

## 无线传感器网络中基于 $\alpha$ -壳的射频攻击定位

章 静<sup>1\*</sup>, 许 力<sup>2</sup>, 张顺森<sup>1</sup>

(1. 福建工程学院 计算机与信息科学系, 福州 350108; 2. 福建师范大学 数学与计算机科学学院, 福州 350007)

(\* 通信作者电子邮箱 jing165455@126.com)

**摘 要:** 传感器网络的特殊性使之易受到射频干扰攻击等各种攻击, 为了下一步安全机制的实施和部署, 确定攻击者的位置, 利用 $\alpha$ -壳概念及其性质提出基于 $\alpha$ -壳的射频攻击定位算法。当 $1/\alpha$ 与最小包容圆半径相等时, 节点集合的 $\alpha$ -壳顶点可达到共圆, 进而依据 $\alpha$ -壳顶点的数目, 计算最小包容圆半径。该定位算法实现了最小包容圆半径的求解和圆心位置的确定, 从而实现对射频攻击者的定位。模拟实验表明, 与已有的增量算法相比较, 基于 $\alpha$ -壳的射频攻击定位算法定位误差小, 且随着网络节点密度等度量值的变化, 时间消耗也不会呈指数级增长, 而只呈线性的略微增长。

**关键词:** 无线传感器网络; 定位; 最小包容圆;  $\alpha$ -壳; 射频干扰攻击

**中图分类号:** TP393.081 **文献标志码:** A

### $\alpha$ -hulls based localization for Jamming attack in wireless sensor network

ZHANG Jing<sup>1\*</sup>, XU Li<sup>2</sup>, ZHANG Shun-miao<sup>1</sup>

(1. Department of Computer and Information Science, Fujian University of Technology, Fuzhou Fujian 350108, China;

2. School of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian 350007, China)

**Abstract:** The special nature of sensor network makes it vulnerable to Radio Frequency Jamming Attacks (RF JA) and other attacks. To implement and deploy the security mechanism of the next step, and determine the location of the Jamming attacker called jammer in Wireless Sensor Network (WSN),  $\alpha$ -hull was applied to calculate the Minimum Circumscribed Circle (MCC) of point set. An effective and accurate method for MCC detection was established through finding the least square circle of the point set and iteratively approaching the MCC with recursive subdivision. All vertices of the  $\alpha$ -hull will be on the same circle, if  $1/\alpha$  is equal to the radius of points' MCC. On the basis of those rules, an algorithm for detecting MCC named  $\alpha$ -MCC was developed. The simulation results show that, compared with the existing incremental algorithm,  $\alpha$ -MCC is able to achieve higher accuracy in most cases. With the network node density, time consumption of  $\alpha$ -MCC does not grow exponentially, but with only a slight linear increase.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); localization; Minimum Circumscribed Circle (MCC);  $\alpha$ -hull; Radio Frequency Jamming Attack (RF JA)

## 0 引言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 在民用、军事等领域被广泛应用, 但由于传感器节点有其特殊性, 使之易受到各种攻击。如射频干扰攻击 (Radio Frequency Jamming Attack, RF JA), 该攻击的目的是通过发出干扰射频破坏无线通信, 其实现的方式有多种, 如全频道阻塞干扰、瞄准式阻塞干扰等。全频道阻塞干扰为大功率完全覆盖干扰, 此干扰完全覆盖目标区域的整个频段, 可以高效阻塞几乎所有正常信号的传输, 但干扰效果与距离有关, 超过一定的距离效果就不好了。瞄准式干扰则只是针对某一段频带进行干扰, 攻击方需要先破解对方的通信频带, 然后发送相应的干扰信息, 而攻击方自己不会受到影响。当网络中出现 JA, 传感器性能便会明显下降, 甚至不可正常运行。为了应对此类型攻击, 传统的方法是运用复杂且高成本的物理层技术。目前, 人们已经着眼于研究如基于虫洞的反 Jamming 技术、时隙信道以及信道冲浪方法等各种防御策略。

