

An Energy Efficient Three-Dimensional Coverage Control Algorithm for Wireless Sensor Networks

ZHANG Bao-li, YU Feng-qi*, ZHANG Zu-sheng

(Department of Integrated Electronics Shenzhen Institute of Advanced Technology, CAS Shenzhen 518067, China)

Abstract: In wireless sensor networks (WSNs), a large number of sensor nodes are randomly deployed. Thus many redundant nodes are generated. The coverage control of the network and utilization of redundant nodes become an important problem in WSN. In this paper, the coverage problem is studied and a distributed energy efficient three-dimensional coverage control algorithm is proposed. The performance of the proposed algorithm is simulated using OPNET.

Key words: wireless sensor network (WSN); coverage; three-dimensional; energy efficient
EEACC: 6150P

一种能量有效的三维传感器网络覆盖控制算法

张宝利, 于峰崎*, 张足生

(中科院深圳先进技术研究院, 集成电子研究中心, 广东 深圳 518067)

摘要: 由于无线传感器网络节点部署是随机的而且数量巨大, 会产生很多冗余的节点, 因而对网络进行覆盖控制提高冗余节点的利用率就成为一个亟待解决的问题。针对无线传感器网络中的三维覆盖问题进行了深入的研究, 提出了一种分布式能量有效的三维覆盖控制算法, 并利用 OPNET 网络仿真软件对其性能进行了验证。

关键词: 无线传感器网络(WSN); 覆盖; 三维; 能量有效

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2009)02-0258-06

在构建无线传感器网络时, 网络覆盖是无线传感器网络 (WSN, Wireless Sensor Network) 的基本问题之一。WSN 覆盖问题可以看作是在 WSN 节点的能量、无线通信、网络计算处理能力等资源普遍受限的情况下, 通过网络节点、路由选择等手段, 最终使 WSN 的各种资源得到优化分配, 进而使各种服务质量得到改善。如何根据不同的应用环境需要, 对 WSN 进行不同级别的覆盖控制就成了 WSN 中一个基本且亟待解决的问题。在真实的物理环境中部署传感器网络, 反映到理论上就是在三维空间中部署传感器网络, 因而对三维空间覆盖问题研究能更加真实反映网络“感知服务”质量, 为网络监测控制提供更加可靠的依据。

本文首先对现有的一些主流覆盖控制算法进行了简单介绍, 接着在第三部分对提出的三维覆盖控

制算法相关问题进行了详细阐述, 包括相关模型的选择、算法实施过程及性能优化方法, 最后给出算法仿真结果和简单总结。

1 相关问题

现有的覆盖控制算法多数只适用于二维空间, 主要有如下几种典型的算法: 文献[1-2]从理论和统计的最好和最坏情况出发描述了覆盖问题, 提出了最好与最坏情况的覆盖; 在文献[3]中, 作者采用“活跃”和“休眠”节点覆盖控制协议, 有效地延长了网络的生存时间; 在文献[4]作者提出了一种基于网格的覆盖控制算法; 在文献[5]中将随机节点覆盖类型的圆周覆盖归纳为决策问题, 作者进一步在文献[6]中使用三维圆球覆盖影射为二维圆周覆盖的方法, 在不增加计算复杂性的前提下, 使用分布式方式解决

收稿日期: 2008-07-15 修改日期: 2008-12-25

了三维圆球体覆盖问题;在文献[7]中提出“目标暴露”覆盖模型;在文献[8]中作者通过选择连通的传感器节点路径来得到最大化的网络覆盖效果;在文献[9]中对同时取得一定覆盖度和连通度的动态网络协议进行了分析和设计;在文献[10]提出了 ASCENT 协议;在文献[12]中的 SPAN 协议提出了节省能量技术,在不减弱链路容量和连通性的前提下减少能量消耗;在文献[13]中,提出了一种动态的覆盖配置协议,然后结合 CCP 算法和 SPAN 算法来保持连通和覆盖。我们通过对上述各种算法综合分析发现,这些算法能够很好解决二维空间覆盖问题,但是应用在三维空间覆盖上存在很大的局限性,我们针对网络部署、监测的实际情况,提出了一种能量有效的分布式三维覆盖控制算法。

2 三维覆盖控制算法的设计

2.1 相关模型的选择

覆盖问题是研究 WSN 对某块给定区域的覆盖程度问题,涉及到网络中各个方面,包括节点、网络的选择以及网络部署等各方面问题,因此选择合适的传感器感知模型、网络模型、网络部署模型和覆盖模型是研究覆盖问题的前提。

2.1.1 节点的感知模型

选择合适的节点感知模型对于提高网络的感知服务质量有着重要意义,我们综合考虑了网络的实际情况,提出了一个适用于三维空间的感知模型:0-1 感知模型。

在真实的应用环境中,传感器节点 S 的覆盖范围是一个以节点为圆心,半径为 R_s 的球形区域(该球形区域称为传感器节点的“感知圆球(B)”, R_s 称为传感器节点的感知半径)。在三维感知模型中,节点 $S(x_s, y_s, z_s)$ 对于空间中任意一点 $M(x_m, y_m, z_m)$,节点 S 检测到点 M 处发生的事件的概率为

$$P(S, M) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } d(S, M) < R_s \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $d(S, M) = \sqrt{(x_s - x_m)^2 + (y_s - y_m)^2 + (z_s - z_m)^2}$ 为点 M 与节点 S 之间的欧拉距离。

