

# 一种面向三维感知的无线多媒体传感器网络覆盖增强算法

肖 甫<sup>1,2,3</sup>, 王汝传<sup>1,2,3</sup>, 孙力娟<sup>1,2,3</sup>, 翁娇艳<sup>1</sup>

(1. 南京邮电大学计算机学院, 江苏南京 210003; 2. 江苏省无线传感网高技术研究重点实验室, 江苏南京 210003;  
3. 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 江苏南京 210003)

**摘 要:** 覆盖作为无线传感器网络中的基础问题直接反映了网络感知服务质量. 本文在分析现有无线多媒体传感器网络覆盖增强算法的基础上, 构建节点三维感知模型, 提出面向三维感知的多媒体传感器网络覆盖增强算法 (Three-Dimensional Perception Based Coverage-Enhancing Algorithm, TDPCA). 该算法将节点主感知方向划分为仰俯角和偏向角, 并根据节点自身位置及监测区域计算并调整各节点最佳仰俯角, 在此基础上基于粒子群优化调整节点偏向角, 从而有效减少节点感知重叠区及感知盲区, 最终实现监测场景的区域覆盖增强. 仿真实验表明: 对比已有的覆盖增强算法, TDPCA 可有效降低除节点感知重叠区和盲区, 最终实现网络的高效覆盖.

**关键词:** 无线多媒体传感器网络; 三维感知模型; 覆盖增强; 粒子群优化

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 01-0167-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.01.027

## Coverage-Enhancing Algorithm for Wireless Multi-Media Sensor Networks Based on Three-Dimensional Perception

XIAO Fu<sup>1,2,3</sup>, WANG Ru-chuan<sup>1,2,3</sup>, SUN Li-juan<sup>1,2,3</sup>, WENG Jiao-yan<sup>1</sup>

(1. College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China;

2. Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks, Nanjing, Jiangsu 210003, China;

3. Ministry of Education Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

**Abstract:** Coverage is one of the hot research topics in wireless sensor networks, which indicates sensing QoS by wireless sensor networks. Motivated by the existing coverage-enhancing algorithm of wireless multimedia sensor network, a new three dimensional sensor perception model is established and a coverage-enhancing algorithm based this model (TDPCA) is proposed. This algorithm divided the three-dimensional perception model into pitch angle and deviation angle, thus the best optimal pitch angle is calculated according the location of monitoring area and nodes, and then deviation angle is optimized based on particle swarm optimization, which eliminate overlap and blind perception area effectively. Experimental results show that compared with the existing three-dimensional cover-enhancing algorithm in wireless sensor network, sensation overlap area and blind spots may be eliminated by TDPCA, and thus ultimate coverage performance of the wireless sensor network can be enhanced.

**Key words:** wireless multimedia sensor networks; three-dimensional perception model; coverage-enhancing; particle swarm optimization

## 1 引言

覆盖作为传感器网络基础理论中的典型问题反映了网络对物理世界的感知范围, 并直接影响着网络服务质量. 总的来看, 无线传感器网络覆盖包括点覆盖, 区域覆盖和路径覆盖. 当前对于传感器网络覆盖控制的研究工作主要基于传统传感器节点的全向感知模型<sup>[1-4]</sup>和

面向新型多媒体传感器节点的有向感知模型<sup>[5-8]</sup>而展开, 而这些研究工作基本均关注于理想的二维平面. 事实上, 布撒的传感器节点均处于现实三维物理世界中, 传统简化二维感知模型及其对应覆盖算法很难直接应用于现实三维环境<sup>[9]</sup>.

随着研究的深入和实际应用的扩展, 三维传感器网络受到越来越多的重视, 尤其是近年来水下传感器研究

收稿日期: 2010-10-09; 修回日期: 2011-04-06

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61003236, No. 61003039, No. 60973139, No. 61170065, No. 61171053, No. 61103195); 教育部博士点基金 (No. 20103223120007); 江苏省自然科学基金 (No. BK2011755); 江苏省科技支撑计划 (No. BE2010197, No. BE2010198); 高校科研成果产业化推进项目 (No. JH10-14, No. JHB2011-9); 江苏高校科技创新计划项目 (No. CX10B-196Z, No. CX10B-197Z, No. CX10B-198Z, No. CX10B-199Z, No. CX10B-200Z); 江苏省计算机信息处理技术重点实验室基金 (No. KJS1022) 和江苏高校优势学科建设工程资助项目