为了下一步安全机制的实施和部署, 找到攻击者 Jammer

的位置至关重要。一旦检测到 JA, 必须尽快找到并定位攻击者。但是, 对攻击者定位并非易事。首先, 由于无线传感器网络节点本身能量受限, 可行的 Jammer 定位方法如果会带来过多的通信开销<sup>[1]</sup>则是不可行的; 其次, 如今大量的定位算法、协议需要依靠特殊设备, 故定位不易实现。寻找一种行之有效的 Jammer 定位方法势在必行。

## 1 相关工作

基于测距 (range-based) 和无需测距 (range-free) 的定位技术是目前传感器网络节点主要的定位方法。前者精度高, 但能量消耗较大, 需要额外地增加硬件开销, 对于能量有限的传感器网络不适用; 后者只需通过网络连通性、信号等信息, 不需要距离、角度等信息就能足够精确地进行定位, 在计算成本、额外开销等方面有很大优势。质心算法<sup>[2]</sup>、依据凸规划的定位算法<sup>[3]</sup>、根据距离矢量路由 (Distance Vector Routing, DV-Hop) 算法<sup>[4]</sup>、近似三角形内点测试 (Approximate Point-In-Triangulation test, APIT) 算法<sup>[5]</sup>等是目前无需测距定位算法的典型算法。

收稿日期: 2011-08-11; 修回日期: 2011-09-26。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61072080)。

作者简介: 章静 (1981-), 女, 福建建阳人, 讲师, 硕士, 主要研究方向: 网络计算、网络安全; 许力 (1970-), 男, 福建福州人, 教授, 博士, CCF 会员, 主要研究方向: 网络与信息安全、无线网络、移动通信; 张顺森 (1974-), 男, 福建福州人, 讲师, 硕士, 主要研究方向: 智能计算。

在基于质心的算法中,已知节点数量超过一个阈值  $k$  或接收一定的时间后,未知节点可以通过公式  $(x, y) = \left( \sum_{k=1}^N x_k / N, \sum_{k=1}^N y_k / N \right)$  来确定自身位置。质心算法完全依赖网络的连通性,算法简单,易实现;但节点必须假设都拥有很好的球型无线信号传播模型,这很不实际。此外,利用质心作为事实位置的精确度与已知节点的分布等有很大关系,密度大,分布均匀,定位精度才能越高,但是也更加复杂。文献[6]对质心定位算法作出了改进,依据距离权重,未知节点位置通过公式  $(x, y) = \left[ \left( \sum_{k=1}^N \varpi_k x_k \right) / \left( \sum_{k=1}^N \varpi_k \right), \left( \sum_{k=1}^N \varpi_k y_k \right) / \left( \sum_{k=1}^N \varpi_k \right) \right]$  计算得出。然而攻击者传输功率未知,故计算攻击者与干扰者距离是很困难的。虚拟力迭代定位<sup>[7]</sup>以搜寻一个干扰区域为目的,此干扰区域覆盖了所有被干扰节点,算法比传统的质心算法的精度高,但计算开销大。

本文提出一种基于  $\alpha$ -壳的最小包容圆求解算法  $\alpha$ -MCC (Algorithm for Minimum Circumscribed Circle Detection Based on  $\alpha$ -hulls) 对 Jammer 进行定位。

## 2 $\alpha$ -MCC 算法

检测 Jamming 攻击的方法<sup>[8-9]</sup>很多,本文不再赘述,而直接利用其结论映射出一个被干扰区域。当判决一个节点处于被干扰范围,它将发送信息给邻居,请它绕行,以防止信息被捕获。攻击图是由那些接收到 Jamming 信息的被干扰节点的邻居即边缘节点初始化,逐步增加被干扰节点,并由边缘节点联合最终得到。

如图1所示,网络节点被分为被干扰节点如  $\{A, B, C\}$ , 边缘节点如  $\{D, E, F, G, H\}$  和未受干扰节点如  $\{I, J, K, L, M\}$ 。

