

## 无线传感器网络中基于区域通信覆盖的节点定位投放算法

高翔 杨银堂 柴常春 周端

(西安电子科技大学微电子学院宽禁带半导体教育部重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 针对无线传感器网络中传感器节点投放分布对投放区域有效通信信号覆盖的影响, 该文提出了一种基于通信覆盖的分布式投放概率覆盖(DDCP)算法。在保证投放精度的前提下, 该算法根据传感器节点在投放区域中位置的不确定性以及信号衰减特性, 建立信号覆盖模型, 并通过概率优化获取传感器节点的最佳投放位置和投放数目。这样改善了区域通信覆盖, 同时提高了投放效率和节省网络资源。通过仿真比较了在不同定位投放方法下的各相关性数据, 验证了该算法实现高效投放的优越性和正确性。

**关键词:** 无线传感器网络; 接收信号强度指示器; 高斯分布; 概率分布函数

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1597-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01056

## Coverage of Communication-Based Sensor Nodes Locating Deployed Algorithm in Wireless Sensor Networks

Gao Xiang Yang Yin-tang Chai Chang-chun Zhou Duan

(Key Lab of Ministry of Education for Wide Band-gap Semiconductor Materials and Devices, Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** To eliminate the affect of the distribution of deployed sensor nodes on the coverage of effective communication signals in deployed areas for wireless sensor networks, an algorithm of Distributed Deployment of Coverage Probability (DDCP) is proposed based on the effective communication coverage in this paper. Assuring the deployed precision, DDCP is used to not only consider the environmental influence for uncertainties of the deployed positions of sensor nodes and communication signal attenuation, but also create the model of signal coverage to attain the optimal deployed locations and the number of sensor nodes. These ameliorate communication coverage, improve the effective of the deployment and save the resources through probability optimization. Through the simulations of different locating deployed strategies, relative data proves the advantage and correctness of DDCP.

**Key words:** Wireless Sensor Networks(WSN); Received Signal Strength Indicator(RSSI); Gaussian-distributed; Probability distribution function(PDF)

### 1 引言

在无线传感器网络 WSN(Wireless Sensor Networks)中, 由于采用了低开销和自组织协调工作模式的通信协议极易受到外界电磁干扰的影响<sup>[1]</sup>, 所以数据传输的各传感器节点(以下简称节点)间会随通信距离增加信号衰减而出现严重通信错误。因此, 在保证一定投放精度和节点数据稳定传输的前提下, 如何高效投放定位节点以实现整个投放区域有效通信信号覆盖的算法成为研究 WSN 通信问题的核心之一。

目前主要的研究工作多集中于随机投放节点及

相关定位算法上, 如 Meesookho 等人<sup>[2]</sup>提出了依靠源节点发出的声波信号的衰减作为信息源, 运用加权最小二乘定位节点, 但由于信号衰减的原因, 并无法保证随机投放节点都能实现区域间有效通信覆盖。文献[3]分析了给定节点数量下, 连续精确地部署节点到相应区域坐标位置, 以满足设定的区域覆盖概率 CP(Coverage Probability)来获取局部最优的投放区域, 考虑到投放节点位置选择存在不确定性和投放误差的影响, 该算法并非理想解决方案。文献[4]引入雷达 SAR 成像技术, 通过类似极大似然估计法抽样有投放误差节点的信号样本, 获取节点联合分布概率, 估计出实际节点投放位置, 完成节点的通信 CP; 研究中未考虑节点间相互通信需求, 只通过节点安装的雷达信号接收并发送信号来保持与源节点通信, 却不利于低功耗网络的部署。