的兴起,研究者开始思考与现实物理世界更为贴近的传感器节点的三维感知模型及其对应覆盖控制算法.已有的三维无线传感器网络相关研究工作主要通过将三维空间问题规约到二维平面上来解决.Zhao<sup>[10]</sup>提出传感器节点表面覆盖模型,针对三维空间曲面基于表面模型实现了一种高效的覆盖控制算法,该工作仍然是基于传统感知模型,没有考虑处于三维空间中的传感器节点自身模型.文献[11]提出了基于冗余节点休眠和分阶段唤醒策略的传感器网络三维覆盖控制方法,但没有考虑如何优化形成高效的三维覆盖.文献[12]针对传统二维感知模型不能准确刻画三维场景中的多媒体传感器节点感知特性,首次给出了多媒体传感器节点的三维感知模型及场景覆盖增强算法.文献[13]则研究了水下三维传感器网络的覆盖和连通问题,设计优化的覆盖控制算法实现水下场景的最少节点全覆盖.文献[14]针对三维无线传感器网络研究解决了场景的  $K$  覆盖和节点的连通性问题.总的来看,目前三维传感器网络覆盖控制一般基于计算几何,相对于传统传感器网络覆盖控制,时间复杂度大大提高.文献[10]的三维传感器网络覆盖控制算法取得较好效果,然而其工作是基于二维感知模型,而文献[12]首次提出三维传感器节点的感知模型,其中主感知方向包含多参数约束,对应平面四边形感知区域质心计算复杂,而随后的覆盖增强过程中,采用虚拟势场计算、模拟退火算法迭代优化确定节点感知区域的质心位置,计算量较大.本文考虑将主感知方向正交分解为仰俯角和偏向角,在此基础上根据场景监测区域及节点位置确定节点的最佳仰俯角,实现覆盖率较大提升,再基于优化算法实现场景监测区域覆盖增强.本文的研究是借鉴文献[12]的相关研究基础,针对上述问题,设计无线多媒体传感器网络节点的三维感知模型,将三维空间问题分解成垂直和水平两个方面,将三维空间问题规约到二维平面;对于垂直仰俯角的调节,根据约束条件,提出最佳仰俯角计算方法,水平偏向角调节则基于微粒群优化算法,最终实现多媒体传感器节点的覆盖增强.

## 2 传感器网络覆盖增强问题

### 2.1 三维感知模型

多媒体传感器节点处于三维物理场景中,不同于传统节点简化二维扇形模型,三维感知模型取决于节点的空间坐标、水平方向及垂直方向的最大张角,因此随着主感知方向和节点水平张角及垂直张角的改变,三维感知模型有能力覆盖到其感知半径内圆球体的所有区域.本文采用的多媒体传感器节点三维感知模型如图1所示.

**定义1** 方向可调的多媒体传感器节点三维感知

模型可用一个四元组  $(P, C, \alpha, \beta)$  表示.其中,  $P = (x, y, z)$  为节点在三维空间中的坐标;传感方向  $C = (\gamma, \theta)$  代表了传感器节点的主感知方向,  $\gamma$  为仰俯角,即传感方向  $C$  在垂直方向上的偏移角度,  $\theta$  为偏向角,即传感方向  $C$  在水平方向上的偏移角度;  $2\alpha$  表示水平方向感知区域视角;  $2\beta$  表示垂直方向感知区域视角.

