

基于 IA-BP 神经网络的 UWB 室内定位系统*

李勇^{1,2} 柳建^{1,2}

(1.成都理工大学工程技术学院 乐山 614007; 2.核工业西南物理研究院 成都 610041)

摘要: 复杂的室内环境给定位系统带来非视距误差和多径干扰,消除或降低误差成为超宽带(UWB)室内定位研究的热点。提出一种基于 IA-BP 神经网络的 UWB 室内定位方法,将 BP 神经网络训练的误差值作为免疫算法计算亲和度的抗原,通过免疫算法寻得 BP 神经网络的最优权值和阈值,避免 BP 神经网络收敛速度较慢和容易陷入局部最优值的问题,达到定位误差较小的目的。仿真实验结果表明,IA-BP 神经网络训练 100 个样本输出的最大归一化误差不超过 0.02,以 3 个锚点构成的定位场景中,待定位节点的仿真输出轨迹与实际运动轨迹基本吻合。

关键词: 超宽带;室内定位;IA-BP 神经网络;权值和阈值;定位误差

中图分类号: TN821.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

UWB indoor localization system based on IA-BP neural network

Li Yong^{1,2} Liu Jian^{1,2}

(1. College of Engineering and Technology, Chengdu University of Technology, Leshan 614007, China;

2. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The complex indoor environment brings non-visual range error and multipath interference to the localization system, How to eliminate or reduce error becomes a hot spot in research to UWB indoor localization. A UWB indoor localization method based on IA-BP neural network is proposed, Which is that the error of training by BP neural network is as the antigen of calculating affinity to immune algorithm, the optimal weight and threshold of BP neural network are obtained through immune algorithm, so as to avoid the problem of slow convergence and getting into easily local optimal value of BP neural network, then get the minimum localization error. Simulation results show that the maximum error from training to 100 samples by IA-BP neural network was not more than 0.02, In the positioning scene composed of three anchors, the simulation output trajectory of the undetermined bit node was basically consistent with the actual motion trajectory.

Keywords: ultra-wideband (UWB); indoor localization; immune algorithm-back propagation (IA-BP) neural network; weight and threshold; localization error

0 引言

智能家居、生产车间、消防救援等方面都需要获得高精度的室内定位信息,超宽带(ultra-wideband, UWB)信号的时间分辨率很高,而且其功耗低、抗多径效果好、安全性高,故 UWB 定位技术成为室内定位的首选^[1]。复杂的室内环境存在人员、墙体以及其他障碍物,给定位系统带来非视距误差和多径干扰^[2],因此如何消除或降低误差成为 UWB 室内定位研究的热点。

目前的 UWB 室内定位技术主要是基于以下几种原理^[3]:到达角(angle of arrival, AOA),到达时间(time of

arrival, TOA),接收信号强度(receive signal strength, RSS)和到达时间差(time difference of arrival, TDOA)实现的。许多研究者在此基础上结合各种算法实现室内定位,张桢等^[4]根据到达时间差定位原理,采用卡尔曼滤波算法去除 UWB 信号的噪声误差;还有一种基于全质心与泰勒级数的混合定位算法,根据泰勒级数展开的初值进行迭代求解,进行第二次精细定位^[2]。在非视距环境下,通过粒子群算法搜寻权值和阈值的个体极值和局部极值^[5];连宗凯等^[6]先用改进的 K 均值聚类算法进行预处理,过滤掉位置偏差大的数据,再结合神经网络模型定位;阳熊^[7]使用 BP 神经网络对 TOA 及 TDOA 测量值进行修正,从而实现

精确定位。本文分析了基于 TDOA 的 BP 神经网络定位方法与缺陷,考虑到 BP 神经网络收敛速度较慢,容易陷入局部最优值的问题^[8-9],以及免疫优化算法(immune algorithm, IA)的全局最优值搜索和快速收敛的特点^[10],提出一种基于 IA 免疫算法和 BP 神经网络(IA-BP)的室内定位方法,即将 BP 神经网络训练的误差值作为免疫算法计算亲和度的抗原,通过免疫优化算法寻得 BP 神经网络的最优权值和阈值,避免 BP 神经网络收敛速度较慢和容易陷入局部最优值的问题,达到定位误差最小的目的。

