

# 基于免疫算法的 TDOA 定位技术研究

高洪元,曹硕男,缪善林

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**为了解决 TDOA 定位估计中遇到的非线性最优化问题,提出了一种联合使用 Chan 算法和免疫算法的混合定位算法.针对 TDOA 方式进行最佳坐标搜索的问题,所设计的基于浮点数编码的免疫算法利用混沌方程产生初始种群、改进了免疫算子,提高了算法的收敛速度和性能.仿真结果表明,在保证种群数量的情况下,该算法性能稳定,能找到逼近全局最优点的解,相对于 Chan 算法精度更高,相对于遗传算法在保证收敛性能的前提下有更快的收敛速度.

**关键词:**到达时间差;无线定位;免疫算法;Chan 算法;最大似然估计

**中图分类号:** TN929.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2007)01-0064-05

## Study of TDOA location technology based on immune algorithm

GAO Hong-yuan, CAO Shuo-nan, MIAO Shan-lin

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract :** In order to resolve the nonlinear optimization problem of TDOA Location, a hybrid method that employs a modified immune algorithm and a Chan algorithm is proposed. The modified immune algorithm is a consociation of genetic algorithm based on chaotic initial population and floating point code with modified immune operator that reduces the computational complexity by providing faster convergence. Simulation results show that if the population size is big enough, the algorithm is robust and can find the coordinates of near optimization. It has a higher accuracy than Chan algorithm and a faster convergence than genetic algorithm.

**Key words :** TDOA; wireless location; immune algorithm; chan algorithm; maximum likelihood estimation

TDOA 定位技术又称为双曲线相交法<sup>[1]</sup>,通过测量源信号到达多个接收机的时间差定出源信号到达多个接收机的距离差,用方程表示就是一组双曲线方程.到达时间差方法不要求移动台与基站之间严格同步,只要求基站间严格同步(这通常可以做到),因此实用性较强.但多个 TDOA 测量值构成的双曲线方程组是非线性的,求解有一定困难,针对此问题已提出很多算法<sup>[2]</sup>.但如果接收机在空间随机分布则情况较为复杂,在求解双曲线方程组时会遇到非线性问题.文献[3]给出了测量参数个数与源信号坐标个数相同时的精确解.然而,当测量参数个数有冗余时,这种方式不能充分利用多余的测量参数给出统计信息来改进定位精度.针对测量参数有冗

余的情况,文献[4-6]给出了一些闭合解,然而这些解都不是最优的.文献[7]给出了采用傅里叶级数的迭代算法,这种迭代需要一个较好的初始值,否则容易落入局部最小点,而且不能保证收敛.文献[8]提出了一种2步加权LS方法.在测量参数误差很小的情况下,性能逼近最优值,但是这种方法由于引入了测量参数的平方项,当测量误差较大时,噪声的二次项不可忽视,其性能会恶化.文献[9]采用遗传算法解极大似然函数,通过合理设置种群规模以及变异率,能找到逼近全局最优点的解,相对于其他算法精度更高,但由于计算量较大,实时实现很困难.

文中提出一种结合 Chan 算法和免疫算法的 TDOA 定位算法.该算法首先根据移动台所处小区的 ID 号和 Chan 算法确定移动台坐标范围,然后采用似然函数的倒数作为适应值,浮点数编码,用抗体

收稿日期:2006-06-20.



矢量中的各分量代表待定位坐标,在确定的坐标范围内进行搜索.实验表明,算法性能稳定,通过合理设置种群规模以及变异率,能找到逼近全局最优点的解,相对于其他算法精度更高.由于文献[8]和文献[9]提出的方法性能较前述其他方法要好,文章最后给出了提出的算法与文献[8]和文献[9]的比较结果.

