

基于文化鱼群算法的到达时间差定位技术

高洪元, 于雪梅, 赵忠凯

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对到达时间差(TDOA)定位估计中的非线性最优化问题, 在鱼群算法中引入文化机制设计基于实数编码的文化鱼群算法, 将 Chan 算法的解作为文化鱼群的一个个体初始位置, 并利用文化鱼群算法搜索 TDOA 定位的最优坐标。仿真结果表明, 该技术性能稳定, 在鱼群规模较小的情况下能快速鲁棒地找到逼近全局最优点的解, 并且具有较快的搜索速度和较高的搜索精度。

关键词: 到达时间差; 无线定位; 文化鱼群算法; 最大似然估计; Chan 算法

Time Difference of Arrival Location Technology Based on Cultural Fish Swarm Algorithm

GAO Hong-yuan, YU Xue-mei, ZHAO Zhong-kai

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

【Abstract】 Aiming at the nonlinear optimization problem of Time Difference of Arrival(TDOA) location, this paper proposes the Cultural Fish Swarm(CFS) algorithm of real coding which introduces cultural operator to artificial fish swarm algorithm. By adding the solution of Chan algorithm into initial population of CFS algorithm, the CFS method can search the optimal coordinates of TDOA location fast. Simulation results show that the technology has stable performance, if the population size is small, the technology is robust and can find the coordinates of optimization, and it has higher search speed and search precision.

【Key words】 Time Difference of Arrival(TDOA); wireless location; Cultural Fish Swarm(CFS) algorithm; maximum likelihood estimation; Chan algorithm

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.14.045

1 概述

到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)定位技术又称为双曲线相交法, 通过测量源信号到达多个接收机的时间差确定源信号到达多个接收机的距离差的双曲线方程, 进而确定源坐标^[1]。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, 这通常可以较容易做到, 因此具有较高实用性。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, 针对该问题已提出一些算法^[2-3]。

由于这 2 种算法在一定条件下都有局部收敛的缺点, 因此文献[4]采用遗传算法解极大似然函数, 通过严格设置种群规模以及变异率, 在较恶劣噪声环境下能找到逼近全局最优点的解, 在一定条件下相对于其他算法精度高, 但由于高精度解的求得需要较大的种群规模和迭代次数, 因此使其计算量较大、实时实现很困难。文献[5]采用 Chan 算法和文化算法结合解极大似然函数, 在一定程度上解决了计算量问题, 但在大噪声环境影响下算法性能改善不明显。

本文提出一种文化鱼群(Cultural Fish Swarm, CFS)算法, 结合 Chan 算法设计一种 TDOA 定位算法——Chan-CFS。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食物浓度方程, 用文化人工鱼个体位置代表待定坐标, 在确定的坐标区间内进行搜索。

2 TDOA 双曲线定位模型

考虑二维平面定位情况如图 1 所示, 假设 M 个接收机随机分布在二维平面上, (x, y) 为移动台的待估计位置, (X_i, Y_i)

为第 i 个基站的已知位置。移动台到基站 i 的距离为 R_i , 令 R_{i1}^0 表示移动台与基站 $i(i \neq 1)$ 和基站 1(服务基站)的实际距离差, 测量值记作 R_{i1} , 则:

$$R_{i1} = cd_{i1} = R_{i1}^0 + cn_{i1} = R_i - R_1 + cn_{i1}, \quad i = 2, 3, L, M \quad (1)$$

其中, c 为电波传播速度; d_{i1} 是 TDOA 测量值; n_{i1} 是测量 TDOA 时引入的噪声误差, 为方便起见, 可认为是独立同分布的方差为 σ^2 的高斯白噪声。

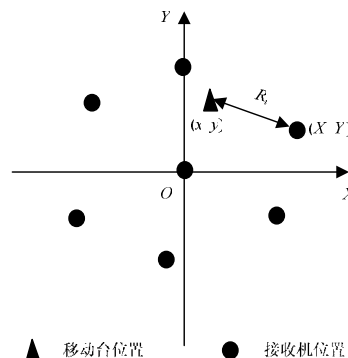


图 1 TDOA 双曲线定位模型二维平面示意图

基金项目: 黑龙江省科技攻关计划基金资助项目(GZ08A101); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(HEUCF100801)