1 基于 TDOA 的 BP 神经网络定位方法与缺陷

TDOA 定位原理如下:待定位目标发射的 UWB 信号到达各个锚节点的时间有差异,指定其中 1 个锚节点作为基准点,其他锚节点收到信号的时时刻减去该基准锚节点收到信号的时时刻,就获得相应的到达时间差,由此时间差可算出相应的距离差^[11-13]。根据定位目标到任意两个锚节点的距离差能建立唯一的一条双曲线,最后将建立的双曲线方程组进行求解,从而得到待定位目标的坐标位置。假设有 3 个锚节点和 1 个待定位目标,建立的双曲线方程组如式(1)、(2)所示。

$$d_{21} = d_2 - d_1 = c(t_2 - t_1) =$$

$$\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (1)$$

$$d_{31} = d_3 - d_1 = c(t_3 - t_1) =$$

$$\sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (2)$$

式中: (x_i, y_i) , $i=1, 2, 3$ 表示 3 个锚节点的坐标; (x, y) 为待定位点坐标; 锚节点 1 为基准点; $t_2 - t_1$ 与 $t_3 - t_1$ 分别是锚节点 2、3 与锚节点 1 的到达时间差(TDOA); 光速 c 乘以 TDOA 就等于定位目标分别到其中 2 个锚节点的距离之差; d_{21} 为待定位点分别到锚节点 2 和锚节点 1 的距离之差; d_{31} 为待定位点分别到锚节点 3 和锚节点 1 的距离之差。式(1)、(2)的解就是两条双曲线的交点坐标,也即是待定位点的坐标位置。虽然可以通过传统算法对上述方程组进行定位求解,但是存在定位精度不高的问题,其主要原因^[7]如下: Fang 算法不能通过增加锚节点数目来提高定位精度, Chan 算法只有在测距误差服从高斯分布的情况下才有较高的精度,而泰勒级数法要求预估的初始坐标值比较接近待定位目标的真实位置。

文献[7]提出基于 TDOA 定位原理的 BP 神经网络定位算法,主要是通过 BP 神经网络校正 TDOA 测量值,具体方法是通过仿真环境产生 TOA 测量值,再将其输入 BP 神经网络进行学习训练,训练结束以后,采用更新的神经网络纠正 TOA 测量值,根据精度较高的 TOA 测量值计算出到达时间差 TDOA 值,最后再用传统算法求解方程

组。但是 BP 神经网络存在收敛速度较慢,容易陷入局部最优值的缺点,所以本文在上述 BP 神经网络定位方法的基础上,提出一种基于 IA-BP 神经网络的定位方法,试图通过结合免疫算法解决 BP 神经网络单一定位求解的缺点。

2 IA-BP 神经网络定位方法及过程

IA-BP 神经网络定位流程如图 1 所示,其左半部分为 BP 神经网络算法流程,右半部分为 IA(免疫算法)流程。

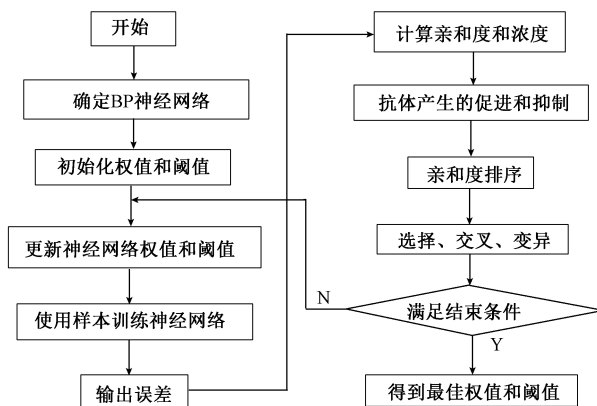


图 1 IA-BP 神经网络定位流程

对定位算法流程具体说明如下:

