

# 一种基于 RBF 神经网络辅助的直接定位新方法

王 帆 柯 炜

(南京师范大学 物理科学与技术学院, 江苏 南京 210046)

**[摘要]** 针对现有直接定位 DPD 方法在建模时忽略了基站到定位中心的信道影响问题, 提出以移动台为定位中心直接解算基站回传信号中包含的位置信息的方法. 该方法事先将整个区域划分成若干个规则小区, 在信号回传时利用 RBF 神经网络建立接收信号强度与位置之间的映射关系, 先判定移动台所处小区的标号, 然后在此小区内进行直接定位搜索, 可以大大节省搜索时间. 仿真结果表明, 该方法的定位精度优于传统 DPD 定位方法, 在低信噪比时, 改善尤其明显.

**[关键词]** 直接定位, RBF 神经网络, 接收信号强度

**[中图分类号]** TN911 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2011) 02-0079-05

## A New Method of Direct Position Determination Based on RBF Neural Network

Wang Fan, Ke Wei

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** Due to the fact that the existing method of Direct Position Determination (DPD) ignored the channel impact from base stations to the location center, this paper takes the mobile station as the location center to get the location information contained in the signal transmitted by base stations. When the signal returns, the mapping relationship between the received signal strength and the location can be built with RBF neural network. This approach recognizes the label of several regular areas divided in advance, and then conducts a DPD search in this small area in which the mobile station locates. In this way the search time can be greatly reduced. Simulation results show that the accuracy of this method is superior to the conventional DPD method, and that especially, the improvement is particularly evident in the condition of low SNR.

**Key words:** direct position determination, RBF neural network, received signal strength

随着移动通信的发展, 无线定位正日益受到人们的青睐, 计费策略、车辆管理、智能运输等都与其息息相关<sup>[1]</sup>. 传统的定位技术<sup>[2-4]</sup>有到达时间(Time of Arrival, TOA)定位、到达角度(Angle of Arrival, AOA)定位、到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)定位等. 这些方法先要估计 TOA、AOA 和 TDOA 等测量参数, 然后利用几何关系计算移动台(Mobile Station, MS)的位置, 其定位精度取决于第一步测距的精度和第二步位置解算算法的性能, 在测量 TOA 时还须保证移动台和基站的时间同步.

为克服传统定位方法的困难, 近年来 Anthony J Weiss 提出了无需测量参数估计的直接定位方法<sup>[5-6]</sup>. 直接定位是一种通过建立代价函数(cost function), 采用二维平面搜索直接解算出信号中包含的移动台位置信息的方法. 该方法避免了传统定位法两步定位的缺陷, 且不要求基站与移动台的时间同步, 但现有工作在研究时仅考虑了移动台传送信号到基站(上行链路)的信道衰减及干扰, 而忽视了由基站传送信号到定位中心(下行链路)这一过程的影响.

本文以移动台为直接定位解算装置, 无需专门定位中心, 同时考虑上行、下行链路的影响, 提出了一种基于径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络的直接定位方法. 首先改进了直接定位的数学模

收稿日期: 2011-04-14.

基金项目: 江苏省普通高校自然科学研究计划(10KJB510008).

通讯联系人: 柯 炜, 讲师, 研究方向: 通信信号处理, 无线定位等. E-mail: kewe@njnu.edu.cn

型,然后在下行链路中,提出了根据接收信号强度,利用 RBF 神经网络进行粗定位,最后进行仿真,比较本方法与常规 DPD 方法的定位性能。

## 1 直接定位模型

直接定位是一种基于最优化方法的定位方法。由于位置信息隐含在接收信号当中,不必先估计 TOA、AOA 等特征量,通过构建直接求解位置坐标的代价函数,把传统的基于几何关系的坐标解算变为最优化问题的求解,在信号级就可以直接求解位置坐标。

假设移动台位于  $p = (x, y)$ ,无线定位系统包含有  $L$  个基站,分别位于  $q_l = (x_l, y_l)$ ,  $l = 1, \dots, L$ 。根据通信理论<sup>[7]</sup>,第  $l$  个基站接收到的信号一般可以表示为:

$$r_l(t) = b_{l\_down}(b_{l\_up}a_l(p)s(t - \tau_l(p) - t_0) + n_{l\_up}(t)) + n_{l\_down}(t). \quad (1)$$

