制。同时 MS0 又受到此两个基站本身内的移动站 MS1、MS2 的多址接入干扰。这样一来, TOA 或 TDOA 算法的

定位精度无疑会降低。解决办法，一是将移动站的发射功率调到最大（如使用 E-911 的时候），以减轻远近效应及多址接入的影响；二是进行软切换，将移动站到 1 个基站的业务平滑地过渡到另 1 个基站上。但由于基于 TOA 或 TDOA 的定位算法至少需要 3 个基站，要将 1 个基站的业务平滑地切换到另 2 个基站上，用这种方法不可能，且目前移动通信中的软切换，仅仅当移动站处于基站的边缘才会动作。目前已有一些抗远近效应的定位算法，它们是基于子空间技术的算法如 MUSIC 类算法，基于将多用户检测和干扰互抵消相结合的算法^[9]。

4 结 论

TOA 算法对系统同步的要求很高，并且需要在信号中加时间戳，而实际参加定位的基站一般在 3 个以上，误差是不可避免的。这时候可以利用 GPS 对基站进行校时并利用其他补偿算法来估计位置，提高算法的精确度，但同时增加系统的开销和算法复杂程度。TDOA 算法是对 TOA 算法的改进，是用多个基站接收到信号的时间差来确定移动台位置，与 TOA 算法相比它不需要加入专门的时间戳，定位精度也有所提高。对于蜂窝网中的移动台定位而言，TDOA 更具有实际意义。另外就是用某些组合

方法，特别是利用智能天线得到的较精确的 AOA 再结合 TOA 或 TDOA 的混合方法，能够得到较为满意的定位效果。

参考文献:

[1] PORCINO D. Standardisation of location technologies[C] . Philips Research Laboratories Mobile Location Wrokshop 2001.

[2] JAMES J. CAFFERY J. GORDON L. Overview of radiolocation in CDMA cellular systems [C] . IEEE Communications Magazine 1998; 38—45.

[3] VIBM, OTTERB, KAILT. Detection and estimation in sensor arrays using weighted subspace fitting[J] . IEEE Trans. Signal Processing, 1991, 39(11): 2436—2448.

[4] HEIKKI L. Cellular location techniques[C] . Information Technology MLW, 2001.

[5] 郑民伟, 梅滨. 全球卫星定位系统的物理基础及应用前景[J] . 现代物理知识, 2000(3): 34—38.

[6] 周来智. 导航星全球定位系统与相对论[J] . 现代物理知识, 1997(1): 43—46.

[7] 祁玉生. 现代移动通信系统[M] . 北京: 人民邮电出版社, 2000.

[8] 扬留清. 数字移动通信系统[M] . 北京: 人民邮电出版社, 1998.

[9] THEODORE S. R. 无线通信原理与应用[M] . 蔡涛译. 北京: 电子工业出版社, 1999.

The Physical Base and Analyzation of the Major
Technique in Wireless Position Location

LONG Hai yan¹, ZHANG Pu qing²

(1. Department of Physical, Foshan College of Education, Foshan 528000, China;
2. Department of Physical, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: The wireless position location (WPL) is paid more and more attention, which has promoted its investigation and the development of testing technique. Based on the principle of WPL, several common plans for wireless position location are discussed from the relationship between the character of mobile, fixed position error and fixed position algorithm. Finally, two proposals TOA and TDOA are investigated and the aspect of further study is pointed out.

Key words: wireless position location technique; time of arrival; time distance of arrival; fixed position error