1) 构建 BP 神经网络模型,确定网络相关参数,其 3 层示例结构^[13-15]如图 2 所示。由于本文定位系统采用 3 个锚节点的平面布局,因此输入层由 3 个神经元构成,隐含层的神经元数目根据经验公式 $N \geq \log_2 T$ 确定,其中 N 为隐含层神经元个数; T 为输入层神经元个数,本文将隐含层神经元个数取为 8,输出层需要 3 个神经元,对应输出 3 个 TOA 值,将用于计算 TDOA 值。

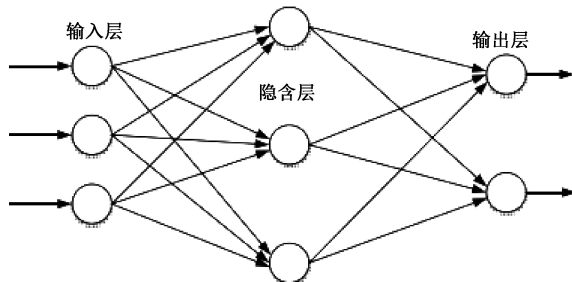


图 2 BP 神经网络示例结构

2) 在 $[-1, +1]$ 区间内随机选取数值作为 BP 神经网络的初始化权值向量 F 、 G 和阈值向量 J 、 K , 其中输入层到隐含层的权值向量 $F = \{f_{38}\}$, 隐含层到输出层的权值向量 $G = \{g_{83}\}$, 隐含层各个处理单元的阈值向量 $J = \{j_8\}$, 输出层阈值向量 $K = \{k_3\}$ 。

3) 对初始权值向量 F 、 G 和阈值向量 J 、 K 编码,其编码方式为采用随机值进行线性插值计算,初始权值和阈值

向量也即是初始抗体群。

4) 更新 BP 神经网络的权值和阈值。

5) 把归一化处理后的样本数据输入神经网络进行训练,计算输出值与期望值之间的误差,同时将误差反馈给免疫算法作为计算亲和度的抗原。

6) 免疫算法根据抗原和抗体计算相应的亲和力和抗体浓度。

7) 综合抗体、抗原亲和度和抗体浓度得到期望繁殖率,其实就是对抗体的产生进行相应促进和抑制。

8) 根据期望繁殖率对亲和度进行排序,并根据精英保留策略,记录最优抗体个体,并提取部分最优个体组成父代群体。

9) 新的父代群体按照轮盘赌选择机制执行选择、变异和交叉操作(随机概率在 0 和 1 之间),得到新的抗体(即新的权值和阈值)。

10) 判断是否满足结束条件(算法的迭代次数是否达到 100 次),若不满足,则重复执行步骤 4)~9),直至满足迭代次数并结束,从而获取 IA-BP 神经网络的最优权值和阈值。

当 IA-BP 神经网络确定了最优的权值和阈值,然后将样本数据输入神经网络学习训练,获得精度较高的 3 个 TOA 值,再计算出 TDOA 值,最后采用泰勒级数法进行定位求解,实现精度较高的定位结果。

3 仿真实验及结果

1) 仿真环境构造

在 $100\text{ m} \times 120\text{ m}$ 的二维平面区域内设置 3 个参考锚节点,其坐标分别为 $(30, 20)$, $(70, 50)$, $(90, 100)$ 。BP 神经网络训练所用的 100 个样本数据通过 UWB 信道模型仿真得到,采用 IEEE802.15.4a 工作组提出的 UWB 信道 CM4 模型^[7],待定位点发射的 UWB 信号源为 PPM-TH-UWB 调制模式,其表达式为:

$$s(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} p(t - jT_s - c_j^*T_c - a_j^*\epsilon) \quad (3)$$