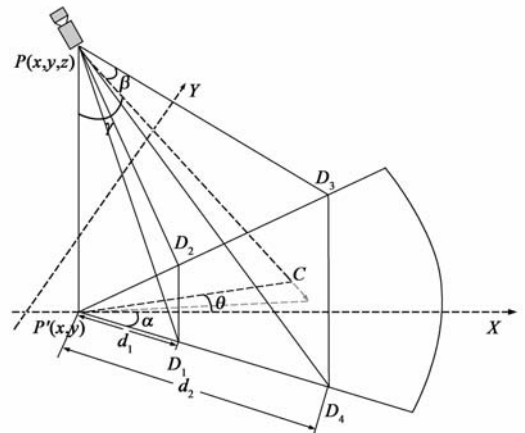


图1 多媒体传感器节点三维感知模型

根据传感方向  $C$  的定义,可将三维感知模型分解为:考虑传感方向的水平分量,该感知模型退化为文献[5]所设计的方向可调二维扇形感知模型,且随主感知方向的调整有能力覆盖到其传感半径内的整个圆形区域;考虑传感方向的垂直约束,可视为其对二维水平面上形成的扇形覆盖区域的切割,因此形成图1中感知模型中梯形  $D_1D_2D_3D_4$  对应区域.该区域可绕节点水平投影位置点  $P'(x, y)$  在水平方向旋转,而线段  $D_1D_2$  和  $D_3D_4$  则同时沿着  $X$  轴正负方向平移,切割扇形区域,但  $D_1D_2$  和  $D_3D_4$  之间距离保持不变.因此梯形  $D_1D_2D_3D_4$  的覆盖面积可变.梯形感知区域对应坐标为(推导见附录A):

$$\begin{aligned} D_1: & (x + d_1 \times \cos(\theta + \alpha), y + d_1 \times \sin(\theta + \alpha)) \\ D_2: & (x + d_1 \times \cos(\theta - \alpha), y + d_1 \times \sin(\theta - \alpha)) \\ D_3: & (x + d_2 \times \cos(\theta - \alpha), y + d_2 \times \sin(\theta - \alpha)) \\ D_4: & (x + d_2 \times \cos(\theta + \alpha), y + d_2 \times \sin(\theta + \alpha)) \end{aligned} \quad (1)$$

其中扇形区域的内半径  $d_1$ , 外半径  $d_2$  为:

$$\begin{aligned} d_1 &= z \times \tan(\gamma - \beta) \\ d_2 &= z \times \tan(\gamma + \beta) \end{aligned} \quad (2)$$

在随机部署的传感器网络中传感方向  $C$  的初始值一般为随机分布,假设仰俯角  $\gamma$  在  $[0, \pi/2]$  内服从均匀分布,偏向角  $\theta$  在  $[0, 2\pi]$  内服从均匀分布.通过调整主感知方向  $C$  向量的仰俯角  $\gamma$  和偏向角  $\theta$  可以实现场景覆盖区域的有效增强.

**定义2** 设传感器节点对应的四元组为  $(P, C, \alpha, \beta)$ , 且有  $P = (x, y, z)$ ,  $C = (\gamma, \theta)$ ,  $2\alpha$  为水平感知区域

视角,  $2\beta$  为垂直感知区域视角, 且节点在水平面上的投影点为  $P'(x, y)$ , 任意时刻场景中点  $A$  被传感器节点覆盖, 当且仅当:

$$(1) d_1 \leq |P'A| \leq d_2$$

$$(2) \vec{P'A} \cdot \vec{C} \geq |\vec{P'A}| \cos \alpha$$

## 2.2 传感器网络覆盖增强分析

和文献[12]的传感器网络覆盖增强研究类似, 我们假设多媒体传感器节点同构可互相通信, 节点自身位置保持不变. 首先在水平和垂直方向分别每隔  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  选取一个离散点, 从而连续区域覆盖的问题就转化为区域离散点集的覆盖. 设监测区域离散后对应的点集为  $\Omega$ , 所有至少被一个传感器节点覆盖的点集为  $\Omega_\alpha$ , 则区域覆盖率  $\eta$  定义为:

$$\eta = \|\Omega_\alpha\| / \|\Omega\| \quad (3)$$

设监测区域中初始布撒传感器节点数目为  $n$ , 第  $i$  个传感器节点的主感知方向向量为  $C_i$ , 则覆盖增强可视作为一个最优化问题, 即求解一组变量  $(C_1, C_2, \dots, C_n)^*$ , 使得对所有变量组  $(C_1, C_2, \dots, C_n)$  均有式(4)成立:

$$\eta(C_1, C_2, \dots, C_n)^* \geq \eta(C_1, C_2, \dots, C_n) \quad (4)$$

## 3 面向三维感知的多媒体传感网覆盖增强

### 3.1 仰俯角优化调节方案

梯形面积的大小决定于内半径  $d_1$  以及外半径  $d_2$ , 可调节主感知方向使得梯形面积最大可实现初步增强. 由于  $d_2 \gg d_1$ , 我们主要考虑外半径  $d_2$  对面积的影响.  $d_2$  与节点的高度及节点主感知方向仰俯角有关, 而节点自身位置固定, 所以梯形面积的调节转化为仰俯角  $\gamma$  的调节. 本文基于节点自身位置及监测场景信息, 针对每个节点计算最佳仰俯角, 调整节点仰俯角可大幅提升场景覆盖率.

