

# 有向传感器网络的覆盖增强算法\*

范兴刚, 王 恒, 蒿 翔

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

**摘要:**有向传感器网络的区域覆盖是近年来的研究热点。研究了 VORONOI 单元与节点虚拟感知圆(以其位置为圆心,感知半径为半径的圆)的几何关系,并以此关系确定有向传感器的工作方向,使每一个 VORONOI 单元的覆盖面积最大;然后,调整重叠覆盖最大的邻居节点,重叠面积最小所对应的 VORONOI 单元顶点作为新的工作方向,以便在可能的覆盖重叠情况下获得最佳覆盖贡献率;最后,调整边界节点的感知方向,减少无效覆盖。仿真结果表明,该算法可以有效地提高区域覆盖,降低无效覆盖。

**关键词:**有向传感器网络;VORONOI 单元;感知方向;边界节点;虚拟感知圆

**中图分类号:** TP393 TH862 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 120.99

## Algorithm for enhancing coverage ratio in directional sensor networks

Fan Xinggang, Wang Heng, Hao Xiang

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Area coverage of directional sensor networks (DSNs) has been a research hotspot in recent years. This paper studies the relationship between VORONOI cell and corresponding virtual sensing circle (the circle with its location as center and sensing radius as radius), according to which it firstly ascertains the possible working direction to maximize coverage ratio in each of VORONOI cells. Then, in order to decrease overlap coverage between neighbor nodes, it adjusts the direction of node with the maximum overlap area, which is changed to the cell vertex with the minimum overlap coverage area. Finally, in order to avoid invalid coverage ratio, the directions of sensors close to the overall sensing field boundary are readjusted. Simulation results proved that this algorithm could improve the valid coverage area and decrease the invalid coverage ratio.

**Keywords:** directional sensor network; VORONOI cell; sensing direction; boundary node; virtual sensing circle

## 1 引 言

有向传感器网络的覆盖性能是衡量有向传感器网络服务质量的一项重要指标,它直接反映了网络节点对指定区域的监控程度,如何增强整个网络的覆盖性能是有向传感网络一个研究热点<sup>[1-3]</sup>。

很多学者对有向网络覆盖进行了研究,有些学者通过节点之间的虚拟力来增强覆盖<sup>[4-5]</sup>。张洪德等人<sup>[6]</sup>在虚拟力基础上,研究了基于粒子均衡的移动传感器网络覆盖控制性能;Huang J. J. 等人<sup>[7]</sup>入了 cross-set 测试用来判断感知区域是否存在重叠;Chen J 等人<sup>[8]</sup>通过重叠感

知率调整感知方向,提高网络的覆盖质量。有些学者通过智能算法等对节点进行重部署。Zhang K 等人<sup>[9]</sup>采用遗传模拟退火方法提高多媒体有向传感器网络的覆盖问题;Morsly Y 等人<sup>[10]</sup>采用标准粒子群算法研究摄像头网络的覆盖增强;Hong Y 等人<sup>[11]</sup>研究了视频感知网络中具有最佳视觉的目标监控问题;Mohamadi H 等人<sup>[12]</sup>采用自动学习机解决优先级不同的目标覆盖问题。不仅如此,有些学者还通过节点的移动能力来增强覆盖。Wang Z. B. 等人<sup>[13]</sup>移动节点填补覆盖空白区,形成栅栏覆盖;Guwensan M. A. 等人<sup>[14]</sup>提出了一种先转动后移动的混合策略,实现区域的覆盖增强;蒋一波等人<sup>[15]</sup>运用有向节点的转动实现多个目标实现 K 级覆盖;贾明伟<sup>[16]</sup>根据节

点与邻居节点的关系,提出了一种覆盖冗余判别算法。

基于VORONOI单元调整节点工作方向,提高覆盖,成为近年的研究热点<sup>[17-19]</sup>。Li J等人<sup>[17]</sup>将传感区域分为VORONOI单元;针对有向传感器网络(directional sensor network, DSN),Sung T. W.等人<sup>[18]</sup>将传感区域划分为VORONOI单元,并在辅助移动传感器帮助下,提高覆盖能力;Sung J. W.等人<sup>[19]</sup>研究了基于VORONOI单元节点转动和移动策略,从而提高整体的区域覆盖。

以节点位置为圆心,感知半径为半径的感知圆为节点的虚拟感知圆。经过节点转动,虚拟感知圆内的任何区域都可以被覆盖。VORONOI单元与生成节点的虚拟感知圆有一定的关系。至今为止,还没有发现从这个方面研究有向传感网络的覆盖增强。本文研究VORONOI单元与虚拟感知圆的关系,调整节点感知方向,节能高效地提高有向网络的覆盖能力,减少无效覆盖。根据VORONOI单元与节点虚拟感知圆的关系,确定有向节点的感知方向,使单元内覆盖面积最大;并进一步提出基于VORONOI单元的有向传感网络覆盖增强算法(distributed coverage enhancement based VORONOI graph, DCEVG),利用能效比模型(见定义4)衡量算法性能。

## 2 系统模型

有向传感器节点方向可调感知模型采取四元组  $\langle S, r, a, \theta \rangle$  表示,如图1所示。其中  $S = (x_s, y_s)$  表示节点的位置坐标,  $r$  表示节点的感知半径,  $\theta$  表示节点的感知方向,为相对于  $x$  正半轴的方向角,取值范围为  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ,  $\alpha$  表示节点的感知角度。

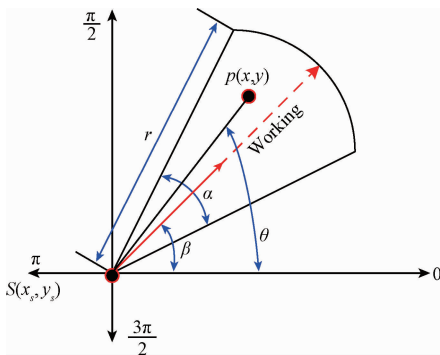


图1 可旋转有向传感器的传感模型

Fig. 1 The sensing model of directional sensor

研究有向网络的覆盖问题之前,需要做以下假设:

- 1) 节点具有相同的感知半径和感知角度;
- 2) 传感器投撒后全部处于活跃状态,传感器监视范围内的信号强度相同,且能在感知范围内以100%的可能性监测到事件;

3) 有向传感节点知道其感知方向和位置;

4) 节点只能转动,不能移动。每转动  $\pi$  耗能为  $J = 1.8 J$ ,如文献[15]。

覆盖率可以有效反映网络的覆盖性能。本文对整个覆盖区域网格化,网格只要在一个节点的感知区域内,就认为这个网格被有效覆盖。

**定义1** 有效覆盖率。区域内有效覆盖面积与整个区域的比值就是有效覆盖率,用  $C_i$  表示。在点阵中,内部有效面积 = 被覆盖的网格数,有效覆盖率的计算公式为:被覆盖的网格数/整个区域的网格数。

**定义2** 虚拟感知圆。以  $S = (x_s, y_s)$  为圆心,  $r$  为半径的圆,称为节点的虚拟感知圆,这是节点可能的感知区域。有向节点的实际感知区域一定在虚拟感知圆内。

有些节点的感知区域可能会超出边界造成无效覆盖。为了避免区域外无效覆盖,需要对其工作方向进行调整,避免无效覆盖。

**定义3** 无效覆盖率。所有节点在区域外覆盖面积之和与整个感兴趣区域的面积之比即无效覆盖率。

**定义4** 能效比。节点的总能耗与有效覆盖率增量的比值就是能效比,用  $\lambda$  表示。由于所有传感器只转动、不移动。转动角度(最终的感知方向和初始感知方向之差为转动的角度)与单位转动能耗的乘积就是总能耗,用  $E$  表示。调整后的覆盖率与初始覆盖率之差就是覆盖率增量。假设整个区域的初始有效覆盖率为  $C_i$ ,调整后的覆盖率  $C_a$ ,调整总能耗为  $E$ ,则  $\lambda = E / (C_a - C_i)$ 。覆盖率增量越大,消耗的能量越少,覆盖增强算法性能越好,效率越高。

本文所研究的问题是在给定区域中,如何高效率的调度随机部署的有向节点的感知方向,提高有向网络的覆盖率,减少无效覆盖。

## 3 理论分析

当给定区域中,  $N$  个感知半径为  $r$  的有向节点随机部署完毕以后,根据计算几何原理完成VORONOI单元构建,每个VORONOI单元有一个自己的生成传感器,该单元的边是相邻节点的中垂线,在每一条VORONOI边上,顶点是距离节点最远的点。根据定义2,进一步得到节点的虚拟感知圆。VORONOI单元与虚拟感知圆存在一一对应的关系,如图2所示。其中,虚线圆是节点  $O$  的虚拟感知圆,其周围的多边形是它的VORONOI单元。

虚拟感知圆与VORONOI单元的关系如图2和表1所示,其中,“虚拟交点”表示VORONOI单元与虚拟感知圆的交点;“交点”表示VORONOI单元与扇形感知区域的交点。有如下几种情况:1) 虚拟感知圆在VORONOI单元内,这时两者无交点,如图2(a)所示,整个虚拟感知

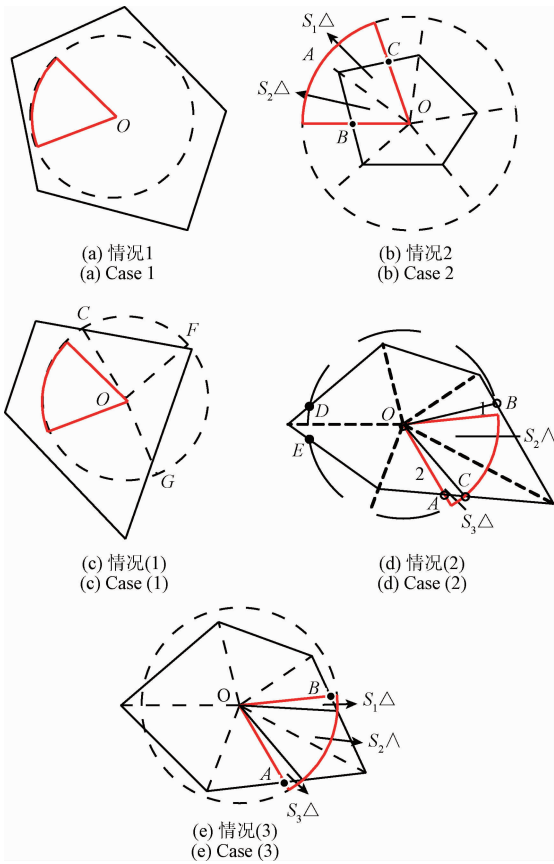


图2 VORONOI 单元与虚拟感知圆的关系  
Fig. 2 The relationship of VORONOI cell and virtual sensing circle

圆在 VORONOI 单元内, 节点无需转动, 任意一个感知方向, 单元内的感知面积都是最大的, 为  $A_s = \frac{\alpha}{2}r^2$ 。2) 与情况 1 相反, VORONOI 单元在虚拟感知圆内, 虽然两者仍然无交点, 但与情况 1 不同, 整个 VORONOI 单元都在感知圆内。感知方向朝向最远的顶点时, 感知扇形与 VORONOI 单元的交点有两个, 如图 2 (b) 所示, VORONOI 单元内的覆盖面积为  $A_s = S_1\Delta + S_2\Delta$ , “ $\Delta$ ”表示三角形。3) 虚拟感知圆与 VORONOI 单元有交点, 即感知圆的一部分在 VORONOI 单元内, 一部分在 VORONOI 单元外, 这又分 3 种情况: (1) 整个扇形感知区域在 VORONOI 单元内, 如图 2 (c) 所示。感知方向逆时针依次为  $\overrightarrow{OF}$ 、 $\overrightarrow{OC}$ 、 $\overrightarrow{OG}$ , 感知角度依次为  $\theta_F$ 、 $\theta_C$ 、 $\theta_G$  且  $\theta_F < \theta_C < \theta_G$ , 那么感知方向在  $[\theta_C + \frac{\alpha}{2}, \theta_C - \frac{\alpha}{2}]$  时, 单元内的感知区域最大, 为  $A_s = \frac{\alpha}{2}r^2$ 。(2) 实际的扇形感知区域与 VORONOI 单元有 1 个交点, 如图 2 (d) 所示。其中粗线的扇形是节点感知区域, 点 A 是节点感知区域和 VORONOI 单元的交点。此时, VORONOI 单元内的覆

