

文章编号: 2095-4980(2013)01-0091-05

## 基于无线传感器网络的移动机器人导航方法

贾思强<sup>a</sup>, 高翔<sup>a</sup>, 陆起涌<sup>a,b</sup>

(复旦大学 a.电子工程系, 上海 200433; b.无锡研究院, 江苏 无锡 214131)

**摘要:** 为移动机器人在无定位信息的无线传感器网络(WSN)中选择路程短、代价低的导航路径, 提出了一种基于无线传感器网络的移动机器人导航方法, 包括全网络导航路径规划和局部节点趋近算法。该方法通过结合各节点传感器数据, 构造代价函数, 在网络中建立伪梯度势场, 为移动机器人规划最优路径; 移动机器人通过探测接收信号强度指示(RSSI), 逐一趋近该路径上的传感器节点到达目标节点。仿真结果表明, 该方法能够根据移动机器人的导航要求, 引导移动机器人迅速沿最优路径到达目标节点。

**关键词:** 伪梯度势场; 代价函数; 接收信号强度指示; 导航算法; 无线传感器网络  
**中图分类号:** TN915; TP393 **文献标识码:** A

## Navigation method for mobile robot based on Wireless Sensor Networks

JIA Si-qiang<sup>a</sup>, GAO Xiang<sup>a</sup>, LU Qi-yong<sup>a,b</sup>

(a.Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China; b.Wuxi Research Institute, Wuxi Jiangsu 214131, China)

**Abstract:** A new navigation method for mobile robot based on WSNs, including whole network navigation path planning and local node approaching algorithms, is proposed to provide navigation path with minimal distance and lowest cost in location-free Wireless Sensor Networks(WSNs). The method constructs cost function by combining sensor data, and builds a pseudo-gradient potential field to plan the best path for mobile robot. Mobile robot approaches the nodes on the path individually by detecting Receiving Signal Strength Indicator(RSSI). Simulations show that the method can guide mobile robot to the target node rapidly according to its navigation requirements.

**Key words:** pseudo-gradient potential field; cost function; Receiving Signal Strength Indicator; navigation algorithm; Wireless Sensor Networks

无线传感器网络与移动机器人技术的结合, 可以使两者形成优势互补, 极大地发挥各自长处<sup>[1]</sup>。无线传感器网络(WSN)可为移动机器人建立多参数的实时环境地图, 各传感器节点引导移动机器人沿优化路径到达指定区域作业, 提高了系统的适用性和灵活性。

基于 WSN 的移动机器人导航问题包括 2 个方面: 如何通过 WSN 为移动机器人规划最优路径, 移动机器人如何行驶到该路径上的各个节点。解决方法依据 WSN 是否具有定位能力而划分。文献[2-3]作者研究了具有 GPS 定位能力的机器人与网络传感器协作提供网络定位服务, 路径规划和导航。文献[4]利用节点定位信息和传感数据融合, 根据最小代价原则为移动目标规划导航路径。文献[1,5-6]分别借助超声波和 RSSI 定位技术在 WSN 导航机器人, 但其定位精确度和可扩展性仍待提高。不借助定位信息的导航方法主要依靠网络跳数信息和梯度势场。Reich 和 Sklar 等人提出的算法依据最小跳数在 WSN 中导航机器人, 进行搜寻和救援<sup>[7]</sup>。文献[8]通过网络跳数信息建立梯度势场, 并结合节点传感数据规划路径。文献[9]中算法结合接收信号强度(RSS)和跳数信息在 WSN 中建立伪梯度势场, 取得了较好的导航效果; 另一方面, 现有文献中的方法, 除依靠其他定位或测距技术, 主要利用 RSSI 检测使机器人趋近各个节点。文献[10]借助定向天线使机器人可以判断接收信号方向从而趋近节点, 但增加了硬件开销。Sheu 等人设计的智能移动机器人通过直角转向导航算法实现向各节点趋近<sup>[11]</sup>。文献[12]分析了利用 RSSI 趋近节点的可行性, 并提出了具体的趋近算法。

收稿日期: 2012-08-20; 修回日期: 2012-09-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2011AA100701)