梯形覆盖区域的朝向取决于节点主感知方向  $C$ ,  $C$  不同对应梯形区域在水平上的投影方向变化, 此时外半径  $d_2$  的取值变化. 理想情况为某  $d_2$  恰能使梯形的  $D_3D_4$  边与监测区域边界刚好重合, 此时传感器节点的有效覆盖区域最大. 事实上, 大多数节点所对应的感知梯形区域不会为理想情况. 依据偏向角不同, 我们将传感器节点集  $NodeSet$  分割成 4 个互不相交的子节点集

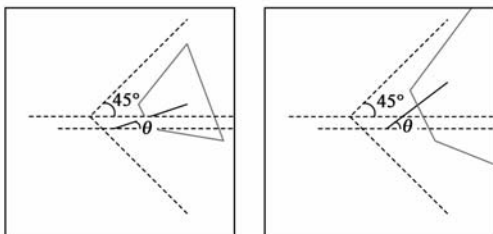


图2 单节点感知投影区域调整示意图

$NodeSet_i (i = 1, 2, 3, 4)$ . 图 2 给出了  $NodeSet_1$  子集中某节点感知投影区域(图中实线多边形区域)调整情况, 其他节点子集区域调整情况与此类似.

设感知区域的最大横坐标和最大纵坐标分别为  $\max x$ 、 $\max y$ , 根据监测区域及偏向角的大小确定  $d_2$  的最大值, 计算此时  $\gamma$  角度值, 即为最佳仰俯角  $\gamma(i)$ . 计算公式如下(推导见附录 B):

$$(1) \text{ 节点 } i \in NodeSet_1, \text{ 有}$$

$$\gamma(i) = \arctan((\max x - x(i))/z(i)) - \beta;$$

$$(2) \text{ 节点 } i \in NodeSet_2, \text{ 有}$$

$$\gamma(i) = \arctan((\max y - y(i))/z(i)) - \beta;$$

$$(3) \text{ 节点 } i \in NodeSet_3, \text{ 有}$$

$$\gamma(i) = \arctan(x(i)/z(i)) - \beta;$$

$$(4) \text{ 节点 } i \in NodeSet_4, \text{ 有}$$

$$\gamma(i) = \arctan(y(i)/z(i)) - \beta$$

### 3.2 基于智能优化的偏向角的调节

更进一步考虑传感器偏向角对场景覆盖度的影响, 偏向角的调整受相邻节点相互制约是一个 NP-Hard 问题. 微粒群优化策略作为群进化智能计算方法, 具有速度快、求解质量高等优点. 因此将微粒群智能优化算法引入到传感器网络覆盖增强中<sup>[15]</sup>, 针对节点偏向角调整的需要, 设计微粒适应值计算函数和种群进化策略, 在此基础上, 以网络有效覆盖率为优化目标, 通过微粒群算法搜索全局最优分布, 调整传感器节点偏向角降低网络感知重叠区和盲区, 最终实现多媒体传感器网络区域覆盖增强.

设场景监测区域中初始布撒的节点数为  $n$ , 节点初始主感知方向为  $(C_1, C_2, \dots, C_n)$ , 对应的节点集的初始偏向角为  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ . 微粒种群规模为  $m$ , 搜索空间  $d$  对应为场景节点数  $n$ . 设微粒  $i$  的角度向量  $a_i$ , 其中  $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$  依次表示节点 1 至  $n$  的主感知偏向角. 微粒  $i$  的角度调整向量  $w_i$  为  $(w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in})$ , 定义微粒  $i$  的适应值函数  $f_i$  如式(5)所示:

$$f_i = \eta(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}) \quad (5)$$

适应值  $f_i$  对应传感器节点主感知偏向角方向  $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$  下的网络有效覆盖率, 种群微粒经历的全局最优值  $P_g$  如式(6)所示:

$$P_g = \max\{f_1, f_2, \dots, f_m\} \quad (6)$$

为搜寻全局最优, 采用式(7)迭代优化:

$$\begin{cases} W_{ij}(t+1) = \beta(t) \times w_{ij}(t) + k_1(p_{a_j} - a_{ij}(t)) \\ \quad + k_2(g_{a_j} - a_{ij}(t)) \\ a_{ij}(t+1) = a_{ij}(t) + w_{ij}(t+1) \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $p_{a_j}$  为微粒  $i$  的第  $j$  维经历的局部最佳,  $g_{a_j}$  对应为全局最佳偏向角;  $k_1$ 、 $k_2$  为加速因子, 分别用于调节微粒向局部最优和全局最优的进化步长;  $a_{ij}(t)$  代表第  $t$

代种群中的微粒  $i$  的第  $j$  维, 即  $j$  传感器节点主感知方向的偏向角。

进化过程中为保证迭代稳定, 当  $W_j$  超出某范围时, 则调整为  $W_{\max}$  或  $W_{\min}$ ;  $\beta(t) \in (0, 1)$  为惯性因子, 随迭代次数增加逐步减少。

#### 4 实验及分析

在长宽均为 500m 的监测区域, 随机布撒若干节点进行监测, 节点主感知方位角随机选取: 仰俯角  $\gamma$  在  $[0, \pi/2]$  内均匀分布, 偏向角  $\theta$  在  $[0, 2\pi]$  内均匀分布. 节点的水平感知视角和垂直视角均为  $120^\circ$ . 实验中随机布撒 100 个传感器节点, 如图 3(a) 所示, 节点的  $x, y$  坐

标在  $[1, 500]$  内随机选取, 而高度信息  $z$  则在  $[5, 12]$  内随机选取. 首先计算并调整各节点的最佳仰俯角, 优化偏向角调整中  $k_1 = k_2 = 2, N = 40, D = n = 100, \text{MaxDT} = 30$ , 单次调整角度  $w$  为  $5^\circ$ . 图 3(b) 为仰俯角调整后情况, 区域几乎实现了  $k$  重覆盖, 此时再采基于智能优化算法调节其偏向角, 使其整体覆盖更为均匀, 但场景整体覆盖率基本不变, 如图 3(c) 所示. TDPCA 算法调整前后, 场景覆盖率提升了 47.10%.

下面减少场景中初始节点数目, 重新进行实验. 节点数为 10, 覆盖效果如图 4, 可以看出: 监测场景中节点感知区域得到有效调整, 并降低了覆盖重叠区域, 覆盖率明显提高, 整体覆盖率提升了 81.72%.