盖面积为  $A_s = S_2A + S_3\Delta$ , “A”表示扇形。(3) 实际的扇形感知区域与 VORONOI 单元有 2 个交点, 如图 2 (e) 所示。点 A 和点 B 是节点感知区域和 VORONOI 单元的交点。

在 (1)、(2) 两种情况下, 分别让感知扇形的两条边与圆心和 n 个 VORONOI 单元与虚拟感知圆的交点的连线重合, 得到  $2n$  个扇形。这  $2n$  个扇形中, 在 VORONOI 单元内的覆盖面积最大, 且能耗最小的位置就是节点的目标位置。如图 2 (d) 所示, 加粗的扇形是实际的扇形位置, 虚拟感知圆与 VORONOI 单元有 4 个交点为 B、C、D、E。扇形的第 1 条边分别与  $\overline{OB}$ 、 $\overline{OC}$ 、 $\overline{OD}$ 、 $\overline{OE}$  重合, 得到 4 个扇形, 第 2 条边也分别与这 4 条线段重合, 得到 4 个扇形。这 8 个扇形中, 与 VORONOI 单元重叠面积最大的就是节点的目标位置。如果面积相等, 转动能耗最小的扇形就是节点的目标位置。

表 1 VORONOI 单元与虚拟感知圆的交点

Table 1 Intersection of VORONOI cell and virtual circle

情况	虚拟交点	交点	图例
1)	0	0	2(a)
2)	0	2	2(b)
(1)	$n(n \geq 1)$	0	2(c)
(2)	$n(n \geq 1)$	1	2(d)
(3)	$n(n \geq 1)$	2	2(e)

找到感知区域与 VORONOI 单元的交点以后, 进一步分析 VORONOI 单元的覆盖面积。如图 3 (b)、(d)、(e) 所示, 只要获得各个三角形区域的顶点, 各三角形的边长便可以确定, 从而获得该区域面积。除了传感器的坐标  $(x_s, y_s)$ , 三角形的顶点可能是扇形传感区域中的 VORONOI 顶点, 也可能是扇区边界和单元边之间的交点。

引理 假设  $(x_s, y_s)$  是节点的坐标,  $r$  表示节点的感知半径,  $\theta$  表示节点的工作方向,  $\alpha$  表示节点的感知角度。 $(x_a, y_a)$  和  $(x_b, y_b)$  是 VORONOI 单元的相邻顶点, 其坐标已由传感器的局部 VORONOI 单元结构获得。而三角形的顶点由传感器, 单元顶点, 以及  $r, \theta$  和  $\alpha$  的值获得。被感知区域覆盖的单元顶点满足式 (1)。感知扇区两条边界的计算公式如式 (2) 所示, 扇形圆弧的计算公式如式 (3) 所示, VORONOI 单元边界的计算公式如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2} \leq r \\ (x-x_s)\cos\theta+(y-y_s)\sin\theta \geq \sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2}\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2} \leq r \\ (x-x_s)\cos\theta+(y-y_s)\sin\theta = \\ \sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2}\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2} = r \\ r\cos\left(\theta+\frac{\alpha}{2}\right)+x_s \leq x \leq r\cos\left(\theta-\frac{\alpha}{2}\right)+x_s \\ r\sin\left(\theta-\frac{\alpha}{2}\right)+y_s \leq y \leq r\sin\left(\theta+\frac{\alpha}{2}\right)+y_s \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} y = y_a + \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a}x \\ x_a \leq x \leq x_b, y_a \leq y \leq y_b \end{cases} \quad (4)$$

证明:

如图1所示,点 $P(x,y)$ 被传感器 $S$ 所覆盖,当且仅当

以下两个条件得到满足:1)  $\sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2} \leq r$ 。

2)  $\vec{sp}$  和工作方向单位向量之间的夹角小于或等于传感器视角的一半:  $\beta \leq \alpha/2$ 。根据欧氏向量内积的几何定义,得到  $\vec{sp} \cdot \vec{w} = \|\vec{sp}\| \|\vec{w}\| \cos\beta$ ,  $((x-x_s), (y-y_s))$  可以

表示  $\vec{sp}$ , 方向  $(\cos\theta, \sin\theta)$  和长度  $\|\vec{w}\| = 1$  用于表示工作方向单位向量。因此可以得出  $(x-x_s)\cos\theta+(y-y_s)\sin\theta =$

$\sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2}\cos\beta$ , 因为  $\beta \leq \alpha/2, \cos\beta \geq \cos(\alpha/2)$  而且在给定参数  $\theta, \alpha$  以及点  $P$  和传感器  $S$  的位置的情况下,条件2)也可以由下述方程表示  $(x-x_s)\cos\theta+(y-y_s)\sin\theta \geq \sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2}\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ , 式(1)

得到证明。同理可以证明式(2)。

扇形圆弧上的点到节点位置的距离为  $r$ , 在两个边界节点

$(r\cos\left(\theta-\frac{\alpha}{2}\right)+x_s, r\sin\left(\theta-\frac{\alpha}{2}\right)+y_s)$  和

$(r\cos\left(\theta+\frac{\alpha}{2}\right)+x_s, r\sin\left(\theta+\frac{\alpha}{2}\right)+y_s)$  之间,如式(3)所示。

VORONOI 单元的一条边的两个顶点已知,可以确定一条边如式(4)所示。

证毕。

由式(2)和(4)可以得到感知扇形两条边与

VORONOI 边的交点,由  $\sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2} = r$  和