其中,每个基站均装有  $M$  阵元圆形阵列天线<sup>[8]</sup>,  $a_l(p)$  是  $l$  基站接收  $p$  位置的移动台信号的天线阵列响应。 $b_{l\_up}$ 、 $b_{l\_down}$  是上行、下行链路的信道特性; $n_{l\_up}(t)$ 、 $n_{l\_down}(t)$  是上行、下行链路的噪声干扰; $s(t - \tau_l(p) - t_0)$  表示在  $t_0$  时刻开始传输,时延为  $\tau_l(p)$  的信号。

作如下定义:

$$b_l = b_{l\_down} \cdot b_{l\_up}, \\ n_l(t) = b_{l\_down} \cdot n_{l\_up}(t) + n_{l\_down}(t). \quad (2)$$

将(2)代入(1)可得:

$$r_l(t) = b_l a_l(p) s(t - \tau_l(p) - t_0) + n_l(t). \quad (3)$$

根据文献[6]中的计算方法,对某一基站圆形阵列天线每一阵元接收到的信号均采样  $N_s$  点后,进行离散傅里叶变换得:

$$r_l(k) = b_l a_l(p) s(k) e^{-j\omega_k[\tau_l(p) + t_0]} + n_l(k), \quad 0 \leq k \leq N_s - 1, \quad \omega_k \triangleq \frac{2\pi k}{N_s T}. \quad (4)$$

在此基础上建立如下的代价函数:

$$Q(p) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=0}^{N_s-1} \|r_l(k) - b_l a_l(p) s(k) e^{-j\omega_k[\tau_l(p) + t_0]}\|^2 = \sum_{l=1}^L \|r_l - b_l(s_l \otimes a_l(p))\|^2. \quad (5)$$

其中,  $T$  为采样间隔时间;  $s(k)$ 、 $n(k)$  分别为信号和噪声的离散傅里叶变换;  $\|\cdot\|$  表示矩阵的范数,  $\otimes$  表示 Kronecker 积;  $r_l = [r_l^T(0) \ r_l^T(1) \ \dots \ r_l^T(N_s - 1)]^T$ ,  $s_l = [s(0) e^{-j\omega_0[\tau_l(p) + t_0]} \ \dots \ s(N_s - 1) e^{-j\omega_{N_s-1}[\tau_l(p) + t_0]}]^T$ 。

为确定移动台的位置,只需求出式(5)的最小值。不失一般性,假设  $\|s_l\|^2 = 1$ ,  $\|a_l(p)\|^2 = 1$ , 则  $b_l$  的最小二乘解为:

$$\hat{b}_l = [s_l \otimes a_l(p)]^H r_l, \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中化简,可转化为求下式的最大值:

$$\tilde{Q}(p) = \sum_{l=1}^L |s^H d_l|^2 = \sum_{l=1}^L s^H d_l d_l^H s = s^H \left( \sum_{l=1}^L d_l d_l^H \right) s = s^H D s, \quad (7)$$

其中  $d_l = [d_l(0) \ \dots \ d_l(N_s - 1)]^T$ ,  $d_l(k) \triangleq e^{j\omega_k \tau_l(p)} a_l^H(p) r_l(k)$ ;  $s = [s(0) e^{-j\omega_0 t_0} \ \dots \ s(N_s - 1) e^{-j\omega_{N_s-1} t_0}]^T$ 。

$s$  矩阵仅与信源信号有关,  $D$  矩阵含有位置信息。当取  $s$  为  $D$  的最大特征向量对应的特征矩阵时,式(7)可取得最大值,此时的移动台位置即为所求,即有:

$$p = \arg(\lambda_{\max}(D)). \quad (8)$$

先将  $L$  个基站所围成的闭合区域分成规则的多个小格子(如正方形),计算每个小格子中心点的  $D$  的特征值,最大特征值对应的位置即为估计出的移动台的位置。然而这样搜索要求搜索所有目标节点的可能位置,格点划分越细,定位精度越高,但计算量也越大,因此有必要发展快速求解算法。

## 2 RBF 神经网络粗定位模型

由文献[9]可知接收信号强度与位置之间存在映射关系,故可根据移动台接收到的信号强度粗估计位置,再用直接定位方法进一步确定位置,但要给出明确的函数表达式表征两者之间的映射关系是不现实的。本文利用 RBF 神经网络来构建此映射关系。RBF 神经网络是一种有效的前馈式神经网络,具有在任意

精度下逼近任意非线性函数的性能<sup>[10]</sup>,从而能有效地建立两者之间的映射关系. RBF 神经网络的粗定位模型如图 1 所示.