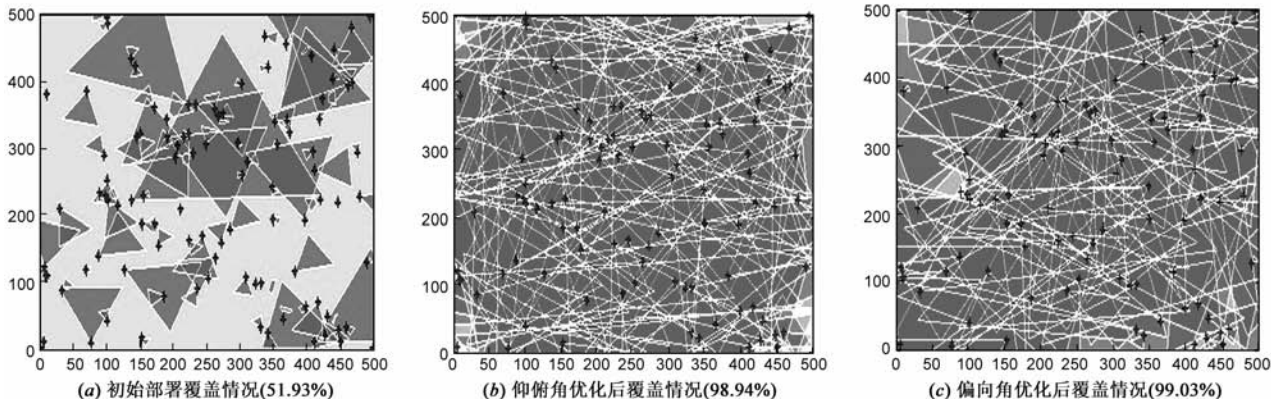


图3 初始节点数为100时采用本文TDPCA算法优化前后网络覆盖情况

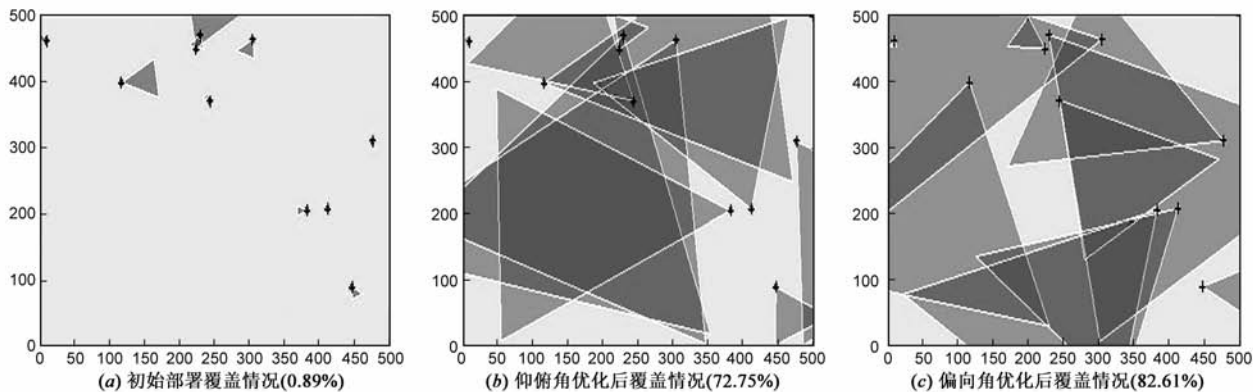


图4 初始节点数为10时采用本文TDPCA算法优化前后网络覆盖情况

实验中由于节点是随机布撒, 节点感知投影的梯形面积亦可变, 因此即使针对同一区域, 随机布撒相同数量节点, 初始覆盖率也会有较大差别. 如表 1 所示, 随机布撒相同数量的节点, 采用本文算法调整节点主感知方向后, 场景最终覆盖率均能较大幅度提升。

为验证初始节点数对场景覆盖率的影响, 我们分别选取初始节点分别为 100, 80, 60, 30, 10 进行仿真实验, 如表 2 所示. 可以看出 30 个节点可基本实现监测区域全覆盖。

表 1 采用本文 TDPCA 算法调整主感知方向前后场景覆盖情况比较

传感器节点数	初始场景覆盖率	最终场景覆盖率
80	32.38%	98.70%
	51.93%	98.94%
	70.45%	98.75%
60	27.92%	98.40%
	36.44%	98.81%
	64.97%	98.75%
30	5.80%	96.62%
	14.24%	97.51%
	24.57%	97.95%

表 2 传感器节点数对覆盖率的影响

传感器节点数	初始场景覆盖率	仰俯角调节覆盖率	最终场景覆盖率	场景覆盖增强率
100	51.93%	98.94%	99.00%	47.07%
80	32.38%	98.70%	99.00%	66.62%
60	27.92%	98.40%	99.00%	71.08%
30	14.24%	97.51%	98.81%	84.57%
10	0.89%	72.75%	82.61%	81.72%

图 5 为采用本文算法和文献[12]算法优化前后的场景覆盖率比较,其中场景监测区域为  $300 \times 300$ ,节点数为 150,节点水平感知视角和垂直感知视角分别为  $120^\circ$  和  $90^\circ$ .与文献[12]相比较,分别改善了 26.22% 和 6.3%.