式(4)可以得到虚拟感知圆与 VORONOI 边的交点;由

式(3)和(4)可以得到感知扇形圆弧与 VORONOI 边的交点。

进而分别得到三角形的三条边  $e_1, e_2$  和  $e_3$ 。由海伦公式可知,三角形面积  $T$  计算如下:  $T =$

$\sqrt{d(d-e_1)(d-e_2)(d-e_3)}$ ,  $d = \frac{e_1+e_2+e_3}{2}$ 。而对

图2(d)中的扇形,知道了交点,也就知道了扇形的两条边界,从而求出扇形的夹角,得到扇形的面积,进而得到 VORONOI 单元的覆盖面积。

## 4 基于 VORONOI 图有向覆盖增强算法

基于以上的分析,本文提出基于 DCEVG 算法,将感兴趣区域划分为 VORONOI 单元;根据 VORONOI 单元与对应虚拟感知圆的几何关系,调整单元内节点工作方向,使 VORONOI 单元内部覆盖面积最大;对存在覆盖重叠邻居单元,选重叠面积最大的节点重新选择工作方向,增大有效覆盖,减小重叠概率,避免造成资源浪费;为避免无效覆盖,确定边界节点的工作方向,避免超出指定区域范围造成无效覆盖;调整之后,确认最终的工作方向。这就是 DCEVG 的基本原理。

### 4.1 DCEVG 算法实现

基于 VORONOI 图有向覆盖增强算法(DCEVG)具体步骤如下:

#### 1) 初始化

根据给定的节点,求出整个区域的 VORONOI 图,计算初始的有效覆盖率,无效覆盖率。

#### 2) 求单元内覆盖面积最大的目标位置

求出 VORONOI 单元与对应节点的虚拟感知圆之间的几何关系;

如果是表1的情况1),节点的感知方向不需调整,进入步骤3);

如果是情况(1),求出节点的感知方向区间,用最少的能耗确定节点的感知方向,进入步骤3);

如果是表1的情况2),计算方法如下:

分别求出传感扇形(两条边+圆弧段)和单元格之间的交点:传感器节点位置作为多个三角形的共同顶点,其余组成点可能为位于扇区之内的单元格顶点  $N1$ ;扇形两边和 VORONOI 边的交点设定为  $N2$ ;扇形弧和 VORONOI 边的交点设定为  $N3$ ;

将  $N1, N2, N3$  所有共  $n$  个点利用凸包排序,从左到右依次每两个点便与传感器节点一起构成一个三角形,共  $n-1$  个三角形;

如果  $n > 2$ , 利用海伦公式求出每一个三角形的面积  $s(i)$  并累加;

如果  $n < 2$ , 整个扇形区域就是单元格的覆盖面积;最大面积对应的顶点确认为新的工作方向;

如果是情形(2)、(3)这2种情况,计算方法如下:分别让感知扇形的两条边与圆心和  $n$  个 VORONOI 单元与虚拟感知圆的交点的连线重合,得到  $2n$  个扇形;

利用同表1的情况2)同样的方法计算这  $2n$  个扇形的面积;

与 VORONOI 单元重叠面积最大的就是节点的目标位置。如果面积相等,转动能耗最小的扇形就是节点的目标位置。

### 3) 重叠覆盖避免算法

判断是否有超过两个以上(包括两个)的节点选用同一顶点作为工作方向,如有,将选用同一顶点作为工作方向的所有节点视作集合 $S$ ;

针对每一集合,选出重叠面积最大的节点 $i$ ;

针对节点 $i$ 选出具有最小冗余面积的顶点作为新的工作方向。

4) 确定具有无效覆盖区域得节点,对其进行工作方向调整,减少无效覆盖。

5) 计算有效覆盖率、无效覆盖率、能效比。

## 4.2 算法分析

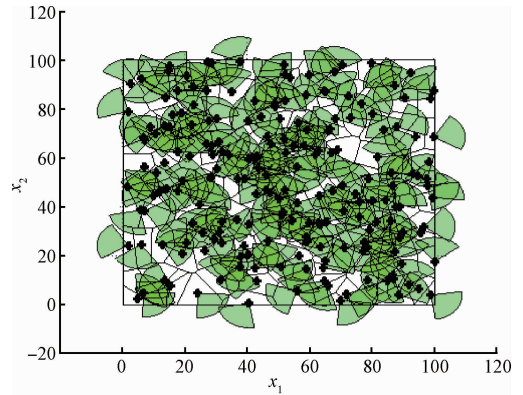
根据 VORONOI 图的特性,每个 VORONOI 单元内的子区域距离自己的生成传感器最近。单元内部覆盖面积最大化算法使每个传感器选择一个初步的工作方向,使 VORONOI 单元内部覆盖面积最大。这不仅能够达到预期的传感质量,而且还可以减少感知覆盖重叠所造成的传感器感知方向混乱。VORONOI 单元是凸多边形,顶点比边离传感器更远,利用 VORONOI 单元与虚拟感知圆的关系选择感知方向可使 VORONOI 单元内部更多区域得到覆盖,同时也避免了不同传感器使用 VORONOI 单元边作为传感方向所造成的较大重叠。单元之间重叠覆盖规避算法目的是在单元内部覆盖面积最大化算法的基础上进一步的方向控制,避免相邻传感器产生较大的覆盖重叠。基于边界节点的覆盖增强算法能确保每个传感器的全部感测区域都在感兴趣区域内,从而提高区域覆盖质量。

## 5 仿真与应用

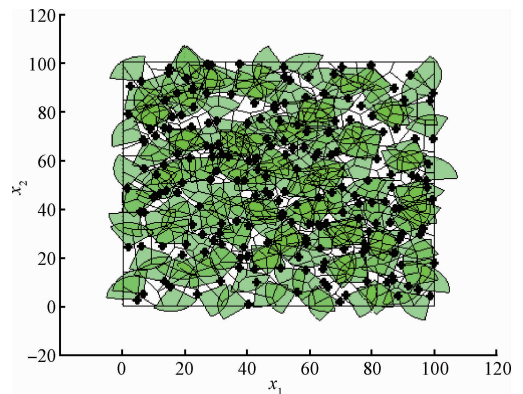
本研究采用 MATLAB 进行仿真,相关的仿真环境参数如下:感知区域大小为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ ;传感器数量为 200,视角为  $90^\circ$ ,感知半径为  $16\text{ m}$ 。DCEVG 算法分 3 步,每一步都为单独的一个算法:1) 单元内部覆盖面积最大化算法(算法 1);2) 单元之间覆盖重叠规避算法(算法 1+2);3) 基于边界节点的覆盖增强算法(算法 1+2+3)。算法 1+2+3 就是 DCEVG 算法,最后与典型的虚拟力算法<sup>[4]</sup>进行比较,进一步验证算法的有效性。性能指标为有效覆盖率、无效覆盖率、能效比 3 个指标。由于能效比是覆盖率的增量和能耗的比值。随机部署状态下覆盖率增量和能耗均未 0。所以仿真图 4(c)、5(c)、6(c)、7(c) 均没有随机部署的能效比。