1 TDOA 双曲线数学模型

为了叙述方便,考虑二维平面定位情况.所提方法可以很容易地推广到三维情况.如图 1 所示,假设  $M$  个接收机随机分布在二维平面上,  $(x, y)$  为移动台 (mobile station, MS) 的待估计位置,  $(X_i, Y_i)$  为第  $i$  个基站 (base station, BS) 的已知位置<sup>[9]</sup>. MS 到基站  $i$  的距离为  $R_i$ ,令  $R_{i,1}^0$  表示 MS 与基站  $i(i=1)$  和基站 1 (服务基站) 的实际距离差,测量值记作  $R_{i,1}$ ,则

$$R_{i,1} = cd_{i,1} = R_{i,1}^0 + cn_{i,1} = R_i - R_1 + cn_{i,1}, i = 2, \dots, M.$$

(1)

式中  $c$  为电波传播速度;  $d_{i,1}$  是 TDOA 测量值;  $n_{i,1}$  是测量 TDOA 时引入的噪声,为方便起见,可认为是独立同分布的方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声.

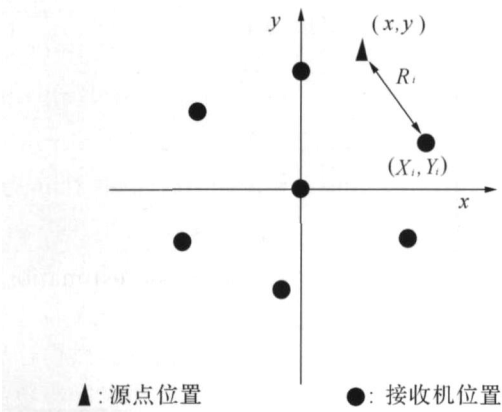


图 1 二维平面示意图  
Fig. 1 Sketch map of 2-dimension plane.

又因为

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

所以有

$$R_{i,1} = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} + cn_{i,1}, i = 2, \dots, M.$$

(2)

记  $R = [R_{2,1}, R_{3,1}, \dots, R_{M,1}]^T_{(M-1) \times 1}$ ,  $R = [R_2, R_3, \dots, R_M]^T_{(M-1) \times 1}$ ,

$$R_1 = [R_1, R_1, \dots, R_1]^T_{(M-1) \times 1},$$
$$n = [n_{2,1}, n_{3,1}, \dots, n_{M,1}]^T_{(M-1) \times 1}.$$

可得

$$R = R - R_1 + cn = \begin{bmatrix} \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \\ \sqrt{(X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(X_M - x)^2 + (Y_M - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \end{bmatrix} + cn.$$

(3)

文中考虑  $M > 3$  时的情况,采用最大似然法估计源点坐标  $(x, y)$ . 因为  $R_{i,1}$  服从均值为  $(R_i - R_1)$ , 方差为  $\sigma^2$  的高斯分布,因各测量值独立,则似然函数为

$$\prod_{i=1}^{M-1} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{(R_i - R_1 + R_1)^2}{2\sigma^2} \right) \right] = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right)^{M-1} \exp \left( -\frac{(R - R + R_1)^T (R - R + R_1)}{2\sigma^2} \right).$$

(4)

求使似然函数最大的坐标值,相当于求  $(x, y) = \arg[\min \{ (R - R + R_1)^T (R - R + R_1) \}]$ .

(5)

由于该方程是非线性函数,用解析法求解是比较困难的.针对此情况,文中采用免疫算法在整个潜在坐标解空间内进行搜索.

2 基于 Chan-IA 的 TDOA 定位技术

免疫算法是一种采用进化策略在解空间中寻找最优解的优化算法,将免疫概念及其理论应用于遗传算法,在保留原算法优良特性的前提下,力图有选择、有目的地利用待求问题中的一些特征信息或知识来抑制其优化过程中出现的退化现象<sup>[10]</sup>. 由于文中使用了先验知识获得了良好的初值及使用了接种疫苗的方法来提高算法的收敛速度,为了克服早熟收敛,制备疫苗时使用了局部极值搜索,然后采用退火机制进行免疫选择,从而达到最佳搜索速度和精度,同时还不破坏高适应度的个体.