上述文献中大部分仅考虑了导航优化路径的距离因素,而结合节点传感数据的综合考虑较少,另外对于如何引导移动机器人趋近节点也缺乏对比研究。本文主要研究基于无定位信息的 WSN 的移动机器人导航,在文献[9]算法基础上结合节点传感数据,不同于以往算法只考虑单节点传感数据,提出了一种伪梯度—累积代价最小算法规划最优路径,并依靠本文提出的节点趋近算法使得移动机器人可迅速沿规划路径到达目标节点。

## 1 基于 WSN 的移动机器人导航方法

本文提出的导航方法分为 2 步,首先目标节点以 CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access/Collision Detect) 方式进行广播,使得网络建立起相关的拓扑信息和环境信息,通过在传感器节点上运行导航路径规划算法,为移动机器人计算出优化路径,而后移动机器人与该路径上的传感器节点进行无线通信,并通过局部节点趋近算法逐一行驶到各节点,最终到达目标区域。

### 1.1 WSN 导航路径规划

#### 1.1.1 累积代价函数

文献[9]中引入了接收信号强度作为评判每一跳节点间距离的指示,进而通过式(1)在网络中建立关于位置的伪梯度势场,移动机器人根据该势场选择路径到达目标节点。式中,  $pseu\_g_{node}^i$  代表当前节点  $i$  收到的上一跳节点的伪梯度值,乘以 RSS 和跳数 Hop-Count 的比值,其中 RSS 需进行归一化处理,计算得当前节点的伪梯度值。

$$pseu\_g_{calc}^i = pseu\_g_{node}^i \cdot \left[ \frac{(RSS_i)}{(Hop-Count_i)} \right] \quad (1)$$

基于文献[9]的算法,当前节点的伪梯度值与目标节点的最大伪梯度值  $pseu\_g_{MAX}$  之差在一定程度上可以反映当前节点与目标节点的距离,因而可以作为构造代价函数中的距离因素。另一方面,实际的导航路径还需考虑所经过的各传感器节点的采样值,而以往算法中只根据单节点数据进行优化的方法无法解决总路径累积代价最优的问题,因此构造如下的累积代价函数:

$$C_i = \begin{cases} +\infty & \text{if}(U_{i-all} = U_{DG}) \\ \alpha(pseu\_g_{MAX} - pseu\_g_{calc}^i) + \beta(U_{acc}^i + U_{i-all}) & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $U_{i-all}$  代表节点  $i$  融合自身各传感数据后的值;  $U_{acc}^i$  代表节点  $i$  上一跳及其以前所有节点传感数据值的累积值;  $\alpha$  和  $\beta$  是 2 个因素的权重系数,如传感数据值超过系统危险值  $U_{DG}$ , 则将该节点的代价函数取为无穷大,使路径排除此节点。

#### 1.1.2 伪梯度—累积代价最小算法

每个节点在建立关于目标节点的路径信息时运行该算法,算法的详细流程如下:网络设定最大伪梯度值  $pseu\_g_{MAX}$ , 如果节点为目标节点则将自身跳数设为 0, 伪梯度值最大; 如果节点不是目标节点, 则节点监听来自邻居节点的路由消息, 包括跳数、接收信号强度、伪梯度值和传感数据, 同时根据不同邻居节点的信息通过式(1)和式(2)分别计算出相应的当前节点伪梯度值和累积代价函数值, 该环节使得节点不断更新关于其邻居节点的路由信息; 如果节点发现以某邻居节点为父节点可以使得节点跳数或累积代价变小, 或者伪梯度值变高, 则将自身数据打包广播出去。该算法使得传感器节点始终保存最小跳数、最高的伪梯度值和最小的累积代价, 同时记录下周围邻居节点的路由信息。由于仅广播最优值, 该算法有效控制了网络泛洪过程, 该过程结束后 WSN 即可确定符合导航要求的最优路径。

### 1.2 移动机器人局部节点引导

利用探测 RSSI 的方法不需要其他辅助技术,移动机器人可沿信号强度变化趋势向优化路径上的各节点靠近。但由于实际环境的复杂多变,场强分布和 RSSI 测量都掺入噪声<sup>[13]</sup>,所以机器人实际的趋近路线比理想情况曲折很多,且在此过程中需要多次的方向探测和校正。