图 3 所示为随机部署节点后,DCEVG 算法增强覆盖以后的仿真结果。单元内部覆盖面积最大化算法仿真结

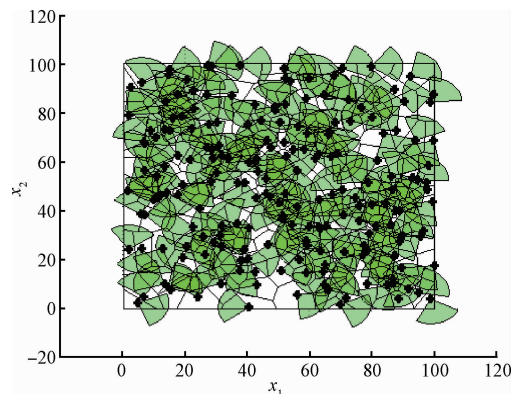
果如图 3(b)所示,单元内部有效覆盖率为 78.24%,超出区域外的无效覆盖率为 0.46%。与随机部署(见图 3(a))相比,内部有效覆盖率提升了 5.55%,外部无效覆盖率降低了 0.28%。与图 3(a)对比,可明显得看出,区域内部的空白区域(未被覆盖到的区域)减小了不少,同时边界节点覆盖超出区域的现象也有所改善。



(a) 随机部署  
(a) Random deployment



(b) 单元内部覆盖面积最大化算法  
(b) Max covering area in cell



(c) 单元之间覆盖重叠调整  
(c) Adjustment of overlap area between cells

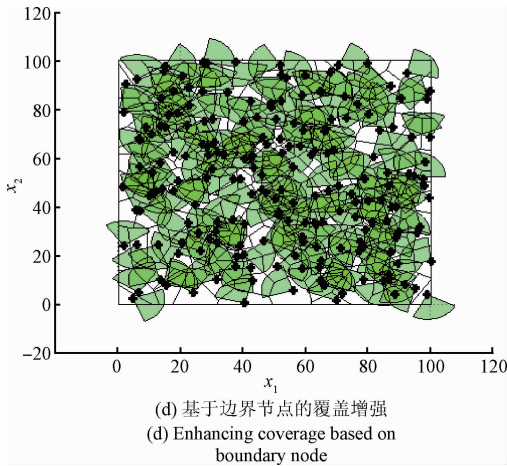


图3 覆盖增强效果

Fig. 3 Effects of coverage enhancement

调整相邻 VORONOI 单元之间的重叠情况结果如图 3(c) 所示,单元内部有效覆盖率为 79.43%,超出区域外的无效覆盖率为 1.14%。与随机部署相比,内部有效覆盖率提升了 6.74%,外部无效覆盖率升高了 0.4%。从图中可以观察到覆盖重叠得到了一定改良,但同时也出现了新的问题,为了避免重叠,不少边界节点调整方向之后造成了区域外无效覆盖。基于边界节点的覆盖增强算法仿真结果如图 3(d) 所示,单元内部有效覆盖率为 78.54%,超出区域外的无效覆盖率为 0.39%。经过 4.1 节步骤 3) 调整之后,虽然覆盖率相较于 4.1 节中步骤 2) 有所下降,但与随机部署相比,内部有效覆盖率仍是提升了 5.85%,外部无效覆盖率降低了 0.35%。经过单元内部覆盖面积最大化算法和单元之间覆盖重叠规避算法这两步调整之后,覆盖率得到明显的提升,而经过边界的调整之后覆盖率会有所下降,但始终都会比初始部署时的覆盖更好。同时也可另外解释为,无论是用何种方法确定工作方向,整体区域覆盖都得到了改善,但它仍然有限的,因为传感器的位置是固定且传感方向只能面向顶点。

### 5.1 有向传感器数量的影响

有向传感器数量的影响如图 4 所示。仿真结果表明,随着节点数量的增加,3 种算法的内部有效覆盖率,无效覆盖率,能效比都在增加。节点数量在有效覆盖率增加比较明显,最多可达 7%。而无效覆盖率降低比较明显,可比初始降低 50%。能效比在 100~200 之间低于 1,当节点数量超过 200,能效比显著升高,当节点数量为 300 时,能效比为 7。当传感器数量足够大时,内部有效覆盖率的增大速率也逐渐缓慢,而无效覆盖率和能效比增加显著。显然节点数量适中,算法才能高效率的提高覆盖率。

图 4(b) 表明,算法 1+2 导致各节点传感扇区各自分散开,散出区域范围之外。随着节点数量的增多,

VORONOI 单元变小,虽然算法 1 使 VORONOI 单元内的覆盖面积增大,算法 2 使重叠面积减少,但这使得感知方向朝向边界的数量增加,区域外的覆盖面积增大,导致无效覆盖率要比随机部署要高。但再经过 4.1 节中步骤 3) 对边界节点的调整之后,外部无效覆盖率都下降了许多,超出区域外部的覆盖面积减小,减轻了资源的浪费。