RBF 神经网络由输入层、隐含层、输出层组成. 输入层中 RSS- $k$  为移动台接收到  $k$  基站回传信号的强度. 本文未利用硬件设备测量实际的接收信号强度,而是根据“距离—损耗”模型<sup>[11]</sup>,估算样本点的接收信号强度. 路径损耗与距离的关系表达式为:

$$L = 10^{L_0/10} \cdot (d/d_0)^\gamma \cdot 10^{\xi/10}. \quad (9)$$

由通信理论<sup>[7]</sup>,得到接收信号强度:

$$P = P_0 \cdot L = P_0 \cdot 10^{-L_0/10} \cdot (d/d_0)^{-\gamma} \cdot 10^{-\xi/10}. \quad (10)$$

其中  $d$  是移动台和基站之间的距离;  $L_0$  (dB) 是在参考距离  $d_0$  处的信道衰减;  $\gamma$  是信道衰减因子;  $\xi$  为遮蔽因子. 符合  $N(0, \sigma^2)$  正态分布;  $P_0$  为基站发射的功率,  $P$  为移动台接收到的功率.

隐含层选取的基函数是高斯函数<sup>[12]</sup>  $R_i(x) = \exp\left[-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right]$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ . 式中  $x$  为  $n$  维输入

向量,  $c_i$  是第  $i$  个基函数的中心,  $\sigma_i$  是第  $i$  个感知的变量,  $m$  是感知单元的个数.

输出层为小区的标号,具体的计算步骤为:首先在基站所围成的闭合区域选取足够多的位置依照式 (10) 计算该处接收到的每个基站的信号强度. 这些数据进入神经网络的输入层. 输入层的神经元个数与基站个数保持一致;然后将整个区域划分为规则的数的小区,依次编号. 相应位置的小区标号作为网络的输出;最后利用上述数据训练神经网络,调整权值,使误差尽可能小. 该训练好的神经网络便可估计移动台所在小区的标号. 在此基础上,直接定位只要搜索该小区中的节点,而无须搜索其他无效小区中的节点,大大提高了定位效率.

### 3 仿真结果及分析

本文提出的 RBF 神经网络辅助 DPD 方法完善了现有 DPD 方法的数学模型,并在下行链路引入粗定位,缩小了搜索区域,为比较本定位方法与常规 DPD 方法的定位性能,进行 Monte Carlo 仿真,仿真参数如表 1 所示.

先就移动台静止的情况作比较,将移动台固定在 (467.89 m, 314.26 m) 处, SNR 从 -10 dB 变化到 10 dB,步长为 2.5 dB,比较直接 DPD 方法与 RBF 神经网络辅助 DPD 方法 100 次的均方根误差 (RMSE)<sup>[1]</sup>:

$$\text{RMSE} = \sqrt{E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2]}, \quad (11)$$

式中  $(x, y)$  为 MS 实际位置,  $(\hat{x}, \hat{y})$  为 MS 估计位置,仿真结果如图 2 所示.

图 2 中 RBF 辅助 DPD 方法定位性能优于传统 DPD 方法,尤其在低信噪比时,本文方法仍能获得很好的定位精度,均方根误差较传统 DPD 方法减小约 300 m. 由于下行链路利用 RBF 神经网络确定了移动台位于的小区标号,使误差仅局限于该小区,从而大大减小了低信噪比时的误差.

当移动台运动时比较两者在目标跟踪上的性能. 设定 SNR = 0 dB,移动台初始位置为 (-300 m, -450 m),朝与  $x$  正方向成 53°角以 5 m/s 匀速运动,仿真 200 s 运