式中: $T_c = 5 \times 10^{-9}$, 帧长 $T_s = 5 \times 10^{-9}$; 伪随机序列 $C = \{3, 6, 4, 5, 5, 8, 2, 7, 4, 2\}$; 信号采样频率 $f = 2 \times 10^{10}$; 功率为 -30 dBm ; $\epsilon = 0.5 \times 10^{-9}$ 。信号的传播时延通过时域表达式右移 D/Cf 个单位实现,其中 D 为 UWB 信号传播距离; C 为电磁波在空气中的传播速率; f 就是采样频率。传播过程中信号的衰减模型可以近似表示为:

$$PL(d) = PL_0 + 10n \lg(d/d_0) \quad (4)$$

其中,参考距离 d_0 取单位距离 1 m ; PL_0 表示在参考距离的路径损耗值; n 表示路径损耗因子; $PL(d)$ 就是实际距离 d 对应的路径损耗。

UWB 信号经过与信道冲击响应卷积之后再加入白噪声,最后在输出端通过相关器接收,这样 BP 神经网络就有了输入的样本数据,同时将不含误差的 TOA 真实值作为

输出期望值,最后就可以按照图 1 所示的 IA-BP 神经网络定位方法及过程进行仿真。

2) 仿真实验结果

采用 MATLAB 及神经网络、遗传算法工具箱进行仿真,通过前文叙述的仿真环境获得 100 个样本数据,归一化处理后作为 BP 神经网络的输入,TOA 输出值与期望值的误差如图 3 所示,虚线线条代表没有采用 IA-BP 神经网络算法进行优化权值和阈值,而是直接通过 BP 神经网络进行学习训练的输出误差,最大误差将近 0.2(由于样本数据在输入神经网络之前进行了归一化处理,这里的误差相当于归一化误差,下同); 实线线条代表采用了遗传算法的 IA-BP 神经网络进行学习训练的输出误差,最大误差不超过 0.02。

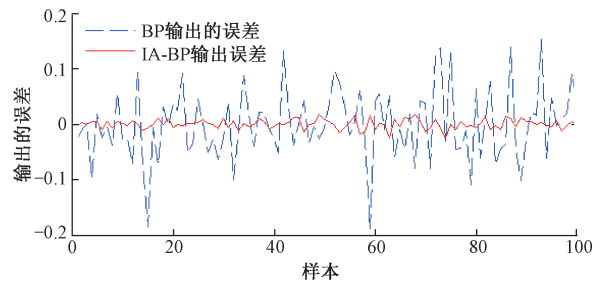


图 3 到达时间训练的误差

如图 4 所示, Node 1、2、3 是参考锚点(图例名称:锚点),其坐标分别为 $(30, 20)$, $(70, 50)$, $(90, 100)$, 待定位节点的真实运动轨迹是具备一定斜率的直线。采用 IA-BP 神经网络算法进行仿真得到 TOA 值以后,再代入双曲线方程组式(1)、(2)求解定位,其运动轨迹与实际的运动轨迹基本吻合。直接通过 BP 神经网络进行学习训练输出 TOA 值,然后进行定位求解的运动轨迹在个别位置相对于真实运动轨迹有较大误差。