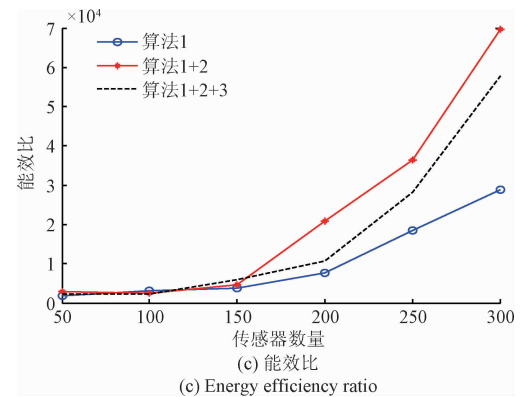
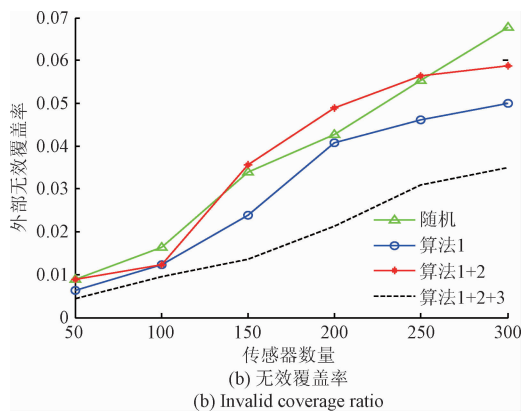
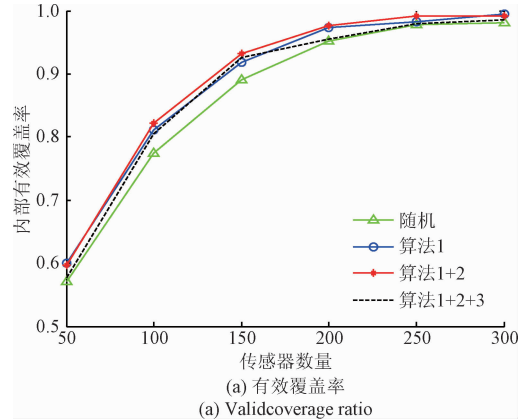


图4 传感器数量的影响

Fig. 4 Effects of number of nodes

### 5.2 感知视角的影响

感知角度的影响如图 5 所示。图 5(a) 表明,当感知角度值大于 120 时,单元内部覆盖面积最大化算法(算法 1)对内部有效覆盖率增加了将近 9%,覆盖率增加

明显。从图5(b)可以发现,当传感器视角不断增大时,扇区张角变大,超出区域外的覆盖面积明显增大,甚至超出了随机部署。而4.1节步骤2)为了调整重叠,可能导致各节点传感扇区各自分散开,散出区域范围之外,外部无效覆盖面积进一步增加。但经过4.1节中步骤3)对边界节点的调整之后,外部无效覆盖率最多可下降57%,有效减轻了资源的浪费。如图5(c)所示,当传感视角较小时,能效比较大,这时由于扇区张角较小,覆盖率增量小,消耗能量也较大。但当感知角度逐渐增大,覆盖率增量也逐渐增大,能效比开始逐渐减小,算法的效率越来越好。