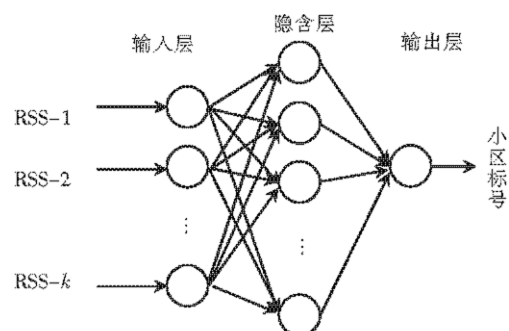


图 1 RBF 神经网络粗搜索模型

Fig.1 RBF neuron network for coarse location

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters

参数	参数值
基站位置	(-500 m, -500 m)
	(500 m, -500 m)
	(500 m, 500 m)
	(-500 m, 500 m)
圆形天线阵元数 $M$	5
信道幅度响应	(0, 0.01) 正态分布
信道相位响应	(- $\pi$ , $\pi$ ) 均匀分布
抽样点数 $N_s$	32

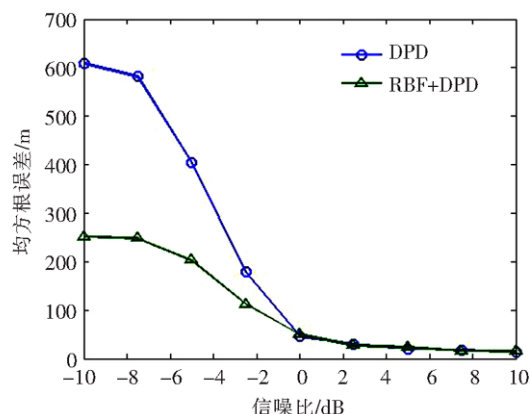


图 2 均方根误差比较

Fig.2 Comparison of RMSE

动过程. 两种方法判断出移动台的运动轨迹如图 3 所示.

图 3 中常规 DPD 方法判断出的轨迹中有少数差错较大的点, 而本文方法跟踪性能较强, 仅有一处误差较大. 在低信噪比情况下, RBF 辅助 DPD 方法在目标跟踪上显示了明显的优越性.

最后比较两种方法的统计特性. 根据联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)对定位精度的规定: 基于移动台的定位方案(可以改动移动台), 要求在 67% 的概率下定位精度不低于 50 m, 95% 的概率下定位精度不低于 150 m. 仿真比较两种定位方法的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF), 如图 4 所示. 可见, 本文方法 RMSE 低于 70 m 的概率为 95%, 满足 FCC 的要求, 而常规 DPD 方法 RMSE 低于 100 m 的概率为 95%, 可见 RBF 辅助 DPD 方法在更多点的定位性能优于常规 DPD 方法.

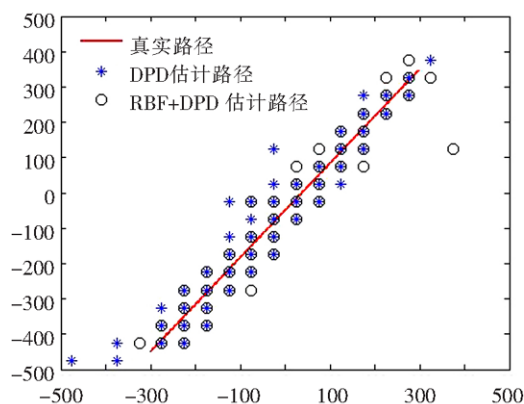


图 3 目标跟踪性能比较

Fig.3 Comparison of tracking performance

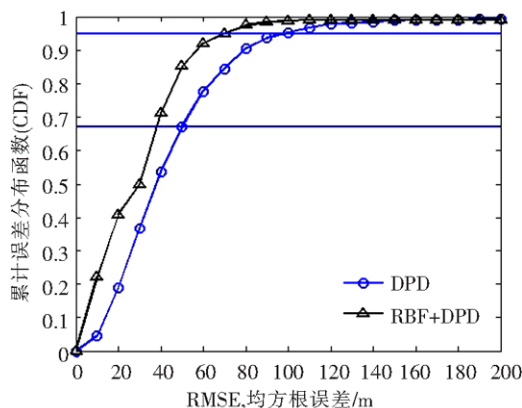


图 4 累计分布函数比较

Fig.4 Comparison of CDF

## 4 结论

本文提出了一种基于 RBF 神经网络辅助 DPD 的方法. 首先改进了现有 DPD 方法的数学模型, 增加基站到定位中心信道影响的问题, 并在此下行链路利用 RBF 神经网络构建了接收信号强度与位置的映射关系, 确定出移动台所在的小区标号, 在此小区内再进行直接定位搜索. 仿真结果表明, 本文提出的 RBF 神经网络辅助 DPD 方法定位性能优于传统 DPD 方法, 且在低信噪比时的改善效果尤为明显.