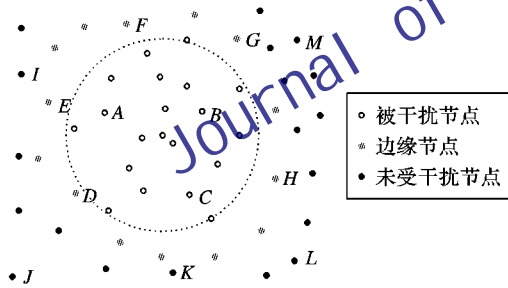


图1 攻击网络图

### 2.1 预备知识

$\alpha$ -壳<sup>[10-11]</sup>是由凸壳概念延伸而来。在定义  $\alpha$ -壳之前,先定义  $\alpha$ -盘。

**定义1** 对于任意实数  $\alpha$ :

当  $\alpha < 0$  时,  $\alpha$ -盘定义为平面内半径为  $-1/\alpha$  的圆上和圆外的区域;

当  $\alpha = 0$  时,  $\alpha$ -盘定义为一条直线一侧半平面;

当  $\alpha > 0$  时,  $\alpha$ -盘定义为平面内半径为  $1/\alpha$  的圆内区域。 $\alpha$ -壳定义如下:

**定义2** 对于实数  $\alpha$  及平面内有限点集  $P$ , 所有包容  $P$  的  $\alpha$ -盘的交集定义为点集  $P$  的  $\alpha$ -壳,  $P$  中位于  $\alpha$ -壳边界上的点称为  $\alpha$ -壳的顶点。

从定义2可知,当  $\alpha < 0$  时,所有不包含  $P$  中任意一点半径为  $-1/\alpha$  的圆盘的补集的交集为  $P$  的  $\alpha$ -壳;当  $\alpha = 0$  时,  $P$  的  $\alpha$ -壳与  $P$  的凸壳相同;当  $\alpha > 0$  时,所有包容  $P$  的半径为  $1/\alpha$  的圆盘的交集为  $P$  的  $\alpha$ -壳。上面三种情况下的  $\alpha$ -壳如图

2所示。

根据  $\alpha$ -壳的定义易得出结论如下:

1) 当  $\alpha < 0$  时,对于任意一点若属于点集  $P$ ,如果能找到一个半径为  $-1/\alpha$  且通过该点的圆使得  $P$  的所有点在圆上或在圆外,该点必定为点集  $P$  的  $\alpha$ -壳顶点;

2) 当  $\alpha > 0$  时,对于任意一点若属于点集  $P$ ,如果能找到一个半径为  $1/\alpha$  且通过该点的圆包容点集  $P$  中所有点,该点必为点集  $P$  的  $\alpha$ -壳顶点。

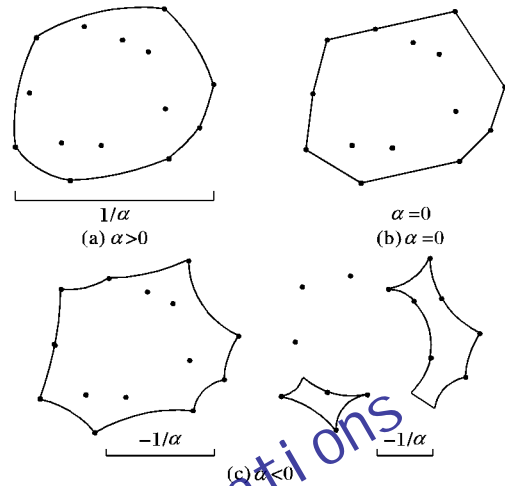


图2 不同取值情况下  $\alpha$ -壳

### 2.2 $\alpha$ -MCC 算法

利用以上  $\alpha$ -壳性质,发现当  $1/\alpha$  与最小包容圆半径相等时,节点集合的  $\alpha$ -壳顶点可达到共圆,进而依据  $\alpha$ -壳顶点的数目,计算最小包容圆半径。具体算法如下,对于被干扰网络节点集  $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ :

**步骤1** 任选不共线的3点,求它们的共圆圆心  $O$ ,求  $P$  中的点到  $O$  的最远距离  $rb$  及最近距离  $ra$ ,令  $r = rb$ 。

**步骤2** 若  $ra \geq rb$ ,那么  $ra$  即为最小包容圆的半径,计算圆心  $O$  和半径  $R$ ,返回结果;否则作点集  $P$  的  $\alpha$ -壳 ( $1/\alpha = r$ ),顶点为点集  $P_1$ 。