### 5.3 感测半径的影响

感知半径的影响如图6所示。

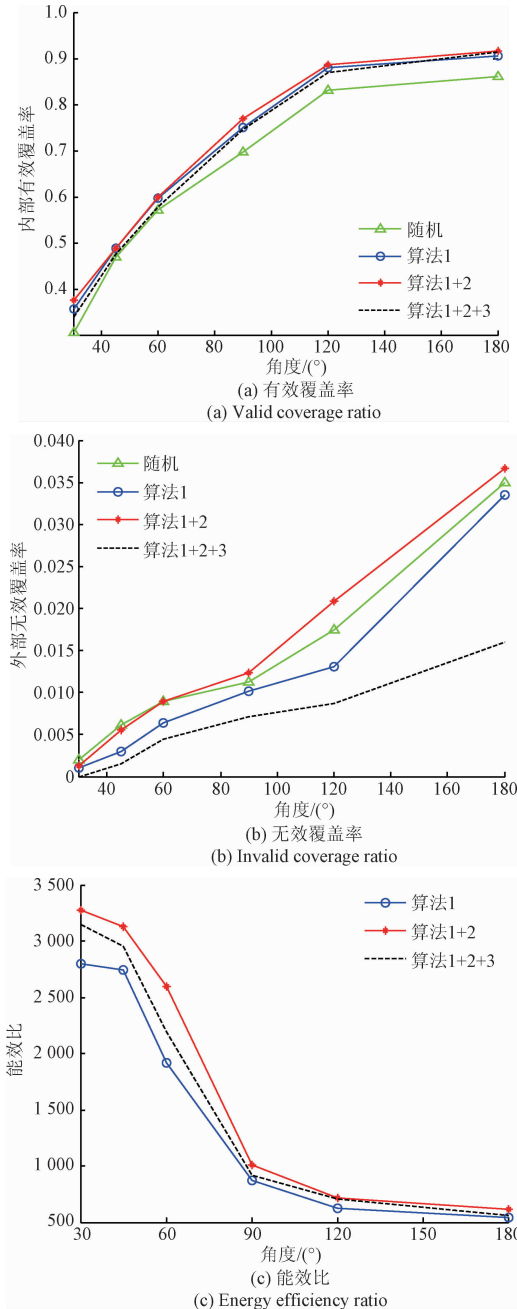


图5 传感视角的影响

Fig. 5 Effects of sensing angle

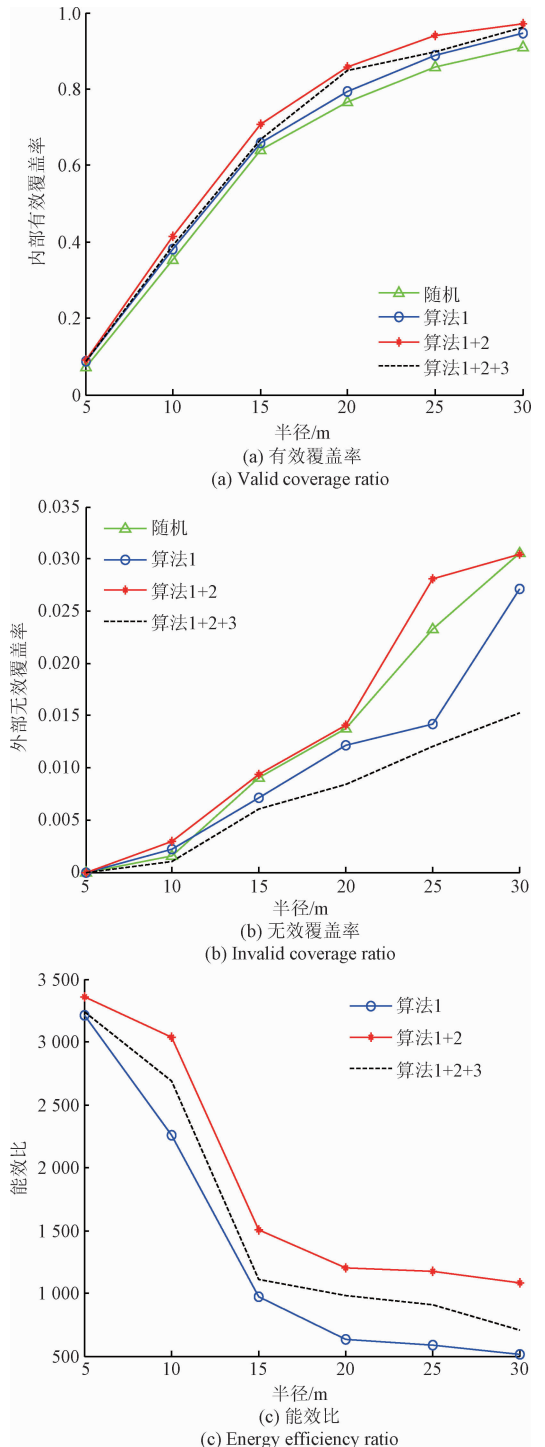


图6 感测半径的影响

Fig. 6 Effects of sensing radius

图6(a)表明,单元之间覆盖重叠规避算法(算法1+2)和单元内部覆盖面积最大化算法(算法1)的覆盖

改进更为明显,有效覆盖率增加8%左右。图6(b)表明,当传感器半径不断增大时,边界的节点覆盖超出区域外的可能性也大大提升,外部无效覆盖率明显增大,甚至超出了随机部署。但经过基于边界节点的覆盖增强算法(算法1+2+3)对边界节点的调整之后,超出区域外部的覆盖面积减小,外部无效覆盖率下降许多,最多可下降50%,效果非常明显。图6(c)表明,当传感半径较小时,能效比较大。随着半径逐渐增大,能效比开始逐渐减小。这是因为传感半径较小时,扇区覆盖面积较小,覆盖率增量小,消耗能量也较少。但当半径逐渐增大时,覆盖率增量也逐渐增大,能效比开始逐渐减小。

#### 5.4 算法对比

为了进一步验证算法的有效性,与典型的虚拟力算法<sup>[4]</sup>作比较。结果如图7所示,随着节点数量的增加,两种算法的有效覆盖率,无效覆盖率,能效比都在增加。两个算法都增加了有效覆盖率。但是无效覆盖率,DCEVG算法降低明显,最高降低了50%,而虚拟力算法对无效覆盖率降低明显,超出区域外部的覆盖面积减小,减轻了资源的浪费。这是因为虚拟力算法重点考虑节点之间的影响,没有考虑边界节点的影响。

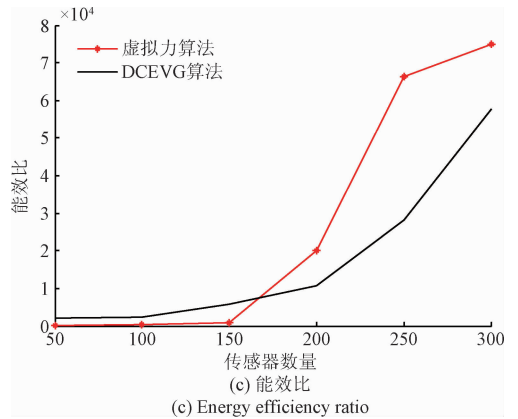


图7 结果比较

Fig. 7 Comparison results

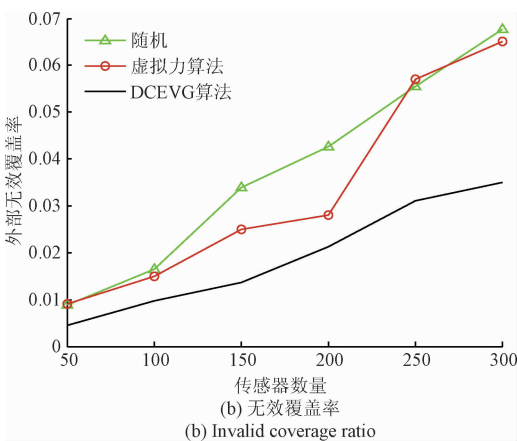
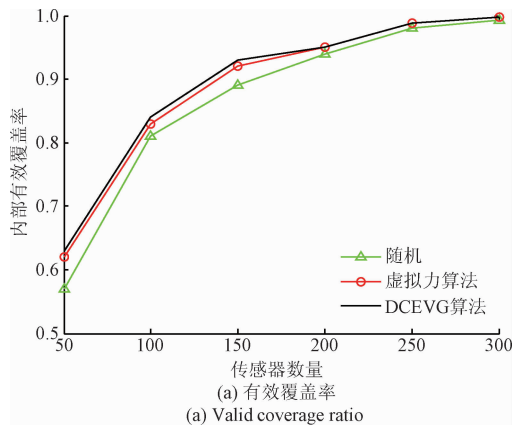
## 6 算法应用

有向传感器网络具有直观、方便、信息内容丰富等特点,主要应用于环境监控,如对机场、火车站、海关、体育场馆、停车场、商场,小水电站等场所的安全监测,突发情况下(如火灾、地震)环境的实时监控和预报等。还可以应用于智能看护,对人物(尤其是独居老人、残疾人)行为活动实时监测,对危险状况,及时警报。