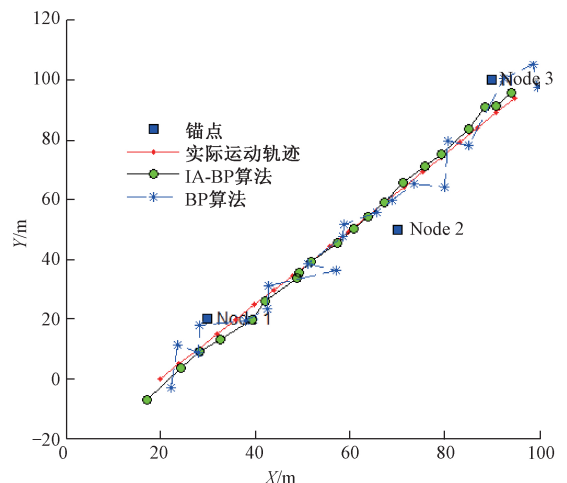


图 4 GA-BP 与 BP 算法的定位效果

在定位节点的运动过程中,选取 5 个节点坐标如表 1 所示,可以看出,在横坐标 X 相同的情况下,IA-BP 算法、

BP 算法定位的纵坐标 Y 与实际轨迹的纵坐标均有差距,但是 IA-BP 算法的定位误差值明显比 BP 算法要小。

表 1 待定位节点运动坐标

主要节点	$N1(x,y)$	$N2(x,y)$	$N3(x,y)$	$N4(x,y)$	$N5(x,y)$
实际轨迹	21.7,1.12	28.2,9.7	60.4,45.3	83.1,78.6	97.84,91.4
IA-BP 算法	21.7,0.48	28.2,8.82	60.4,45.3	83.1,80.4	97.84,91.8
BP 算法	21.7,-5.17	28.2,18.56	60.4,50.1	83.1,77.5	97.84,100

4 结 论

鉴于室内定位存在的非视距误差和多径干扰问题,本文将免疫优化算法与 BP 神经网络算法相结合,旨在利用免疫优化算法的全局最优值搜索和快速收敛的特点弥补 BP 神经网络单一求解存在的收敛速度较慢,容易陷入局部最优值的缺点,提高定位精度。仿真实验结果表明,IA-BP 神经网络训练 100 个样本输出的最大归一化误差不超过 0.02,以 3 个锚点构成的定位场景中,待定位节点的仿真输出轨迹与预设的实际运动轨迹基本吻合。对于三维运动目标的精确定位方法还需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 卞佳兴,朱荣,陈玄.基于改进双向测距—到达时间差定位算法的超宽带定位系统[J].计算机应用,2017,37(9):2496-2500,2511.
- [2] 王磊,李鹏涛,贾宗璞.基于全质心-Taylor 的 UWB 室内定位算法[J].传感器与微系统,2017,36(6):146-149.
- [3] 闫保芳,毛庆洲.一种基于卡尔曼滤波的超宽带室内定位算法[J].传感器与微系统,2017,36(10):137-140,143.
- [4] 张桀,沈重.联合 TDOA 改进算法和卡尔曼滤波的 UWB 室内定位研究[J].现代电子技术,2016,39(13):1-5.
- [5] 张然,宋来亮,冉龙俊.非视距环境下基于粒子群的超宽带定位算法[J].传感器与微系统,2017,36(9):117-120,124.
- [6] 连宗凯,袁飞,祁伟.改进 K 均值聚类 BP 神经网络超宽

- 带室内定位方法[J].现代计算机(专业版),2017(21):16-20.
- [7] 阳熊.基于超宽带的定位技术研究与应用[D].成都:电子科技大学,2015.
- [8] 赵义飞,高锦宏,刘亚平,等.基于蚁群优化神经网络的故障诊断[J].北京信息科技大学学报(自然科学版),2010,25(2):45-48.
- [9] 赵章明,冯径,施恩,等.带启发信息的蚁群神经网络训练算法[J].计算机科学,2017,44(11):284-288,296.
- [10] 冯舒怡.基于免疫算法的 TSP 问题求解[D].天津:天津大学,2016.
- [11] 李晴,何怡刚,包伟.免疫蚂蚁算法优化的 RBF 网络用于模拟电路故障诊断[J].仪器仪表学报,2010,31(6):1255-1261.
- [12] 朱永龙.基于 UWB 的室内定位算法研究与应用[D].济南:山东大学,2014.
- [13] 毛永毅,张颖.非视距传播环境下的 AOA 定位跟踪算法[J].计算机应用,2011,31(2):317-319.
- [14] 崔荣一,洪炳熔.关于三层前馈神经网络隐层构建问题的研究[J].计算机研究与发展,2004(4):524-530.
- [15] 何拥军,曾文权,曾文英.基于 BP 神经网络的多传感器数据融合技术优化[J].微型机与应用,2011,30(22):52-54,58.

作 者 简 介

李勇,硕士、副教授,主要研究方向为 RFID 射频识别技术与物联网技术。
E-mail:261789847@qq.com

柳建,博士、副教授,主要研究方向为 RFID 射频识别技术与物联网技术。