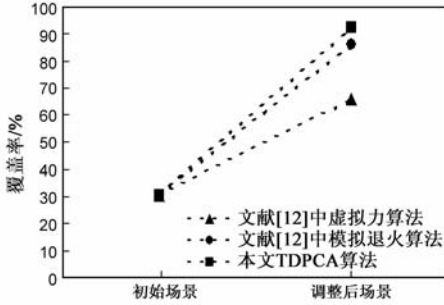


图 5 本文TDPCA和文献[12]算法覆盖率结果比较

## 5 小结

本文研究了面向三维感知的无线多媒体传感器网络覆盖增强,针对已有三维感知模型及其覆盖算法计算复杂问题,提出节点主感知方向可调的三维感知模型的基础上,将三维空间正交分解为仰俯方向和偏向方向,从而将三维空间问题规约到二维平面;对于垂直仰俯角的调节,根据约束条件,提出了最佳仰俯角调节算法,水平偏向角调节则基于微粒群优化算法,最终实现多媒体传感器节点的三维感知覆盖增强,一系列仿真实验验证了本文算法的有效性.

## 附录 A

图 1 中,设  $O_1 \sim O_4$  分别为  $D_1 \sim D_4$  点向  $X$  轴做垂线得到的点,则:

$$\begin{aligned} |P'D_2| &= |P'D_1| \\ &= z \times \tan(\gamma - \beta) \\ |D_1O_1| &= |P'D_1| \times \sin(\theta + \alpha) \\ &= z \times \tan(\gamma - \beta) \times \sin(\theta + \alpha) \\ |P'O_1| &= |P'D_1| \times \cos(\theta + \alpha) \\ &= z \times \tan(\gamma - \beta) \times \cos(\theta + \alpha) \end{aligned}$$

因此  $D_1$  坐标为:

$$\begin{aligned} (x + d_1 \times \cos(\theta + \alpha), y + d_1 \times \sin(\theta + \alpha)); \\ |D_2O_2| &= |P'D_2| \times \sin(\theta - \alpha) \\ &= z \times \tan(\gamma - \beta) \times \sin(\theta - \alpha) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |P'O_2| &= |P'D_2| \times \cos(\theta - \alpha) \\ &= z \times \tan(\gamma - \beta) \times \cos(\theta - \alpha) \end{aligned}$$

因此  $D_2$  坐标为:

$$\begin{aligned} (x + d_1 \times \cos(\theta - \alpha), y + d_1 \times \sin(\theta - \alpha)); \\ |P'D_4| &= |P'D_3| \\ &= z \times \tan(\gamma + \beta) |D_3O_4| \\ &= |P'D_3| \times \sin(\theta - \alpha) \\ &= z \times \tan(\gamma - \beta) \times \sin(\theta - \alpha) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |P'O_3| &= |P'D_3| \times \cos(\theta - \alpha) \\ &= z \times \tan(\gamma - \beta) \times \cos(\theta - \alpha) \end{aligned}$$

因此  $D_3$  坐标为:

$$\begin{aligned} (x + d_2 \times \cos(\theta - \alpha), y + d_1 \times \sin(\theta - \alpha)); \\ |D_4O_4| &= |P'D_4| \times \sin(\theta + \alpha) \\ &= z \times \tan(\gamma - \beta) \times \sin(\theta + \alpha) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |P'O_4| &= |P'D_4| \times \cos(\theta + \alpha) \\ &= z \times \tan(\gamma - \beta) \times \cos(\theta + \alpha) \end{aligned}$$

因此  $D_4$  坐标为:

$$(x + d_2 \times \cos(\theta + \alpha), y + d_2 \times \sin(\theta + \alpha));$$

## 附录 B

$\because d_2 = z \times \tan(\gamma + \beta)$ , 有:

(1) 节点  $\in NodeSet_1$ :

$$\because d_2 = \max x - x \quad \therefore \gamma = \arctan((\max x - x)/z) - \beta$$

(2) 节点  $\in NodeSet_2$ :

$$\because d_2 = x \quad \therefore \gamma = \arctan(x/z) - \beta;$$

(3) 节点  $\in NodeSet_3$ :

$$\because d_2 = \max y - y \quad \therefore \gamma = \arctan(\max y - y)/z) - \beta;$$

(4) 节点  $\in NodeSet_4$ :

$$\because d_2 = y \quad \therefore \gamma = \arctan(y/z) - \beta;$$

## 参考文献

- [1] Wang Xue, Ma Jun-jie, Wang Sheng, Bi Dao-wei. Distributed energy optimization for target tracking in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 9(1): 73 - 86.
- [2] Ai Chen, Santosh Kumar, Ten H Lai. Local barrier coverage in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 10(4): 491 - 504.
- [3] Yanli Cai, Wei Lou, Minglu Li, Xiang-Yang Li. Energy efficient target-oriented scheduling in directional sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2009, 58(9): 1259 - 1275.
- [4] 凡高娟,孙力娟,王汝传,黄海平.距离辅助的无线传感器网络节点覆盖判别模型[J].通信学报,2010,31(8): 127 - 133.  
Fan Gao-juan, Sun Li-juan, Wang Ru-chuan, Huang Hai-ping. Distance-assistant node coverage identification model for wire-