## [参考文献](References)

- [1] 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.  
Fan Zhiping, Deng Ping, Liu Lin. Cellular Wireless Location[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] Sayed Ali H, Tarighat Alireza, Khajehnouri Nima. Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 24-40.
- [3] Gezici S. A survey on wireless position estimation[J]. Wireless Personal Communications, 2008, 44(3): 263-282.
- [4] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [5] Oispuu M, Nickel U. Direct detection and position determination of multiple sources with intermittent emission[J]. Signal Processing, 2010, 90(12): 3056-3064.
- [6] Weiss A J. Direct position determination of narrowband radio frequency transmitters[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(5): 513-516.
- [7] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.  
Fan Changxin, Cao Lina. Communication Theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [8] 李莉, 肖丽华, 王华芝. 天线方向性对 MIMO 系统信道容量影响[J]. 北京邮电大学学报: 自然科学版, 2008, 31(6): 117-120.  
Li Li, Xiao Lihua, Wang Huazhi. Effect of antenna directivity on the channel capacity of MIMO systems[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2008, 31(6): 117-120. (in Chinese)

- [9] Takenga Claude ,Chen Xi ,Kyandoghere Kyamakya. A hybrid neural network-data base correlation positioning in GSM network [C]//10th IEEE Singapore International Conference on Communication systems ( ICCS 2006) . Singapore: IEEE Press 2006: 1-5.
- [10] Mao K Z ,Huang Guangbin. Neuron selection for RBF neural network classifier based on data structure preserving criterion [J]. IEEE Transactions on Neural Networks ,2005 ,16( 6) :1531-1540.
- [11] Xu Jun ,Shen Xuemin ,Mark Jon W ,et al. Mobile location estimation for DS-CDMA systems using self-organizing maps [J]. Wireless Communications and Mobile Computing ,2007 ,7: 285-298.
- [12] 闻新 ,周露 ,李翔 等. MATLAB 神经网络仿真与应用 [M]. 北京: 科学出版社 2003.  
Wen Xin ,Zhou Lu ,Li Xiang ,et al. Neural Network Simulation and Application Using MATLAB [M]. Beijing: Science Press ,2003.

[责任编辑: 严海琳]

( 上接第 72 页)

- [16] 朱志庆 ,宋义伟 ,谢家明 等. 回收利用对二甲苯制对苯二甲酸氧化残渣的方法: 中国 ,ZL200610028478. 0 [P]. 2010-09-15.  
Zhu Zhiqing ,Song Yiwei ,Xie Jiaming ,et al. Method for reclaiming oxidation sludge of terephthalic acid prepared by dimethylbenzene: China ,ZL200610028478. 0 [P]. 2010-09-15. ( in Chinese)
- [17] 陈俊 ,沈树宝 ,黄勇 等. 一种精对苯二甲酸生产废水的处理方法: 中国 ,CN101333053 [P]. 2008-12-31.  
Chen Jun ,Shen Shubao ,Huang Yong ,et al. Processing method for waste water in production process of fine terephthalic acid: China ,CN101333053 [P]. 2008-12-31. ( in Chinese)
- [18] 管国锋 ,王振新 ,李维新 等. 一种芳香羧酸生产中母固水的回收方法: 中国 ,ZL200410041380. X [P]. 2006-09-27.  
Guan Guofeng ,Wang Zhenxin ,Li Weixin ,et al. Process for recovering liquor from aromatic carboxylic acid production: China ,ZL200410041380. X [P]. 2006-09-27. ( in Chinese)
- [19] 王新 ,方向晨 ,刘忠生 等. 精对苯二甲酸生产装置废气的净化方法: 中国 ,CN101637699 [P]. 2010-02-03.  
Wang Xin ,Fang Xiangchen ,Liu Zhongsheng ,et al. Method for purifying waste gas of pure terephthalic acid producing device: China ,CN101637699 [P]. 2010-02-03. ( in Chinese)
- [20] 谢刚 ,徐海波 ,卢晓飞. 一种回收利用对苯二甲酸生产尾气中有机物的方法: 中国 ,CN101537299 [P]. 2009-09-23.  
Xie Gang ,Xu Haibo ,Lu Xiaofei. Method for recycling organic matters in tail gas from production of terephthalic acid: China ,CN101537299 [P]. 2009-09-23. ( in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]