以上算法基于各节点是随机投放, 易造成硬件

2009-07-29 收到, 2010-01-22 改回

国家杰出青年基金(60725415), 国家重点基础项目(B1420080204)和国家自然科学基金(60606006)资助课题

通信作者: 高翔 cowboy-gx@163.com

和网络资源浪费,而引入优化的非随机定位投放算法能有效提高节点的投放效率和节省硬件资源。当前优化的定位投放的 CP 算法又主要利用节点感知半径实现区域的感知覆盖,如 Wang 等人<sup>[5]</sup>设计了基于高斯分布的节点投放模型,通过分析计算得出节点感知区域的 CP 随节点在定位投放区域的方差增大而提高的结论;Dhillon 等人<sup>[6]</sup>则结合了地形模型,针对节点感知目标概率不确定性,提出优化 CP 使节点投放数量最小化来评估网络性能的算法,使得存在有障碍物的投放区域的感知覆盖得到改善,但是忽略保证投放精度下投放误差对 CP 的影响。文献<sup>[7]</sup>则将地形模型与投放精度相结合,考虑投放误差影响,对文献<sup>[6]</sup>的算法进行改进,提出了采取最好和最坏覆盖情形分别计算不同 MP(Missing Probability)来评估两种情形下节点分布数目的算法,并进一步通过节点感知覆盖情况做出网络性能分析。

本文研究工作依据了现有的国内外精确投放技术<sup>[8,9]</sup>,借鉴了以上区域感知覆盖算法思想和影响算法的内在因素,提出了一种新的基于通信覆盖的 DDCP(Distributed Deployment of Coverage Probability)算法。该算法根据划分的等距格点(grid)的投放环境,引用高斯分布模拟在一定投放精度下由空气阻力或者散落造成的投放误差,然后结合接收信号强度指示器 RSSI(Received Signal Strength Indicator)的分布模型,利用概率优化筛选出最佳投放位置,最终实现区域连通的有效通信覆盖。

## 2 通信信号概率分布模型和投放节点与空间格点的分布特性

### 2.1 通信信号分布概率

在 WSN 中,通过建立有效的 RSSI 衰减模型获取节点间的有效通信信号概率分布函数 PDF(Probability Distribution Function)。而划分的各格点区域的 CP 则取决于来自发射节点信号到达的衰减程度,通过比较设定的阈值判断格点区域是否被有效覆盖。

假设测试 RSSI 衰减模型测试区域是平坦无高大障碍物的地形,测试的硬件节点芯片采用的是 TI 的 CC2431。一般情况下,RSSI 会随着距离的  $n$  次方衰减,因此建立的 RSSI 信号传播模型以及参数定义如下<sup>[10,11]</sup>:

$$\text{RSSI} = -(10n \lg d + A) \quad (1)$$

式中  $A$  表示信号强度衰减的偏移量,该值在本文中定义当接收信号节点在离发送信号节点 1 m 时候的接收信号强度<sup>[12]</sup>。在测试过程中根据实际需要配置

天线,设定 RF 输入级为 20 dBm,则  $A$  约等于 40 dBm; $d$  则是通信节点间的距离。由测试结果推导出  $n$  取值范围在 $[2.75, 3.25]$ 之间,式(1)中仿真参数  $n$  取其范围内的均值 3。

通常假设 RSSI 测试结果的信号衰减包络服从的是 Rayleigh 分布<sup>[13]</sup>,并且当前测试结果的 PDF 是与平均 RSSI 值的倒数呈指数衰减变化规律<sup>[13]</sup>;由式(1)中计算得到平均的 RSSI 函数随着距离的立方衰减,表明当前测试状态下的 RSSI 的 PDF 能近似等效成与距离的立方呈指数衰减,由此推导出节点  $(a,b)$  接收到来自节点  $(x,y)$  的通信信号规范化的 PDF 数学模型:

$$p_{ab}(x,y) = \exp[-\alpha d_{ab}^3(x,y)] \quad (2)$$

其中  $d_{ab}(x,y)$  定义为节点间的距离; $\alpha$  是一个跟  $A$  值和所处的电磁环境等有关的常量。

### 2.2 投放节点与空间格点的分布特性

在 DDCP 算法中,假设投放节点的环境等间距设置成  $m \times n$  个不同格点区域,其中心位置放置 BS。当各投放节点将在实现通信有效覆盖后以多跳路由协议实现与 BS 之间数据信息的转接发任务,BS 再通过解调和压缩最终将信息发送到后端控制台。