**步骤3** 如果点集  $P_1$  为空集,那么计算  $r = (ra + rb)/2$ ,  $ra = (ra + rb)/2$ ,返回步骤2;否则转步骤4。

**步骤4** 如果对任意  $P_1$  中的点共圆,且圆心在  $\alpha$ -壳内部,则可计算圆心  $O$  和半径  $R$ ,返回结果;若圆心不在  $\alpha$ -壳内部,则找到一个最大的钝角三角形,钝角所对应的边即为包容圆直径,计算此时的圆心  $O$  和半径  $R$ ,并返回结果。此处规定最大钝角三角形为钝角所对应的边为最大的三角形。反之,如果对任意  $P_1$  中的点不共圆,转步骤5。

**步骤5** 计算  $r = (ra + rb)/2$ ,  $rb = (ra + rb)/2$ ,  $P$  改为  $P_1$  的值,返回步骤2。

其中求解圆心、半径的主要思想是:若有两条不重合的弦在圆内,做每条弦的中垂线,两中垂线的交点就为此圆的圆心。先判断3点不共线,然后求圆心,如图3所示,圆周上的点  $\{A, B, C\}$ , 它们的坐标分别为  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ 。两条弦取  $AB, BC$ , 分别做中垂线  $L(AB), L(BC)$ , 并求出交点即圆心  $O$  的坐标  $(x, y)$ , 最后求出半径。部分代码如下:

```
a = 2 * (x2 - x1);
b = 2 * (y2 - y1);
c = x2 * x2 + y2 * y2 - x1 * x1 - y1 * y1;
d = 2 * (x3 - x2);
e = 2 * (y3 - y2);
f = x3 * x3 + y3 * y3 - x2 * x2 - y2 * y2;
x = (b * f - e * c) / (b * d - e * a);
```

$$y = (d * c - a * f) / (b * d - e * a);$$

输出圆心坐标;

$$r = \text{sqrt}((x - x_1) * (x - x_1) + (y - y_1) * (y - y_1));$$

输出半径值;

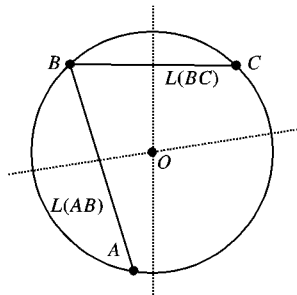


图3 利用两条弦中垂线的交点进行定位

判断一定数量的点是否共圆,只需要有过3点的圆半径与其他不同组半径不同即可认为不共圆。在实际网络环境中,4点共圆出现的情况与4点以上共圆概率几乎相同<sup>[11]</sup>,因而一般判断4点是否共圆即可。

### 3 算法分析

#### 3.1 有效性分析

$\alpha$ -MCC算法的关键是利用 $\alpha$ -壳的方法求Jammer的位置,这样将问题转化为找出一个最小包容圆,使其能覆盖所有的被干扰节点,圆心就可以作为估算的Jammer的位置。以下定理证明将计算几何中的 $\alpha$ -壳的概念应用到最小包容圆的正确性。

**定理1** 对于平面内有限点集 $P$ ,只有一个最小包容圆。

**证明** 设点集 $P$ 有两个最小包容圆,如图4中, $O_1$ 和 $O_2$ 分别是半径为 $R_1$ 和 $R_2$ 的最小包容圆 $C_1$ 和 $C_2$ 的圆心,因为都是最小,所以必有 $R_1 = R_2$ 。因为 $P \subseteq C_1, P \subseteq C_2$ ,所以 $P \subseteq (C_1 \cap C_2)$ 。两个点 $A$ 和 $B$ 为两圆交点,以 $AB$ 为直径作圆 $C_3$ ,那么 $(C_1 \cap C_2) \subset C_3$ ,故 $P \subseteq C_3$ 。计算圆 $C_3$ 的半径 $|AB|/2$ 必比圆 $C_1, C_2$ 的半径小,这与原先假设两圆 $C_1$ 和 $C_2$ 为最小包容圆相矛盾,故假设不成立。