非均匀变异算子定义为<sup>[9]</sup>

$$z^{t+1} = \begin{cases} z^t + N_{M \times M}(UB - z^t) \left( 1 - \frac{t}{T} \right)^b, & \text{随机数为 } 0, \\ z^t + N_{M \times M}(z^t - LB) \left( 1 - \frac{t}{T} \right)^b, & \text{随机数为 } 1. \end{cases}$$

(6)

式中  $z$  是抗体向量;  $t$  是迭代数;  $z^t$  是第  $t$  次迭代时的抗体向量;  $T$  是最大迭代数;  $N_{M \times M}$  是对角矩阵,其对角线元素是在  $[0, 1]$  间符合均匀分布的随机数,  $M$  是抗体向量的维数;  $UB$  是抗体体分量取值范围的



上界;  $L_B$  是抗体分量取值范围的下界;  $b$  是确定对迭代数依赖程度的系统参数.

为求解方程(5), 该算法中, 取适应度函数为

$$f(z_i) = \frac{1}{(R - R + R_i)^T (R - R + R_i) / z_i}. \quad (7)$$

抗体矢量为

$$z_i = [x_i, y_i]^T. \quad (8)$$

式中:  $x_i, y_i$  是待估计的坐标.

疫苗的制备: 为了使个体(抗体)以较大的概率位于最优点附近, 以当前代最优个体  $z_g$  为初始状态, 即  $z_g = [x_g, y_g]^T$ , 由  $z_g = [x_g, y_g]^T$  按式(9)和(10)进行局部寻优生成疫苗母本.

$$x_g^{t+1} = x_g^t (1 + \quad), \quad (9)$$

$$y_g^{t+1} = y_g^t (1 + \quad). \quad (10)$$

式中:  $\quad$  为扰动幅值参数,  $\quad$  为服从高斯分布的随机变量, 其方差随叠代次数增加而线性减少. 由最优个体及其局部变异个体分割成不同的片断, 制备疫苗.

免疫选择: 这一操作分2步完成. 第1步是免疫检测, 如果子代适应度优于父代, 说明接种成功, 如果子代适应度不如父代, 则进行第2步处理, 即对接种了疫苗的个体进行检测, 若其适应度仍不如父代, 说明在交叉、变异的过程中出现了退化现象, 这时该个体将被父代中所对应的个体根据退火机制进行选择, 使用退火机制可在一定程度上破坏局部收敛点, 使算法跳出局部收敛. 选择初始温度  $T_0$ , 设  $z_j^t$  为被接种的个体,  $\bar{z}_j^{t+1}$  为接种后的个体, 免疫选择操作后的个体为  $z_j^{t+1}$ .

$$\begin{aligned} \text{计算 } f_j &= f(\bar{z}_j^{t+1}), f_j = f(z_j^t), \quad = f_j - f_j. \\ z_j^{t+1} &= \begin{cases} \bar{z}_j^{t+1}, & \min\{1, e^{-f_j/T_t}\} > j, \\ z_j^t, & \text{其他.} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $j \in [0, 1]$  为均匀分布的随机变量.

$$T_{t+1} = T_t, 0 < \quad < 1. \quad (12)$$

则求 TDOA 定位坐标的最优估计转化为在免疫算法搜索全局最优个体. 现把用于定位的免疫算法流程简述如下:

1) 根据 Chan 算法搜索到一个局部最优解  $(x_b, y_b)$ , 蜂窝网半径为  $r$ , 确定免疫算法的搜索区间为  $[x_b - C, x_b + C]$  和  $[y_b - C, y_b + C]$ . 在文中  $C = \frac{r}{4}$ , 若搜索区间超过蜂窝半径坐标区间  $[0, r]$ , 需做钳位处理.