#### 1.2.1 移动机器人趋近方向探寻

如图 1 所示,当移动机器人从  $R(0)$  位置尝试向正方形的 4 个顶

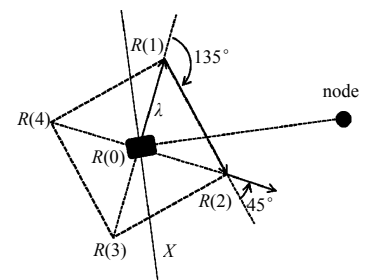


Fig.1 Diagram of robot approaching heading search  
图 1 移动机器人趋近方向探寻示意图

点行驶时，如果步长距离  $\lambda$  合适，则 4 个顶点的 RSSI 与  $R(0)$  处之差会呈现两正两负，依据这种正负关系，移动机器人可以在尝试到达任意 2 个顶点后将行进方向限制在一个对角线交叉的直角范围内。由此设计出移动机器人趋近方向探寻的方法：

- 1) 移动机器人从位置  $R(I)$  沿随机方向  $\theta(i)$ ，移动  $\lambda$  步长到达顶点  $R(i)$ ，记录信号强度  $P(i)$ ；
- 2) 机器人原地旋转  $-135^\circ$ ，并行驶  $\sqrt{2}\lambda$  距离到达顶点  $R(i+1)$ ， $\theta(i+1) = \theta(i) - 90^\circ$ ；
- 3) 分别比较 3 处场强  $\Delta P(i) = P(i) - P(i-1)$ ， $\Delta P(i+1) = P(i+1) - P(i-1)$ ，选择绝对值较大的差  $\Delta P(j)$ ；
- 4) 确定下一步趋近方向  $\theta(I+1) = \theta(j) + [1 - \text{sign}(\Delta P(j))] \times 90^\circ$ ；
- 5) 计算下一步目标位置  $R(I+1)$ ，由当前位置  $R(i+1)$  向其移动，并在到达后调整到对应的对角线方向。

### 1.2.2 移动机器人局部节点趋近算法

算法的具体过程如下：移动机器人每移动步长距离后，比较当前 RSSI 是否超过阈值来判定是否已经到达目标节点，或者是否已经成功趋近当前节点准备向下一节点趋近；机器人按当前方向行驶，同时记录下当前信号强度  $P(i)$ ，并分别与前两步移动时的信号强度  $P(i-1)$  和  $P(i-2)$  做差得到  $DeltaOne$  和  $DeltaTwo$ ，如  $DeltaOne < DeltaTwo$  则保持当前趋近方向不变，否则即表明信号强度有减弱的趋势，调用趋近方向探寻子函数重新确定行驶方向。需要说明的是，移动机器人处于不同局部区域与节点实际距离不同，移动步长距离所影响的信噪比也不同，即在较远区域需移动较大步长才能较准确地确定趋近方向，在较近区域较小的步长就可以确定趋近方向。因而算法中利用  $AjustStep(P(i))$  函数，根据当前信号强度选取合适的移动步长，例如可采用分段、线性或指数形式的对应关系。

## 2 实验及结果

本文利用 CC2420 无线模块模型在 OMNET++ 4.1 平台进行仿真，仿真结果由 Matlab 作图呈现。

### 2.1 WSN 导航路径规划仿真

在  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  空间里随机分布 100 个节点，并在 0~2 500 范围内随机赋值各节点传感数据以代表节点采样得到的环境污染指数，从而建立一个 WSN，见图 2。图 3(a) 为根据文献[9]算法且设定最大梯度值为 20 000 做出的伪梯度势场图。在此基础上图 3(b) 兼顾路径累积污染指数和，根据本文提出的伪梯度—累积代价最小算法，并令式(2)中  $\alpha=1$ ， $\beta=0.3$  做出的伪梯度势场图。图 3 中标出了 WSN 为移动机器人规划的导航路径。