节点投放时,考虑到存在不可抗拒的投放误差的影响,根据文献<sup>[5]</sup>引入高斯分布来模拟可控精度下的投放误差,因此节点实际投放位置  $(x',y')$  和计算得到的预投放节点位置  $(x,y)$  的偏差服从高斯分布。并且由随机试验可知,在相同的投放环境下,投放误差在  $X$  轴上和  $Y$  轴上的均方差  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  是各向均衡的,所以假设  $\sigma_x$  与  $\sigma_y$  是具有相同量纲的独立同分布变量,则根据高斯分布特征得到投放节点误差的联合概率密度函数为

$$g_{xy}(x',y') = \frac{\exp\left[-\frac{(x'-x)^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{(y'-y)^2}{2\sigma_y^2}\right]}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \quad (3)$$

因为在投放误差区域内,节点投放位置具有不确定性,根据式(2)、式(3)和全概率公式,可以推导出格点  $(a,b)$  收到来自预投放位置  $(x,y)$  的通信信号的联合条件 PDF,即通信覆盖的 CP 为

$$p'_{ab}(x,y) = \frac{\sum_{(x',y') \in \text{Sur}(x,y)} p_{ab}(x',y')g_{xy}(x',y')}{\sum_{(x',y') \in \text{Sur}(x,y)} g_{xy}(x',y')} \quad (4)$$

式中的  $\text{Sur}(x,y)$  表示节点实际投放位置相对于预投放位置的误差区域。对于整个格点区域的 CP,可表示为  $P_{xy} = \text{matrix}[p'_{ab}(x,y)]_{m \times n}$ 。

### 3 算法实现

#### 3.1 初始化

**定义** 设格点区域 $(a,b)$ 和投放节点的格点区域 $(x,y)$ , 称

$$l_{ab}(x,y) = 1 - p'_{ab}(x,y) \quad (5)$$

为格点区域 $(a,b)$ 接收来自格点区域 $(x,y)$ 通信信号的缺省概率值 LCP(Lost Coverage Probability)。

DDCP 算法通过单步引入新的投放格点区域的执行方式, 依据概率优化, 定位目标格点投放区域, 直至整个区域满足最小要求下的 CP, 最终实现全局有效通信信号覆盖。假设将 BS 放置于整个投放区域的中心位置, 作为投放区域坐标的参考原点, 天线以全向角度发射信号, 并根据式(4)计算每个格点区域接收通信信号强度的 CP。设初始值:  $K=0$ , 用来累加投放节点的个数;  $ST = \{\emptyset\}$ ,  $ST$  表示存储每一步投放的目标格点区域坐标的集合;  $CO = \{m \times n\}$ ,  $CO$  表示存储所有格点区域坐标集合, 每一步确定了投放节点的格点区域坐标后, 从  $CO$  集合中删除该格点区域, 保证格点区域不会被重复投放。称该初始化过程为 DDCP\_init, 实现如下:

```

设  $K=0$ ,  $ST = \{\emptyset\}$ ,  $CO = \text{Grid}\{m \times n\}$ ;
for  $(a,b) \in \text{Grid}$ ,  $a=1$  to  $m$  and  $b=1$  to  $n$ 
do  $p'_{ab}(0,0)$ , then do  $l_{ab}(0,0) = 1 - p'_{ab}(0,0)$ ;
end;
删除  $(0,0) \in CO$ ;  $ST \leftarrow (0,0)$ ;
定义  $M = \text{matrix}(1)_{m \times n}$ 。

```

#### 3.2 实现优化的投放策略

当完成初始化后, 算法每一步执行都将从  $CO$  里面搜寻一个新的格点区域 $(x^*,y^*)$ 作为新投放节点的目标区域, 通过遍历  $CO$  获取该优化后的投放格点区域。每引入一个投放区域, 相对于整个格点区域都会产生一个新的 LCP 矩阵。根据似然估计法, 新投放格点区域 $(x^*,y^*) \notin ST$ 与之前已投放的格点区域的形成的联合概率函数矩阵 CLCP(Collective Lost Coverage Probability)表示为

$$C = \text{matrix} \left\{ \prod_{(x,y) \in ST} l_{ab}(x,y) \times [1 - p'_{ab}(x^*,y^*)] \right\}_{m \times n} \quad (6)$$