2) Chan 算法搜索到一个局部最优解  $(x_b, y_b)$  作为一个抗体, 其他抗体由计算量较小、使用方便的 Logistic 混沌方程(13)和(14)遍历产生.

$$x^{k+1} = \mu x^k (1 - x^k), \quad (13)$$

$$y^{k+1} = \mu y^k (1 - y^k). \quad (14)$$

式中:  $k = 1, 2, \dots$  是迭代的次数,  $\mu$  是控制系统混沌行为的参数,  $0 < x^k < 1$ , 其混沌空间为  $[0, 1]$ , 生成的混沌序列具有随机遍历的特征, 将生成的混沌序列从  $[0, 1]$  混沌空间映射为系统状态空间, 混沌序列能够保证产生的抗体集合在系统状态空间中遍历均匀分布.

3) 计算适应度, 由当前最优抗体及其局部寻优值制备疫苗放入疫苗库, 疫苗库中制备疫苗的抗体是抗体总数的 0.05.

4) 根据适应度, 使用轮盘赌选择策略进行选择.

5) 采用交叉和变异等操作.

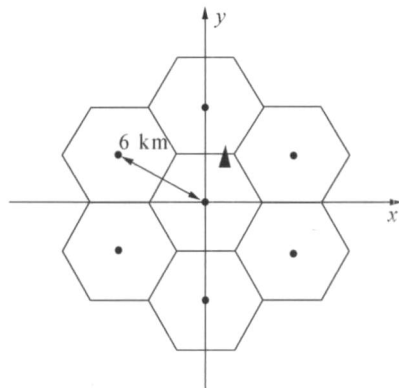
6) 疫苗接种和疫苗选择, 接种后的抗体根据退火机制进行取舍.

7) 判断算法迭代终止条件是否满足, 如果满足, 执行 8); 否则, 转向 3).

8) 输出最优抗体, 免疫算法运行结束.

### 3 实验结果与比较

仿真背景和参数如下: 考虑蜂窝网如图2所示, 蜂窝半径为 3 km, 有 5 个基站, 其位置分别为  $(0, 0)$ ,  $(3\sqrt{3}, 3)$ ,  $(3\sqrt{3}, -3)$ ,  $(0, -6)$ ,  $(-3\sqrt{3}, -3)$ ; 源点位置为  $(1, 2.5)$ ,  $c$  单位为 km.



▲: 目标位置坐标  $(1, 2.5)$

图2 接收机与目标位置示意图

Fig. 2 Sketch map of receiver position coordinary

表1中的 Chan 栏是 Chan 算法<sup>[8]</sup>的仿真结果; Chan-IA 栏是文中算法的仿真结果; GA 栏是文献[9]中改进遗传算法的仿真结果. 为了便于比较, IA 和 GA 算法选定参数如下: 种群数为 70, 杂交率  $P_c = 0.7$ , 变异率  $P_m = 0.05$ ,  $b = 6$ , 独立运算 5 000 次; GA 算法的终止迭代次数为 60, Chan-IA 算法的终止迭代次数为 15, 接种概率为 0.1. 表中第1栏



$10\lg(c)$  是根据蜂窝网通信系统与系统热噪声等因素确定的<sup>[9]</sup>. 评价指标为平均估计坐标  $MV$ , 即  $E[(x, y)]$ ; 均方误差

$MSE = E[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]$ . 仿真所得  $MV$  如表 1 所示,  $MSE$  如图 3 所示.

表 1 Chan 算法、GA 算法及文中算法			
Table 1 Performance comparison of Chan, GA and Chan-IA			
$10\lg(c)$ / dB	Chan 算法	GA 算法	文中算法
- 18	(1.000 5, 2.499 7)	(1.011 4, 2.484 5)	(1.000 5, 2.499 7)
- 16	(0.998 7, 2.499 8)	(1.007 1, 2.490 2)	(0.998 7, 2.501 4)
- 14	(1.000 4, 2.496 3)	(1.010 8, 2.486 3)	(1.000 2, 2.500 5)
- 12	(1.004 2, 2.488 7)	(1.014 9, 2.478 1)	(1.004 5, 2.492 3)
- 10	(1.003 4, 2.486 9)	(1.015 3, 2.484 3)	(1.002 4, 2.501 0)
- 8	(1.006 9, 2.447 1)	(1.013 5, 2.470 4)	(1.005 5, 2.479 4)