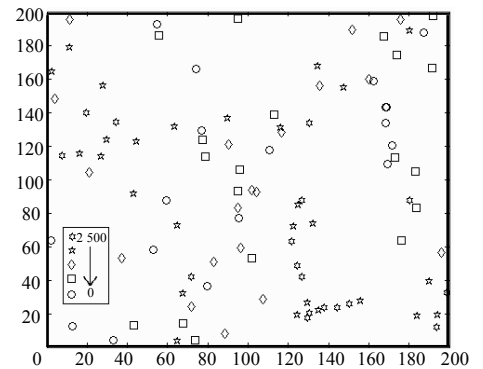


Fig.2 WSN nodes and sensor data distribution map  
图 2 WSN 节点及传感数据分布图

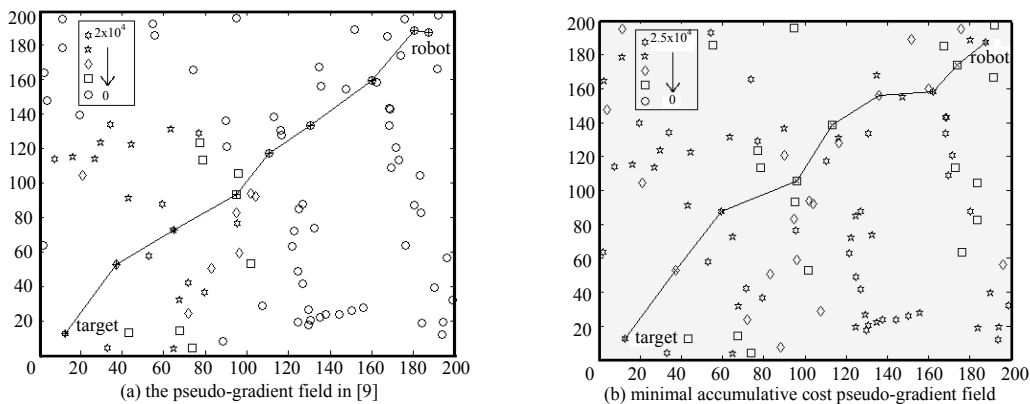


Fig.3 Mobile robot moving to target following the pseudo-gradient field  
图 3 移动机器人根据伪梯度势场驶向目标节点

为了验证本文提出的算法的有效性，将 3 种算法进行对比，文献[9]中的伪梯度算法，本文提出的伪梯度—累积代价最小算法和以跳数为梯度选取累积代价最小路径算法(以下

表 1 不同算法得出的导航路径结果

Table1 Results of navigation paths based on different algorithms		
	total distance/m	contamination
algorithm in [9]	254.28	9 650
algorithm 3	278.00	5 450
proposed algorithm	260.29	5 850

简称算法 3)。通过仿真得出 3 种不同的优化路径，在图 4 中标出。由表 1 中仿真结果，文献[9]的算法选取了总距离最短的路径，没有考虑节点污染指数，其累积污染指数和最高；算法 3 在最小跳数的前提下选取了累积污染指数和最低的路径，但其总距离最长；本文提出的算法兼顾了 2 种因素，依据累积代价最小原则选取了路径较短且累积污染指数和较低的路径，证明了算法的有效性。事实上，算法 3 和文献[9]算法的结果是本文算法结果的两个极端表现。

### 2.2 移动机器人局部节点趋近仿真

出于对实际情况的考虑，在仿真环境中利用断点衰减模型叠加 log 正阴影衰减模型，且引入较大的噪声干扰，同时使得各算法的效果差异更明显。由于文献[11-12]的算法并没有采用变步长的方法，而从后文的结果中可以看到在机器人趋近过程中不同的局部区域采用不同的行驶步长是合理的，将文献[11-12]中的算法作了可变步长的改进，与本文提出的算法作了对比，3 种算法均根据当前信号强度采用分段方式调节行驶步长。图 5 中分别给出了 3 种算法趋近节点路径的仿真示例图，机器人从(10,10)位置向(40,40)处节点趋近，为了展示清晰，图中省去了机器人在方向探寻过程中的移动轨迹。

将用 4 种算法的节点趋近路径长度经过多次实验平均化后得出结果绘于图 6。从结果中可看出对于可变步长的改进有助于缩短趋近路程，且对于较远距离时效果更明显。本文提出的算法相比于文献[11-12]的改进算法较大地缩短了趋近路程长度，原因在于本算法中趋近方向探寻方法可有效确定下一步的趋近方向，同时从探寻位置直接向下一目标位置行驶，减少不必要的移动；算法主体在每次更新时一旦发现信号强度下降，则及时重新探寻趋近方向，而不依赖于当前行驶方向，降低因以前错误移动而连续限制趋近过程的影响，迅速寻找信号强度增长最快的趋近方向。