本文设计一个实验,把30个人体红外传感器放置在20 m<sup>2</sup>的房间里,应用这个DCEVG算法调整其感知方向,增强区域覆盖。人体红外传感器采用HC-SR501人体感应模块。HC-SR501是基于红外线技术的自动控制模块,采用德国原装进口LHI778探头设计,灵敏度高、可靠性强、其有超低电压工作模式。其感应区域:角度100°,半径为3.5 m的扇形。人进入其感应范围则输出高电平,人离开感应范围则自动延时关闭高电平,输出低电平。随机部署后,人在房间里走来走去,18~20个传感器能够感觉到人的存在,经过DCEVG算法增强区域覆盖,人再沿着同样的路线在房间里走来走去,有24~26个传感器感觉到人的存在。这说明该算法有效增强了区域覆盖。

## 7 结论

主要研究基于VORONOI图的分布式覆盖增强算法。根据VORONOI单元与节点虚拟感知圆的关系,调整传感器的工作方向,使每一个VORONOI单元的覆盖面积最大;然后,调整重叠覆盖最大的邻居节点,将其工作方向调整为重叠面积最小所对应的顶点方向作为新的工作方向,以便在可能的覆盖重叠情况下获得最佳覆盖贡献率;最后调整边界节点的感知方向,减少无效覆盖。





仿真应用结果表明,该算法可以有效提高区域覆盖,降低无效覆盖。接下来进一步研究考虑有向移动网络的覆盖增强的实现。

## 参考文献

- [1] GUWENSAN M A, YAVUZ A G. On coverage issues in directional sensor networks: A survey [J]. *Ad Hoc Networks*, 2011, 9(7): 1238-1255.
- [2] 许江涛. 求解 WSNs 覆盖优化的改进萤火虫优化算法[J]. *电子测量技术*, 2013, 36(3): 48-52.  
XU J T. Improved glowworm swarm optimization algorithm for coverage optimization of wireless sensor networks [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2013, 36(3): 48-52.
- [3] 周海鸿, 周嘉奉. 基于 ZigBee 技术的温湿度监测系统[J]. *国外电子测量技术*, 2015, 34(7): 75-79.  
ZHOU H H, ZHOU J F. Temperature and humidity monitoring system based on ZigBee technology [J]. *Foreign electronic Measurement Technology*, 2015, 34(7): 75-79.
- [4] 陶丹, 马华东. 有向传感器网络覆盖控制算法[J]. *软件学报*, 2011, 22(10): 2317-2334  
TAO D, MA H D. Coverage control algorithms for directional sensor networks. *Journal of Software* [J]. 2011, 22(10): 2317-2334.
- [5] 谭力, 王云会, 杨明华. 一种基于虚拟力补偿的三维空间自主部署算法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(11): 2570-2578  
TAN L, WANG Y H, YANG M H, et al. Three-dimensional space self-deployment algorithm based on virtual force compensation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(11): 2570-2578.
- [6] 张洪德, 石为人, 杨磊. 基于粒子均衡的移动传感器网络覆盖控制研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(5): 1049-1057.  
ZHANG H D, SHI W R, YANG L, et al. Study on equilibrium of particle-based coverage control for mobile sensor network [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(5): 1049-1057.
- [7] HUANG J J, SUN L J, WANG R CH, et al. Improved virtual potential field algorithm based on probability model in three-dimensional directional sensor networks [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, 23(11): 591-596.
- [8] CHEN J, ZHANG L, KUO Y. Coverage enhancing algorithm based on overlap-sense ratio in wireless multimedia sensor networks [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(6): 2077-2083.
- [9] ZHANG K, DUAN CH, JIA H T. Genetic simulated annealing - based coverage - enhancing algorithm for multimedia directional sensor networks [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2015, 28(9): 1598-1609.
- [10] MORSLY Y, AOUF N, DJOUADI M S, et al. Particle swarm optimization inspired probability algorithm for optimal camera network placement [J]. *Sensors Journal*, 2012, 12(5): 1402-1412.
- [11] HONG Y, KIM J, KIM D, et al. Desperate coverage problem in mission-driven camera sensor networks [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014(1): 1-10.
- [12] MOHARNADI H, SALLEH S, ISMAIL A S. A learning automata-based solution to the priority-based target coverage problem in directional sensor networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 79(3): 2323-2338.
- [13] WANG Z B, LIAO J L, CAO Q, et al. Achieving k-barrier coverage in hybrid directional sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(7): 1443-1455.
- [14] GUWENSAN M A, YAVUZ A G. Hybrid movement strategy in self-orienting directional sensor networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(3): 1075-1090.
- [15] 蒋一波, 陈琼, 王万良. 视频传感器网络中多路径 K 级覆盖动态优化算法 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 36(4): 830-840.  
JIANG Y B, CHEN Q, WANG W L, et al. Multipath K level coverage dynamic optimization algorithm for video sensor networks [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(4): 830-840.
- [16] 贾明伟, 吴敏, 沙超. 节点相邻关系的传感网覆盖优化方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(11): 1574-1583.  
JIA M W, WU M, SHA CH, et al. Coverage optimization algorithm based on adjacent neighbors for sensor networks [J]. *Journal of electronic measurement and instrumentation*, 2015, 29(11): 1574-1583.
- [17] LI J, WANG R, HUAN H, Sun L. VORONOI-based coverage optimization for directional sensor networks [J]. *Wireless Sensor Network*, 2009, 1(5): 417-424.
- [18] SUNG T W, YANG C S. Distributed voronoi-based self-redeployment for coverage enhancement in a mobile

directional sensor network [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013(5):1-15.

- [19] SUNG T W, YANG C S. Voronoi-based coverage improvement approach for wireless directional sensor networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 39(1):202-213.

### 作者简介



范兴刚, 2004年于浙江大学获得博士学位, 现为浙江工业大学计算机学院副教授, 主要研究方向为无线传感器网络、物联网。  
E-mail: xgfan@zjut.edu.cn

**Fan Xinggang** received his Ph. D. degree in 2004 from Zhejiang University. Currently, he is an associate professor in Zhejiang University of Technology. His main research interests include wireless sensor network, Internet of thing.



王恒, 2012年毕业于山东理工大学, 现为浙江工业大学计算机学院硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络、物联网。

E-mail: 1021553563@qq.com

**Wang Heng** received his B. Sc. degree from Shandong university of technology in 2012, now he is a master student in Zhejiang University of Technology. His main research interests include wireless sensor network, Internet of thing.