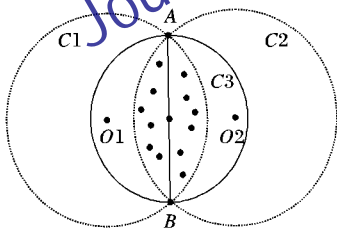


图4 最小包容圆证明

**定理2** 对于平面内有限点集 $P$ ,其最小包容圆为圆 $O$ ,半径为 $r_0$ 。 $\forall r$ 为实数,且满足 $r > r_0$ ,那么, $P$ 中位于圆 $O$ 上的点一定为 $P$ 的 $\alpha$ -壳( $1/\alpha = r$ )顶点; $\forall r$ 满足 $0 < r < r_0$ ,点集 $P$ 的 $\alpha$ -壳( $1/\alpha = r$ )不存在。

**证明** 对于 $P$ 中位于最小包容圆上的点 $p$ ,过点 $p$ 一定能作一个以 $r_0$ 为半径的圆,且此圆包容 $P$ 中任意点,因为 $r > r_0$ ,故过 $p$ 一定能作一个包容 $P$ 的任意点且半径为 $r$ 的圆。据 $\alpha$ -壳概念,点 $p$ 必为 $P$ 的 $\alpha$ -壳( $1/\alpha = r$ )顶点。另外假设点集 $P$ 的 $\alpha$ -壳( $1/\alpha = r$ )是存在的,那么至少存在一点 $p$ 为 $\alpha$ -壳顶点,据 $\alpha$ -壳概念,过点 $p$ 至少可作一个包容 $P$ 的任意点且半径为 $r$ 的圆 $C$ ,那么必有 $r \geq r_0$ ,这与已知 $0 < r < r_0$ 矛盾,故假设不成立。

**定理3** 对于平面内有限点集 $P$ ,其最小包容圆半径为 $r_0$ ,那么其 $\alpha$ -壳( $1/\alpha = r_0$ )顶点必共圆。

**证明** 对于 $P$ 的 $\alpha$ -壳( $1/\alpha = r_0$ )中任意顶点 $p$ ,至少能作一个包容 $P$ 的所有点半径为 $r_0$ 的圆 $C$ 。由定理1知圆 $C$ 就应为其最小包容圆,故点 $p$ 就在最小包容圆上。同理可证,对于任意 $P$ 的 $\alpha$ -壳( $1/\alpha = r_0$ )顶点都应在其最小包容圆上。

由以上定理推理,对于已确定的被攻击图,图中被干扰节点集的最小包容圆半径为 $r_0$ ,对 $\forall r$ 为正实数, $P$ 的 $\alpha$ -壳( $1/\alpha = r$ )的顶点数目 $n$ 与 $r$ 有关,并满足如下规律:

- 1) 当 $r < r_0$ 时, $n = 0$ ;
- 2) 当 $r = r_0$ 时, $\alpha$ -壳( $1/\alpha = r$ )的任意顶点共圆;
- 3) 当 $r > r_0$ 时, $n$ 随 $r$ 的减小而逐渐减小;
- 4) 当 $r = +\infty$ 时, $n$ 是 $P$ 凸壳的顶点数量。

从上述规律可以看出,对于平面内有限点集 $P$ 可据其 $\alpha$ -壳( $1/\alpha = r$ )顶点数判断 $r$ 与其最小包容圆半径 $r_0$ 的关系,通过不断推算 $r$ ,当 $\alpha$ -壳( $1/\alpha = r$ )的顶点都共圆时,顶点就是位于其最小包容圆上的点,进而求出最小包容圆半径。算法的正确性得以证明。

#### 3.2 性能分析

图5为使用VC模拟的一个大小为 $1000 \times 1000$ 的方形区域无线传感器网络,左上角坐标为 $(0,0)$ ,右下角坐标为 $(1000,1000)$ ,传感器节点被随机均匀分布在此区域中。假设将Jammer放在模拟区域的中心即坐标 $(500,500)$ 的位置,以375单位长度为射频干扰半径。图5中节点处在白色圆形内部区域就被认为是被干扰节点。