由于无法直接通过优化 CP 获取目标格点投放区域, 因此间接的利用式(6), 并通过优化 OSP 模型(Optimal Searching Process)来获取目标投放的格点区域, 模型定义如下:

$$s_{x^*y^*} = \sum_{(a,b) \in \text{Grid}} \left\{ \prod_{(x,y) \in ST} l_{ab}(x,y) \times [1 - p'_{ab}(x^*,y^*)] \right\} \quad (7)$$

在算法的单步执行过程中, 每一次遍历  $CO$  搜寻目标格点投放区域, OSP 模型都可以产生一系列

向量值, 用向量  $S$  表示, 并分别取最小和最大向量所对应的投放区域作为单步投放最佳和最差位置, 本文依据这两种方式分别定义为最优(Best)和最差(Worst) 投放策略, 形如:

$$s_{x^*y^*} = \begin{cases} \min(s_{x^1y^1}, s_{x^2y^2}, \dots, s_{x^mymn}), & \text{best CP} \\ \max(s_{x^1y^1}, s_{x^2y^2}, \dots, s_{x^mymn}), & \text{worst CP} \end{cases} \quad (8)$$

该算法循环执行的必要条件是  $S$  向量值必须小于给定的阈值  $S\_th$ , 其实现过程如下:

```

While  $s_{x^*y^*} < S\_th$  and  $(x^*,y^*) \in CO$ 
for  $x^*=1$  to  $m$  and  $y^*=1$  to  $n$ 
if  $(x^*,y^*) \notin ST$ 
sample 1000 个样本, do  $p'_{ab}(x^*,y^*)$ ;
// 服从高斯分布
do
 $C_{ab}(x^*,y^*)_{m \times n} = \prod_{(x,y) \in ST} l_{ab}(x,y) \times [M - p'_{ab}(x^*,y^*)]_{m \times n}$ ;
//获取 CP 矩阵
then do
 $s_{x^*y^*} = \sum_{(a,b) \in \text{Grid}} \left\{ \prod_{(x,y) \in ST} l_{ab}(x,y) \times [1 - p'_{ab}(x^*,y^*)] \right\}$ ;
switch type
case (type = MIN_LCP) //选择最优投放策略
 $s_{x^*y^*} = \min(s_{x^1y^1}, s_{x^2y^2}, \dots, s_{x^mymn})$ ;
case (type = MAX_LCP) //选择最差投放策略
 $s_{x^*y^*} = \max(s_{x^1y^1}, s_{x^2y^2}, \dots, s_{x^mymn})$ ;
end;
 $K = K + 1$ ;  $ST \leftarrow (x^*,y^*)$ ; 删除  $(x^*,y^*) \in CO$ ;
else continue;
end; end;

```

通过上述过程获取各投放策略下的目标格点投放区域以及节点投放数目后, 定义格点平均 CP 来检测 DDCP 算法是否达到了整个区域的有效通信覆盖的效果, 由式(7)推导得到

$$\text{Cov}_{\text{avg}} = \frac{1 - \sum_{(a,b) \in \text{Grid}} \left( \prod_{(x,y) \in ST} s_{xy} \right)}{m \times n} \quad (9)$$

在算法中, 计算目标格点投放区域时, 矩阵计算都按照  $m$  行的列向量计算, 这样使算法的复杂度大大降低, 仅为  $O(mn)$ 。

### 4 计算机仿真

通过 MATLAB 仿真, 比较 DDCP 算法中提出的最优和最差投放策略与加入投放误差的随机投放

定位节点算法相应的网络性能参数。考虑到在保证投放精度下的误差影响,假设仿真中节点在  $X$  轴和  $Y$  轴方向上节点投放的最大误差范围均为  $1\text{ m}$ ; 参数  $\alpha$  取经验值  $10^{-4}$ ; 根据节点的感知有效范围设定相邻格点的间隔是  $8\text{ m}$ ; 节点有效通信半径为  $50\text{ m}$ ; 整个投放的感知区域面积为  $240\text{ m} \times 240\text{ m}$ , 共划分为  $31 \times 31$  个格点区域; BS 事先已经被精确布置在投放区域的中心位置, 并分别设置均方差  $\sigma_x = \sigma_y = 0.1, 0.5, 1$ 。