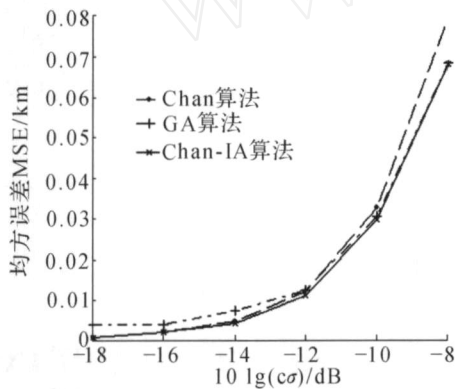


图 3 Chan、GA、Chan-IA 的性能比较曲线

Fig 3 MSE performance curves of Chan, GA and Chan-IA.

从图 3 可以看出,在噪声方差很小时,GA 容易陷入局部收敛,而当噪声方差加大时,GA、Chan-IA 的性能要比 Chan 算法好,这是因为 Chan 算法对噪声二次项的忽略导致的<sup>[8]</sup>. Chan-IA 的性能一直是最好的,计算量还不到 GA 的 1/3,因此是快速收敛算法.

从图 4 可以看出,在噪声方差较大时,Chan-IA 算法与 Chan 算法、GA 算法性能相近,但 Chan-IA 算法的性能要好于 GA 算法和 Chan 算法,是高精度收敛的算法.从图中还可以看出,Chan-IA 算法收敛速度极快,在 5 次迭代就可以超过 GA 算法在 40 次迭代的效果,且克服了遗传算法局部收敛的缺点,这是因为 Chan-IA 算法使用了较小的搜索区间,混

沌方程产生遍历初值,以及使用了疫苗接种机制.

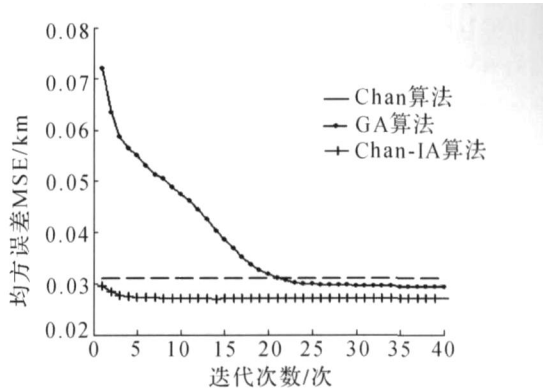


图 4 GA and Chan-IA 的收敛性能曲线

Fig 4 Convergence performance curves of GA and Chan-IA.

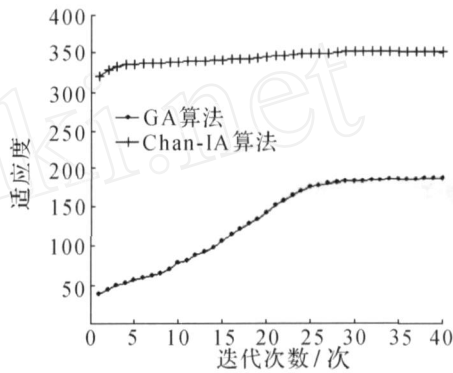


图 5 GA and Chan-IA 的收敛性能曲线

Fig 5 Convergence performance curves of GA and Chan-IA

图 5 给出了适应度函数和迭代次数的关系,从图中的曲线可以看出,GA 算法不仅有收敛速度慢的缺点,且容易陷入局部极值,但 Chan-IA 算法能克服这个缺点,快速获得近似全局最优解.

4 结束语

提出的 Chan-IA 算法在仿真中表现稳定,定位精度高,尤其是在噪声较大的情况下,与 Chan 算法相比有更高的稳定性,与改进的遗传算法(GA)相比有更快的搜索速度和更高的精度,对高精度定位技术的实用化研究有借鉴价值.进一步的工作可继续探讨在非视距误差存在的条件下,智能计算在定位技术中的应用,进一步提高算法的精度和收敛速度也是进一步努力的目标.