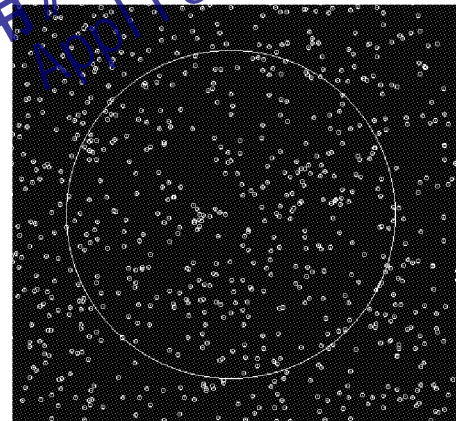


图5 仿真网络图

仿真实验对比了增量算法和本文提出的 $\alpha$ -MCC算法,表1为区域内放置1000个传感器节点后进行10次实验确定的Jammer位置。结果可以看出两种算法计算出的误差都很小,在容许范围之内。

表1 两种算法确定的Jammer位置

次数	增量算法		$\alpha$ -MCC算法	
	(X,Y)	半径	(X,Y)	半径
1	(490.6,485.1)	389.9	(481.1,493.3)	370.1
2	(489.5,487.3)	383.0	(500.5,508.8)	382.9
3	(488.1,501.1)	391.8	(499.1,503.6)	388.9
4	(500.5,489.6)	383.4	(517.5,502.9)	380.3
5	(508.2,494.3)	385.5	(496.4,493.7)	391.8
6	(499.5,497.1)	377.4	(504.6,501.2)	396.8
7	(494.0,503.1)	393.4	(501.6,487.5)	389.4
8	(492.5,497.9)	386.7	(506.0,509.9)	385.3
9	(494.9,494.5)	382.2	(496.2,488.2)	388.9
10	(496.7,503.4)	397.1	(501.2,504.7)	375.9

下面的实验将证明时间效率。同样利用增量算法和 $\alpha$ -MCC算法,将传感器节点数量从1000逐步增加至6000,图6为两



种算法的时间消耗对比。可以很明显地看出本文的  $\alpha$ -MCC 算法在时间上消耗上有明显的优势。

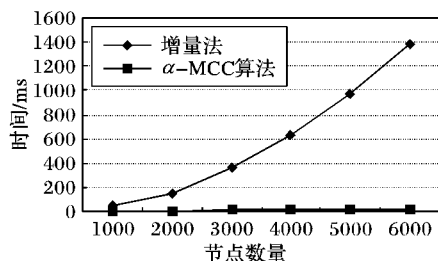


图 6 两种算法时间消耗比较

#### 4 结语

为实现射频攻击定位,本文借鉴计算几何中的  $\alpha$ -壳的概念提出了  $\alpha$ -MCC 算法。根据  $\alpha$ -壳概念及其性质,证明当  $1/\alpha$  与最小包容圆半径相等时,点集的  $\alpha$ -壳顶点共圆,以  $\alpha$ -壳顶点数目作为依据,实现了攻击者攻击半径的搜索和圆心的求解,从而实现了射频定位。模拟实验表明,该算法随着网络节点密度、攻击者攻击范围等度量值的变化而变化,且比已有算法具有更快的定位速度。

在本文网络模型中,攻击者被假设为是静止不动的,且只有一个攻击者而未考虑合谋攻击。事实上,可能会出现攻击者变换地点或多攻击者合谋的攻击方式。故如攻击者动态性增强,且拥有协作能力,将大大增加其被检测和定位的难度,这将是我们的进一步的研究工作。

#### 参考文献:

- [1] 孙言强, 王晓东, 周兴铭. 无线传感器网络中基于几何覆盖的 Jamming 攻击定位算法[J]. 通信学报, 2010, 31(11): 10-16.
- [2] BULUSU N, HEIDEMANN J, ESTRIN D. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices [J]. IEEE Wireless Communications, 2000, 7(5): 27-34.