作者简介: 高洪元(1977—), 男, 讲师、博士研究生, 主研方向: 智能计算, 无线通信系统, 空间谱估计; 于雪梅, 学士; 赵忠凯, 讲师、博士

收稿日期: 2011-02-17 **E-mail:** gaohongyuan@hrbeu.edu.cn

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

$$R_{i1} = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} + cn_{i1} \quad (2)$$

$i = 2, 3, L, M$

若设 ΔR 、 R 、 R_1 和 n 都为 $(M-1) \times 1$ 的列向量，并且可以分别记作 $\Delta R = [R_{21}, R_{31}, L, R_{M1}]^T$ 、 $R = [R_2, R_3, L, R_M]^T$ 、 $R_1 = [R_1, R_1, L, R_1]^T$ 和 $n = [n_{21}, n_{31}, L, n_{M1}]^T$ ，可以得到：

$$\Delta R = R - R_1 + cn \quad (3)$$

本文考虑 $M > 3$ 时的情况，采用最大似然法估计源点坐标 $z = (x, y)$ 。因为 R_{i1} 服从均值为 $(R_i - R_1)$ 、方差为 σ^2 的高斯分布，各测量值独立，所以求使似然函数最大的坐标值相当于求解：

$$\hat{z} = \arg \{ \min_z [(\Delta R - R + R_1)^T (\Delta R - R + R_1)] \} \quad (4)$$

3 基于 Chan-CFS 的 TDOA 定位技术

3.1 文化鱼群算法

人工鱼群算法^[6]主要使用随机扰动的方式进行试探性搜索以获得较好的位置，具有很大的随机性和任意性，算法中需要确定的参数较多，影响了算法的有效应用。因此，为了加快人工鱼群算法的收敛速度，利用鱼群优化算法的特点和文化算法相结合，使用形势知识和规范知识对人工鱼的 3 种行为进行指引，提出文化鱼群算法。

文化鱼群算法的信仰空间采用 $\langle S, N \rangle$ 结构^[7]，其中， $S = \{s^t\}$ 为形势知识， s^t 表示第 t 代群体中最优个体的位置； $N = [N_1, N_2, L, N_n]$ 为规范知识，表示变量取值区间的信息， n 为变量数； N_i 为 $[I_i, L_i, U_i]$ ， $I_i = [l_i, u_i] = \{z_i | l_i \leq z_i \leq u_i\}$ ，下限 l_i 和上限 u_i 根据问题所给定的变量 z_i 取值范围进行初始化， L_i 表示第 i 个变量的下限 l_i 所对应的评价值， U_i 表示第 i 个变量的上限 u_i 所对应的评价值。基于文化机理设计的 3 种文化人工鱼行为如下：

(1) 基于文化机制的觅食行为

信仰空间能够通过改变变量变化的步长和改变变量前进的方向影响种群空间中的变异算子。使用规范知识和文化人工鱼的当前位置调整位置变量变化步长及前进方向的影响函数如下：

$$z_{ji}^{t+1} = \begin{cases} z_{ji}^t + |N(0,1) \cdot \text{step}_i| & z_{ji}^t < l_i^t \\ z_{ji}^t - |N(0,1) \cdot \text{step}_i| & z_{ji}^t > u_i^t \\ z_{ji}^t + C_1 N(0,1) \cdot \text{size}(I_i) & l_i^t \leq z_{ji}^t \leq u_i^t \end{cases} \quad (5)$$

其中， C_1 为缩放比例因子，本文中 $C_1 = 0.06$ ； step_i 为文化人工鱼在该方向上的移动步长参数，可设置为 $\text{size}(I_i)$ 或是一个固定的常数， $\text{size}(I_i)$ 为信仰空间中第 i 个变量可调整区间的长度； $N(0,1)$ 为均值为 0 方差为 1 的高斯随机数。