- less sensor networks[J]. Journal on Communications, 2010, 31(8):127-133. (in Chinese)
- [5] Ma HD, Liu YH. On coverage problems of directional sensor networks[A]. Proceedings of the International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 721-731.
- [6] 陶丹, 孙岩, 陈后金. 视频传感器网络中最坏情况覆盖检测与修补算法[J]. 电子学报, 2009, 37(10):2284-2293.  
Tao Dan, Sun Yan, Chen Hou-jin. Worst-case coverage detection and repair algorithm for video sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10):2284-2290. (in Chinese)
- [7] 肖甫, 王汝传, 叶晓国, 孙力娟. 基于改进势场的有向传感器网络路径覆盖增强算法[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(12):2126-2133.  
Xiao Fu, Wang Ru-chuan, Ye Xiao-guo, Sun Li-juan. A path coverage-enhancing algorithm for directional sensor network based on improved potential field[J]. Journal of Computer and Development, 2009, 46(12):2126-2133. (in Chinese)
- [8] 温俊, 蒋杰, 窦文华. 公平的有向传感器网络方向优化和节点调度算法[J]. 软件学报, 2009, 20(3):644-659.  
Wen Jun, Jiang Jie, Dou Wen-Hua. Equitable direction optimizing and node scheduling for coverage in directional sensor networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(3):644-659. (in Chinese)
- [9] Habib M Ammari, Sajal K Das. Critical density for coverage and connectivity in three-dimensional wireless sensor networks using continuum percolation[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(6):872-885.
- [10] Ming-Chen Zhao, Jiayin Lei, Min-You Wu. Surface coverage in wireless sensor networks[A]. Proceedings of 28th IEEE Conference on Computer Communications IEEE INFOCOM 2009[C]. Washington: IEEE, 2009. 109-117.
- [11] 蒋鹏, 陈峰. 基于冗余节点休眠和分阶段唤醒策略的传感器网络三维覆盖控制方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(12):2807-2812.  
Jiang Peng, Chen Feng. 3D coverage scheme based on hibernation of redundant nodes and hased walking-up strategy for wireless sensor networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(12):2807-2812. (in Chinese)
- [12] Huadong Ma, Xi Zhang, Anlong Ming. A coverage-enhancing method for 3D directional sensor networks[A]. Proceedings of 28th IEEE Conference on Computer Communications IEEE INFOCOM 2009[C]. Washington: IEEE, 2009. 2791-2795.
- [13] S M N Alam, Z J Haas. Coverage and connectivity in three-dimensional networks[A]. The Twelfth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. New York: ACM, 2006. 23-29.
- [14] Habib M Ammari, Sajal K Das. A study of k-coverage and measures of connectivity in 3D wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2010, 59(2):243-257.
- [15] 孙力娟, 杜鹏玲, 肖甫, 王汝传. 基于微粒群优化的有向传感器网络覆盖增强算法[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(Z2):22-25.  
Sun Li-juan, Du Peng-lin, Xiao Fu, Wang Ru-chuan. Coverage-enhancing algorithm for directional sensor networks based on particle swarm optimization[J]. Journal of Computer and Development, 2010, 47(Z2):22-25. (in Chinese)

### 作者简介



**肖甫** 男, 1980年10月出生, 湖南邵阳人. 博士, 副教授. 研究方向为无线传感器网络、卫星网络、多媒体技术等.  
E-mail: xiaof@njupt.edu.cn



**王汝传** 男, 1943年8月出生, 安徽合肥人. 教授, 博士生导师, 主要从事无线传感器网络、计算机软件、信息安全等领域的研究.



**孙力娟** 女, 1963年12月出生, 江苏南京人. 教授, 博士生导师, 南京邮电大学计算机学院院长, 主要从事无线传感器网络、卫星网络等领域的研究.