图 1 分别比较了在 BEST 最优投放策略、RANDOM 随机投放节点和 WORST 最差投放策略

下, 根据一组不同的阈值要求, 节点投放的数目分布变化曲线。图 1 中反映出节点在最优投放策略下, 由于算法综合分析了先前的投放结果, 因此能为每次新投放节点选择最佳投放区域, 并在保证通信区域覆盖的前提下, 获取了最小的节点投放数目, 相比随机和最差投放策略分别节省了大约 3.5 倍和最大可以达到 12 倍的硬件资源。曲线同时也反映出随着阈值  $S_{th}$  增大, 节点投放数目呈减小趋势, 主要原因在于该阈值是反映整个投放区域的 CLCP 变化的特征值, 阈值越大 CLCP 也越大, 说明有效通信 CP 减小的原因是投放节点数目减小造成的。

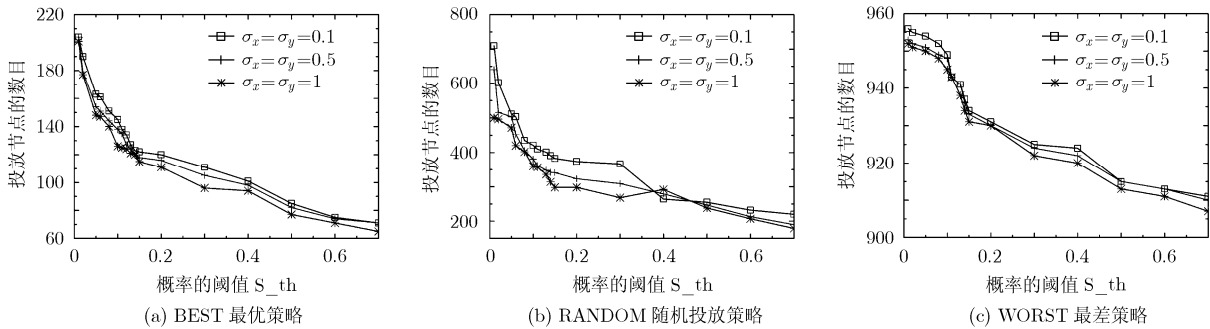


图 1 当  $\sigma_x = \sigma_y$  分别为 0.1, 0.5, 1 时, 不同投放策略下的投放节点数目随概率阈值化曲线

图 2 显示各阈值限制下的最优、随机和最差投放策略下实现的整个投放区域的平均通信 CP。因为由图 1 知各投放策略下投放节点数目差异很大, 并且投放越多节点平均 CP 越高, 可通过在一定阈值要求下, 对满足不同的平均 CP 选择不同投放策略。多数情况下, 考虑到投放成本和硬件资源, 选择最优投放策略。

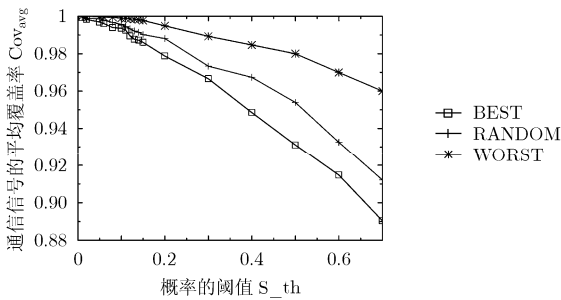


图 2 不同投放策略下的格点平均接收通信信号覆盖率 ( $\sigma_x = \sigma_y = 1$ )

图 3 给出了当  $\sigma_x = \sigma_y = 1, S_{th} = 0.7$  时, 在最优投放策略下, 节点在整个区域相应格点上投放的位置分布图, 中心区域是 BS 基站主节点的位置。图 3 表明在虚线划分的空间中, 该策略下的节点投放数目接近于平均数 3 左右, 符合在空间大小为  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ , 对角线距离  $70.7\text{ m}$ , 在通信半径为  $50\text{ m}$