使用形势知识调整位置变量变化步长及前进方向的影响函数定义如下：

$$z_{ji}^{t+1} = \begin{cases} z_{ji}^t + |N(0,1) \cdot \text{step}_i| & z_{ji}^t < s_i^t \\ z_{ji}^t - |N(0,1) \cdot \text{step}_i| & z_{ji}^t > s_i^t \\ z_{ji}^t + C_1 N(0,1) \cdot \text{size}(I_i) & z_{ji}^t = s_i^t \end{cases} \quad (6)$$

(2) 基于文化机制的聚群行为

设文化人工鱼当前状态为 z_j ，探索上一代最优个体集合（即确定接受函数的文化人工鱼个体集合），从中随机选择 n_f 个人工鱼个体，确定其中心位置 z_c ，由 $z_j - z_c$ 的差分向量和形势知识共同调整文化人工鱼向中心位置前进一步：

$$z_{ji}^{t+1} = \begin{cases} z_{ji}^t + |N(0,1) \cdot (z_{ji}^t - y_{ci}^t)| & z_{ji}^t < l_i^t \\ z_{ji}^t - |N(0,1) \cdot (z_{ji}^t - y_{ci}^t)| & z_{ji}^t > u_i^t \\ z_{ji}^t + N(0,1) \cdot (z_{ji}^t - z_{ci}^t) \cdot \text{size}(h_i) & l_i^t \leq z_{ji}^t \leq u_i^t \end{cases} \quad (7)$$

其中， $\text{size}(h_i)$ 为信仰空间中第 i 个变量可调整区间的长度与定义域区间长度的比值。

(3) 基于文化机制的追尾行为

设文化人工鱼当前状态为 z_j ，在上一代前 20% 最优人工鱼个体（即确定接受函数的个体）集合中随机选择一个人工鱼个体 z_{r1} ， r_1 与 j 不同，由 $z_j - z_{r1}$ 的差分向量和形势知识调整 z_j ，确定文化人工鱼的下一个位置向其选择的最优个体方向前进一步：

$$z_{ji}^{t+1} = \begin{cases} z_{ji}^t + |N(0,1) \cdot (z_{ji}^t - z_{r1}^t)| & z_{ji}^t < l_i^t \\ z_{ji}^t - |N(0,1) \cdot (z_{ji}^t - z_{r1}^t)| & z_{ji}^t > u_i^t \\ z_{ji}^t + N(0,1) \cdot (z_{ji}^t - z_{r1}^t) \cdot \text{size}(h_i) & l_i^t \leq z_{ji}^t \leq u_i^t \end{cases} \quad (8)$$

3.2 TDOA 定位

为求解式(4)，设定文化人工鱼的食物浓度方程为：

$$f(z) = \frac{1}{(\Delta R - R + R_1)^T (\Delta R - R + R_1)} \quad (9)$$

在确定了计算食物浓度公式后，则求 TDOA 定位系统的最优坐标转化为在文化鱼群算法中搜索全局最优人工鱼个体的位置，具体实现过程如下：

(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 ，确定文化鱼群算法的搜索区间为 $[x_b - C, x_b + C]$ 和 $[y_b - C, y_b + C]$ ， $C < r$ ，其设置与噪声环境有关。若搜索区间超过蜂窝区间，则需要做钳位处理。

(2) 初始化人工鱼群空间。Chan 算法搜索到一个局部最优解 (x_b, y_b) 作为一个文化人工鱼的位置，在待求变量定义区间内生成 $p-1$ 个实数向量，这样就产生了群体规模为 p 的鱼群位置空间。

(3) 计算文化人工鱼位置的食物浓度，对种群空间中的人工鱼进行评价。按照信仰空间的结构，生成初始信仰空间。

(4) 根据影响函数对文化鱼群空间中的每个人工鱼选择文化机制的行为操作，通过文化机制的觅食、聚群和追尾操作，调整文化人工鱼的位置。

(5) 计算新位置的食物浓度，对上一次人工鱼的位置和当前人工鱼寻找到的位置进行食物浓度评价，食物浓度提高的文化人工鱼选择新位置，食物浓度未提高的文化人工鱼判断其食物浓度高位置在所有位置食物浓度的水平，若高于前 p 个位置的食物浓度，则选择该位置，否则，转移到得分在前 p 的其他文化人工鱼所放弃的有利位置，每个位置仅能被选择接受一次。