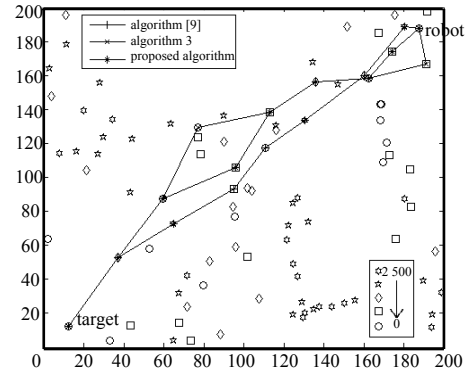


Fig.4 Navigation paths based on different algorithms  
图 4 基于不同算法的导航路径

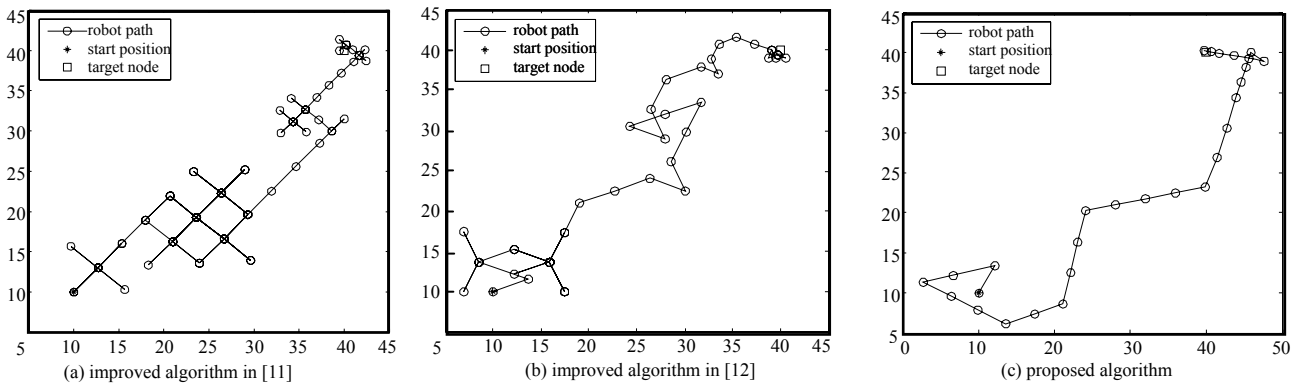


Fig.5 Simulation examples of robot approaching paths based on different algorithms  
图 5 移动机器人按不同算法趋近局部节点路径仿真示例图

### 3 结论

本文针对基于无定位信息的 WSN 的移动机器人导航问题提出了相应的解决方法。该方法可根据导航要求，在 WSN 以累积代价最小原则建立伪梯度势场，将规划导航路径任务分配给了无线传感器节点，机器人仅需具备逐一趋近节点的能力。仿真验证了伪梯度—累积代价最小算法的有效性，通过对比表明了节点趋近算法快速引导机器人驶向路径节点的优势。利用伪梯度势场可以使移动机器人在 WSN 任意位置沿梯度选取最优路径到达目标节点，并且如果限制合适的梯度下降范围，或使机器人有自主蔽障能力，则该方法可被扩展为利用 WSN 为移动机器人进行蔽障导航。

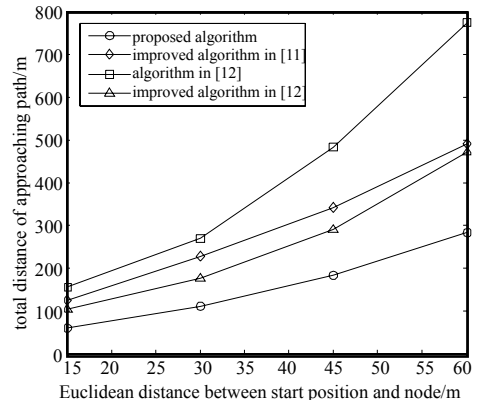
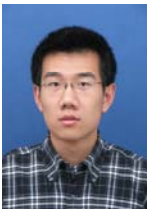