- [3] DOHERTY L, PISTER K S J, EL GHAOU L. Convex position estimation in wireless sensor networks [C]// Proceedings of 20th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2001, 3: 1655-1663.
- [4] NICULESCU D, NATH B. DV-based positioning in Ad Hoc networks [J]. Telecommunication Systems, 2003, 22(1/4): 267-280.
- [5] HE T, HUANG C, BLUM B M, et al. Range-free localization schemes for large scale sensor networks [C]// MOBICOM'03: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2003: 81-95.
- [6] BLUMENTHAL J, GROSSMANN R, GOLATOWSKI F, et al. Weighted centroid localization in zigbee-based sensor networks [C]// WISP 2007: Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2007: 1-6.
- [7] LIU H, XU W, CHEN Y, et al. Localizing jammers in wireless networks [C]// PERCOM '09: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 401-407.
- [8] WOOD A D, STANKOVIC J A, SON S H. JAM: A jammed-area mapping service for sensor networks [C]// Proceedings of the 24th IEEE International Real-Time System Symposium. Piscataway: IEEE, 2003: 286-297.
- [9] CHEN Y, FRANCISCO J-A, TRAPPE W, et al. A practical approach to landmark deployment for indoor localization [C]// SECON 2006: Proceedings of the Third Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. Washington, DC: IEEE Communications Society, 2006: 365-373.
- [10] OLIVIER D, FRANCO P P. Culling a set of points for roundness or cylindricity evaluations [J]. International Journal of Computational Geometry, 2003, 13(2): 231-240.
- [11] 张勇, 陈强. 一种基于计算几何方法的最小包容圆求解算法[J]. 工程图学学报, 2007, 28(3): 97-101.

(上接第 455 页)

#### 5 结语

文中提出的智能控制系统优化算法,在某些情况下存在系统给定值  $R$  较难准确给定,以及参数  $\omega, k_p, k_i, k_d$  的初值难以设置的问题。但填充函数法是一种寻优效果比较好的全局优化算法,由于其每一步都要调用两次局部寻优算法,在处理复杂问题时可能导致耗时较长。将上述两种算法结合起来,提出了利用填充函数改进的智能控制系统优化算法,该算法与智能控制系统优化算法相比在寻优精度上有了明显的改进,与填充函数法相比在寻优速度上有了较大的提升。

文中提出的智能控制系统优化算法还有以下几点值得进一步的研究:1) 解决系统给定值的难题;2) 针对不同的优化对象,选取相应的控制策略(文中选取的是参数可自适应调整的 PID 策略);3) 考虑目标函数不可微的情况。

#### 参考文献:

- [1] 李铭明, 张连生, 王薇, 等. 一个新的填充函数[J]. 系统科学与数学, 2007, 27(5): 703-713.
- [2] LIU X, XU W. A new filled function applied to global optimization [J]. Computers and Operations Research, 2004, 31(1): 61-80.
- [3] WANG CHENGJUN, YANG YONGJIAN, LI JING. A new filled function method for unconstrained global optimization[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2009, 225(1): 68-79.
- [4] LIANG Y M, ZHANG L S, LI M M, et al. A filled function method for global optimization[J]. Journal of Computational and Applied

- Mathematics, 2007, 205(1): 16-31.
- [5] WU Z Y, BAI F S, LEE H W, et al. A filled function method for constrained global optimization[J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(4): 495-507.
- [6] MA SUZHEN, YANG YONGJIAN, LIU HUAQUN. A parameter free filled function for unconstrained global optimization[J]. Applied Mathematics and Computation, 2010, 215(10): 3610-3619.
- [7] FAN S-K S, ZAHARA E. A hybrid simplex search and particle swarm optimization for unconstrained optimization[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 181(2): 527-548.
- [8] 李明, 杨成梧. 细菌菌落优化算法[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(2): 223-228.
- [9] 刘朝华, 张英杰, 章兢, 等. 一种双态免疫微粒群算法[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(1): 58-64.
- [10] 高艳萍, 诸克军. 求解优化问题的混合 PSO-Solver 算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(6): 1648-1651.
- [11] LIU X. A class of continuously differentiable filled functions for global optimization[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2008, 38(1): 38-47.
- [12] LIANG J J, QIN A K, SUGANTHAN P N, et al. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 281-295.
- [13] WANG YUPING, DANG CHUANGYIN. An evolutionary algorithm for global optimization based on level-set evolution and Latin squares [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(5): 579-595.