(6) 按照设定的接受函数选择优秀文化人工鱼，利用文化算法的原理更新信仰空间^[7]，把形势知识放入公告板。

(7) 判断是否满足迭代终止条件（终止条件为最大迭代次数），若满足，则输出当代最优个体（即公告板的食物浓度最高的文化鱼）的位置。如果不满足终止条件，则返回步骤(4)，继续循环。

4 实验结果与比较

考虑六角形移动蜂窝网，仿真背景和参数如下：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 $(1.0,2.5)$ ， $c\sigma$ 单

位为 km, 是噪声影响所产生的随机距离误差。Chan 算法为文献[3]算法, GA 是文献[4]中的改进遗传算法, Chan-CA 是文献[5]所提算法, Chan-CFS 是本文所提出的算法, 实验运算 2 000 次。为了便于比较, GA、Chan-CA 和 Chan-CFS 算法群体中的个体数都设为 70。

表 1 和图 2 是多种算法的仿真性能比较。此时, 3 种优化算法的终止迭代次数都设为 50。表 1 中的 $10\lg(c\sigma)$ 是根据蜂窝网通信系统与系统热噪声等因素确定的^[4]。评价指标为坐标估计平均值为 $E[(x,y)]$; 若移动台的真实坐标为 (x_0,y_0) , 估计坐标的均方根误差定义为 $R_{\text{RMSE}} = E[\sqrt{\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2}}]$ 。仿真所得坐标估计的平均值如表 1 所示, 均方根误差见图 2。

表 1 3 种算法所得坐标估计的平均值比较

$10\lg(c\sigma)/\text{dB}$	Chan 算法	Chan-CA 算法	Chan-CFS 算法
-20	(1.000 0, 2.498 2)	(1.026 7, 2.444 6)	(0.999 8, 2.498 6)
-18	(1.000 6, 2.497 6)	(1.027 3, 2.446 2)	(1.000 3, 2.498 3)
-16	(1.001 2, 2.501 0)	(1.033 3, 2.438 3)	(1.001 0, 2.501 8)
-14	(0.999 5, 2.493 1)	(1.022 4, 2.459 3)	(0.999 1, 2.505 1)
-12	(0.998 9, 2.474 5)	(1.025 3, 2.447 1)	(0.998 9, 2.497 0)
-10	(1.003 7, 2.441 6)	(1.032 5, 2.434 5)	(1.002 9, 2.489 3)
-8	(0.981 6, 2.577 5)	(0.963 5, 2.421 7)	(0.996 2, 2.517 2)
-6	(1.004 7, 2.410 9)	(1.010 7, 2.422 8)	(1.010 7, 2.471 3)

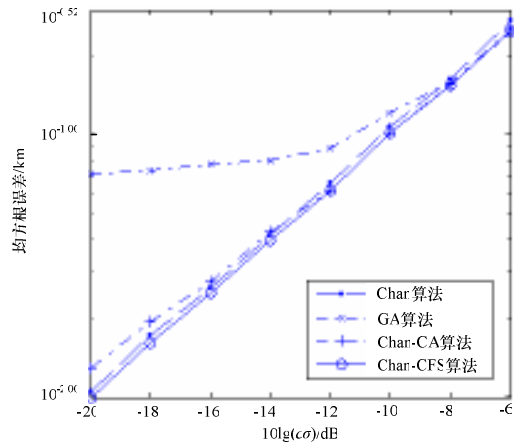


图 2 4 种算法的均方根误差比较

从图 2 可以看出, 在测量时间方差很小时, GA 容易陷入局部收敛, 在较少的计算时间内, 其精搜能力差。当噪声环境恶劣测量时间方差加大时, GA、Chan-CA、Chan-CFS 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^[3], 在 3 种智能算法中, Chan-CFS 的定位误差一直是最小的。图 3 和图 4 分别给出 $10\lg(c\sigma)$ 在取值 -12 dB 和 -8 dB 的情形下, 收敛性能曲线随迭代次数变化关系。