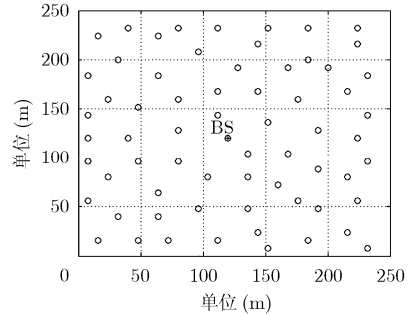


图 3 最优情形下节点投放位置以及 BS 中心位置分布图 ( $\sigma_x = \sigma_y = 1, S_{th} = 0.7$ )

时至少投放 3 个节点能保证通信连通的拓扑要求, 同时反衬出了 DDCP 算法的正确性和指导节点投放的高效性。

表 1 为不同投放策略下的节点平均连通度, 反映出高连通度的获取是以牺牲大量硬件资源获取的; 然而高连通度能保证网络通信的顺畅, 所以在各项性能指标的指导下, 算法受到均衡的制约, 很难用一个统一标准评价算法优劣, 所以该算法只是满足特定情况下的优化算法。

### 5 结束语

在大规模 WSN 节点部署中, 利用节点信号衰减和投放误差分析模型, 提出了一种兼顾区域通信

表 1 节点的平均连通度  $\sigma_x = \sigma_y = 1$ 

S_th	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
最优投放策略	12	11	10	9	8	7	6
随机投放策略	50	33	32	27	26	21	20
最差投放策略	113	108	102	98	95	92	90

信号覆盖和节点数目优化投放的 DDCP 算法。该算法利用单步投放优势, 避免因连续投放需要大量重复的计算量, 节省了一定的计算时间, 并节约了大量的硬件资源。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang Yan and Kitsos Paris. Security in Rfid and Sensor Networks [M]. 1 Edition, Florida:CRC press, 2009: 306-310.
- [2] Meesookho C, Mitra U, and Narayanan S. On energy-based acoustic source localization for sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(1): 365-377.
- [3] Clouqueur T, Phipatanasuphorn V, and Ramanathan P, *et al.*. Sensor deployment for target detection [C]. Proceeding of International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta,USA, 2002: 42-48.
- [4] Ananthasubramaniam B and Madhow U. On localization performance in imaging sensor nets [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(10): 5044-5057.
- [5] Wang De-min, Xie Bin, and Agrawal D P. Coverage and lifetime optimization of wireless sensor networks with Gaussian distribution [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(12): 1444-1458.
- [6] Dhillon S S and Chakraborty K. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Los Angeles, USA, 2003, 3: 1609-1614.
- [7] Onur E, Ersoy C, and Delic H. Surveillance wireless sensor networks: deployment quality analysis[J]. *IEEE Network*, 2007, 21(6): 48-53.
- [8] Fanucci J P, Gravelle N, and Maass D. Precision aerial delivery of payloads [P]. US, 2007/0018033 A1, 2007.
- [9] Knudson C, Moratz M, and Altamura F. The future of gun-fired precision munitions. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA490302>. 2008: 1-3.
- [10] Chen Wan-ming, Mei Tao, and Sun Lei, *et al.*. Error analyzing for RSSI-based localization in wireless sensor networks[C]. Intelligent Control and Automation, Hefei, China, 2008: 471-478.
- [11] 于海斌, 曾鹏, 梁韡. 智能无线传感器网络系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 190-194.  
Yu Hai-bin, Zeng Peng, and Liang Wei. Intelligent Wireless Sensor Networks [M]. Beijing: Science Press, 2006: 190-194.
- [12] Zemek R, Hara S, and Yanagihara K, *et al.*. A joint estimation of target location and channel model parameters in an IEEE 802.15.4-based wireless sensor network[C]. Conference on IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens, Greece, 2007: 1-5.
- [13] Hara S, Zhao Da-peng, and Yanagihara K, *et al.*. Propagation characteristics of IEEE 802.15.4 radio signal and their application for location estimation [C]. Vehicular Technology Conference, Stockholom, Sweden, 2005, 1: 97-101.

高翔: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络以及NOC片上网络系统设计。

杨银堂: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线传感器网络与VLSI集成电路设计。

柴常春: 男, 1960年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为集成电路设计与系统集成。

周端: 女, 1957年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为无线传感器网络、计算机控制以及SOC设计技术。