参考文献:

[1]FO Y W H. Position location solutions by Taylor series estimation[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1976,12(2): 187 - 194.

[2]ABEL J S, SMITH J O. Source range and depth estima-



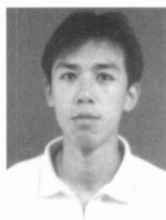
- tion from multi-path range difference measurements[J]. IEEE Trans Acoust Speech Signal Processing, 1989, 37(8): 1157 - 1165.
- [3] FANG B T. Simple solutions for hyperbolic and related position fixes [J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1990, 26(5): 748 - 753.
- [4] SCHAU H C, ROBINSON A Z. Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences[J]. IEEE Trans Acoust Speech Signal Processing, 1987, 35(8): 1223 - 1225.
- [5] SMITH J O, ABEL J S. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements[J]. IEEE Trans Acoust Speech Signal Processing, 1987, 35(12): 1223 - 1225.
- [6] ABEL J S, SMITH J O. The spherical interpolation method for closed form passive source location using range difference measurements[A]. In Proc ICASSP - 87 [C]. Dallas, TX, 1987.
- [7] ABEL J S. A divide and conquer approach to least-squares estimation[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1990, 26(2): 423 - 427.
- [8] CHAN Y T, HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905 - 1915.
- [9] 李立春, 冉崇森, 魏峰. 利用改进遗传算法解决 TDOA 定位估计中的非线性优化问题[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(8): 971 - 973.

LI Lichun, RAN Chongsen, WEI Feng. An enhanced genetic algorithm for the nonlinear optimization in TDOA-based location [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(8): 971 - 973.

- [10] 王磊, 潘进, 焦李成. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 74 - 78.

WANG Lei, PAN Jin, JIAO Licheng. Immune algorithm[J]. Chinese Journal of Electronics, 2000, 28(7): 74 - 78.

#### 作者简介:



高洪元, 男, 1977 年生, 讲师. 主要研究方向为智能计算和通信信号处理.

E-mail: gaohongyuan@hrbeu.edu.cn.



缪善林, 男, 1981 年生, 硕士研究生. 主要研究方向为宽带信号检测、处理与识别及空间谱估计.

## 第2届智能计算及其应用国际会议

## The 2nd International Symposium on Intelligence Computation and Applications

The 2nd International Symposium on Intelligence Computation and Applications (ISICA 2007) will be held on September 21 - 23, 2007 in Wuhan, China. Following the successful ISICA 2005 sponsored by the China University of Geosciences (CUG) and the China Association Aerospace, ISICA 2007 will focus on the applications of intelligent computation in earth and space sciences for analyzing and processing massive or real-time data that are beyond the scope of traditional computation. Cross-fertilization of intelligent computation, evolvable hardware and newly emerging technologies is strongly encouraged. It will feature world-renowned plenary speakers, state-of-the-art special sessions, regular technical sessions, poster interactions, and entertaining social activities.

Important Due Dates:

Paper Submission: March 31, 2007

Decision Notification: May 15, 2007

Camera-Read Submission: June 15, 2007

(Due to a clash with the IEEE SSCI 2007, ISICA 2007 scheduled on April 6 - 8, 2007 will be postponed till September 21 - 23, 2007. The new date is just before CEC 2007 that will take place on September 25 - 28, 2007 in Singapore. Considering the short distance between Singapore and Wuhan, it is quite convenient for some people to go to both events in just one trip.)

ISICA 07 covers all topics in intelligent computation, including, but not limited to:

Evolutionary computation (genetic algorithm, evolutionary strategy, evolutionary programming & genetic programming); Neural networks; Fuzzy systems; Ant colony, artificial immune & artificial life systems; Bioinformatics; Biological computing & DNA computing; Cognitive science; Data mining & knowledge discovery Feature extraction; Intelligent Control; Intelligent GIS; Learning & memory More details please see the the following web site: <http://ec.cug.edu.cn>