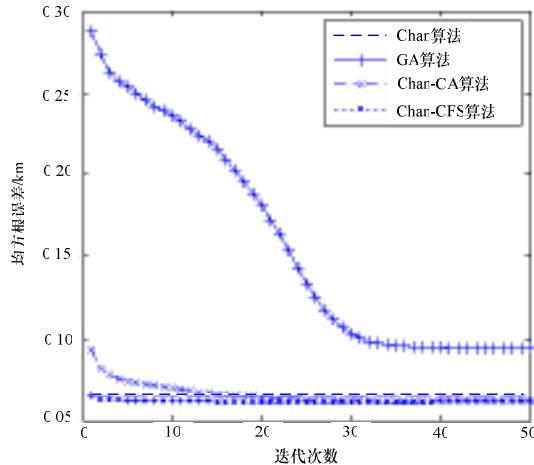


图 3 $10\lg(c\sigma) = -12\text{ dB}$ 时 4 种定位算法的收敛性能比较

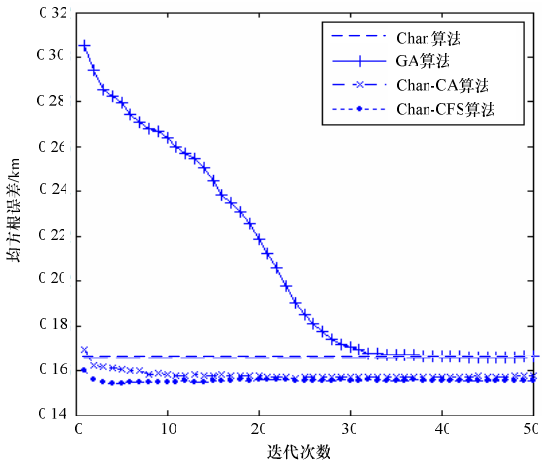


图 4 $10\lg(c\sigma) = -8\text{ dB}$ 时 4 种定位算法的收敛性能比较

从图 2 可以看出, 在噪声方差较大时, Chan-CFS 算法与 Chan 算法、GA 算法性能相近, 但 Chan-CFS 算法的性能好于 GA 算法、Chan 算法和 Chan-CA 算法, 是高精度收敛的算法。从图 3、图 4 可以看出, Chan-CFS 算法收敛速度极快, 5 次迭代可以超过 GA 算法和 Chan-CA 在 50 次迭代的结果, 且克服了遗传算法和文化算法局部收敛的缺点, 这是因为 Chan-CFS 算法使用了较小的搜索区间, 且文化鱼群算法有更多样的搜索机制, 较好避免了局部收敛。

可以看出, 由于在不同的测量误差情形下, Chan-CFS 的收敛性能一直是最好的, 其达到收敛时的计算量不到 GA 的 1/5, 因此是快速收敛的定位算法。

5 结束语

本文提出的 Chan-CFS 算法在蜂窝小区定位仿真中表现稳定、定位精度高, 尤其是在噪声影响较大的情况下, 与 Chan 算法相比有更高的稳定性, 与遗传算法和文化算法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一定参考价值。下一步工作是将文化鱼群算法扩展到无源定位技术中。

参考文献

[1] Foy 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. A Divide and Conquer Approach to Least-squares Estimation[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(2): 423-427.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 谭 枫, 杨萃元, 孙 科, 等. 基于 Chan 氏算法和文化算法的协同定位[J]. 计算机工程, 2010, 36(6): 5-7.

[6] 张梅凤, 邵 诚, 甘 勇, 等. 基于变异算子与模拟退火混合的人工鱼群优化算法[J]. 电子学报, 2006, 34(8): 1381-1385.

[7] Gao Honyuan, Zhao Zhongkai, Wang Wei. Direction Finding of Weighted Signal Subspace Fitting Based on Cultural Shuffled Frog Leaping[J]. Journal of Computational Information Systems, 2010, 6(3): 847-854.