Fig.6 Comparison of robot approaching path distances  
图 6 移动机器人节点趋近路径长度比较

## 参考文献：

- [ 1 ] Lee Woo-Yong,Hur Kyeong,Eom Doo-Seop. Navigation of mobile node in wireless sensor networks without localization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. Seoul:[s.n.], 2008:1-7.
- [ 2 ] Keith Kotay,Ron Peterson,Danieela Rus. Experiments with robots and sensor networks for mapping and navigation[C]// Proceedings of International Conference on Field and Service Robotics. Port Douglas,Australia:[s.n.], 2005:243-254.
- [ 3 ] Verma Atul,Sawant Hemjit,Tan Jindong. Selection and Navigation of Mobile Sensor Nodes Using a Sensor Network[C]// Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Kauai Island:[s.n.], 2005:41-50.
- [ 4 ] 梁华为,陈万明,李帅,等. 基于无线传感器网络的移动目标导航方法[J]. 传感技术学报, 2007,20(7):1620-1624. (LIANG Huawei,CHEN Wanming,LI Shuai,et al. Navigation Algorithm for Mobile Object Based on Wireless Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007,20(7):1620-1624.)
- [ 5 ] 刘贞,丁明理,王祁. WSN 多节点决策信息融合在机器人自主导航中的应用[J]. 电子学报, 2008,36(12):2299-2305. (LIU Zhen,DING Mingli,WANG Qi. Implementation of WSN Multi-Node Decision Information Fusion in Autonomous Navigation of Robot[J]. Acta Electronica Sinica, 2008,36(12):2299-2305.)
- [ 6 ] Awad Abdalkarim,Frunzke Thorsten,Dressler Falko. Adaptive Distance Estimation and Localization in WSN using RSSI Measures[C]// 10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures,Methods and Tools. Lubeck:[s.n.], 2007:471-478.
- [ 7 ] Reich Joshua,Sklar Elizabeth. Robot-Sensor Networks for Search and Rescue[C]// Proceedings of IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics. Gaithersburg,MD,USA:[s.n.], 2006.
- [ 8 ] Li Qun,Rosa De Michael,Rus Daniela. Distributed Algorithms for Guiding Navigation across a Sensor Network[C]// Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. San Diego:[s.n.], 2003:313-325.
- [ 9 ] Deshpande Nikhil,Crant Edward,Henderson C Thomas. Experiments with a pseudo-gradient algorithm for target localization using wireless sensor networks[C]// 2010 IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. Salt Lake City:[s.n.], 2010:74-79.
- [10] Jiang Jehn-Ruey,Lai Yung-Liang,Deng Fu-Cheng. Mobile Robot Coordination and Navigation with Directional Antennas in Positionless wireless sensor networks[C]// Proceedings of the International Conference on Mobile Technology,Application, and Systems. Yilan:[s.n.], 2008:1-7.
- [11] Sheu Jang-Ping,Cheng Po-Wen,Hsieh Kun-Ying. Design and implementation of a smart mobile robot[C]// IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing,Networking and Communications. Montreal,Que:[s.n.], 2005:422-429.
- [12] LI Xiaohai,WANG Yu,XIAO Jizhong. Topological navigation of mobile robot in a wireless sensor network[C]// Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. Taipei:[s.n.], 2011:1065-1070.
- [13] 姚俊邑,傅焯. 基于CC2431实现的无线传感器网络定位[J]. 信息与电子工程, 2010,8(3):257-260. (YAO Junyi,FU Xuan. Location estimation based on CC2431 RF transceiver in WSN[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(3):257-260.)

## 作者简介：



贾思强(1987-), 男, 哈尔滨市人, 在读硕士研究生, 主要从事无线传感器网络、嵌入式系统方面的研究 .email:10210720032@fudan.edu.cn.

高翔(1989-), 男, 上海市人, 在读硕士研究生, 主要从事无线通信方面的研究.

陆起涌(1966-), 男, 江苏省太仓市人, 副教授, 主要从事智能控制、嵌入式系统、物联网技术等方面的研究.