2.1.2 网络模型

对于传感器节点集合 $S = \{s_1, s_1, \dots, s_n\}$, n 个节点随机部署在一个长方体三维空间区域 R_3 不同层次中,每一个节点 s_i , ($i = 1, 2, \dots, n$) 位于三维空间区域 R_3 内部的点 (x_i, y_i, z_i) 上,节点 s_i 的感知区域是以 s_i 为中心, s_i 的感知半径 R_{i-s} 为半径的球,记为 $B = (x_i, y_i, z_i, R_{i-s})$ 。若节点密度足够

大,在所有节点处于工作状态时,则可以覆盖监测整个区域 R_3 。图 1 就是一种理想情况下的三维网络模型。

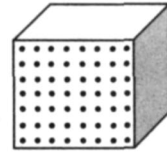


图 1 理想情况下传感器网络节点分布三维模型

2.1.3 网络的部署模型

对于预先不知道监测区域情况的应用,采用随机部署节点的部署方式是合理的。本文假设节点被部署在一个三维的长宽高为 X, Y, Z 的立方体区域 R_3 内。事实上,我们对整个部署区域的形状并不关心,它可以是任意形状的空间区域,并且区域 R_3 可以只是整个部署区域的一个子集,也可以是整个部署区域。我们研究的焦点在于,如何在满足覆盖度的情况下得到覆盖区域 R_3 所需的最小节点数量,通过对节点的选择,实现网络能耗的最大有效性,进而延长网络的生存时间。

2.1.4 网络的覆盖模型

我们在三维空间中研究覆盖问题是基于节点的 0-1 感知模型,每个节点都具有一个固定的感知半径,每个传感器只能感知其感知半径内的事件。本文假设所有节点的感知半径相同,位于节点的感知半径 R_s 内的监测区域中任意一点均被该节点覆盖。这样,监测区域就可能被分为两个部分:覆盖区和盲区。覆盖区中的任意一点至少被一个传感器节点覆盖,而盲区则未被任何一个节点监控。

定义 1:网络的 K 重覆盖

在监测区域 R_3 中随机部署 N 个节点,从 N 个节点中随机选取一个工作节点集合 U ,使得区域 R_3 中任一点 P_i ,在任一时刻,能最多被 U 中 K_i 个节点同时监控,而 $K = \min\{K_i\}$,我们称之为网络的 K 重覆盖。

定义 2:网络的空间 K 重覆盖

在监测区域 R_3 中随机部署 N 个节点,从 N 个节点中随机选取一个工作节点集合 U ,使得区域 R_3 中任一点 P_i ,能最多被 U 中 K_i 个节点非同时监控,而 $K = \min\{K_i\}$,我们称之为网络的空间 K 重覆盖。

定义 3:网络的部分覆盖

在监测区域 R_3 中随机部署 N 个节点,从 N 个节点中随机选取一个工作节点集合 U ,使得 R_3 中被节点空间覆盖的区域与整个区域 R_3 体积的比值等

于 M , 我们称之为网络的空间 M 重部分覆盖。

本文建议的算法是针对 K 重覆盖。

2.2 算法描述

首先我们研究覆盖度为 1 的情况下如何监测整个网络, 然后通过适当的参数选择达到覆盖度为 K 。

2.2.1 覆盖控制算法的实现

在算法实施过程中, 把整个网络的生存时间分成若干相等的时间段, 每一个时间段为一工作循环, 记为 T_{wc} , 假设每一节点在每一工作循环中有足够长的时间达到节点间时间同步。

在每一工作循环中的节点有两种状态: 活跃状态和睡眠状态, 处于活跃状态的节点既是一个发送者也是一个接收者, 既要监测感知区域内的状态又要将监测的数据发送给汇聚者, 同时也要接收和处理邻居节点发送过来的数据, 将其进一步的融合处理, 以减少每一次发送的数据包消耗的能量。处于睡眠状态的节点关闭其感知模块、通信模块和计算模块, 只保留一个定时器来计算时间, 根据状态转换时间表来唤醒节点的其它模块工作。

如图 2 所示的工作循环的时间结构, 每一工作循环分为自我配置阶段 (T_{ss})、感知阶段 (T_s)。在自我配置阶段节点 S_i 会完成如下工作:

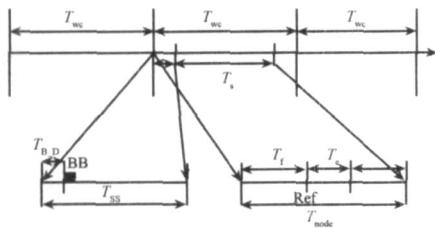


图 2 每一个工作轮的时间结构

1) 定位自己的空间位置 (定位只发生在节点首轮工作循环)、同步所有的邻居节点、发现所有后加入的节点和死亡的节点。

2) 广播自己的信标信息 BB_i , BB_i 包含如下信息: 节点 S_i 的位置坐标 (x_i, y_i, z_i), 节点的 ID, 节点的剩余能量 RE_i 。为了避免节点 S_i 在广播信标信息 BB_i 时产生冲突, 为每一个节点产生一个随机的滞后时间 T_{BD} , 每一个节点在经过 T_{BD} 时间后再广播自己的信标信息 BB_i 。

3) 在每一轮工作循环中选择一个随机时间 Ref 作为参考时间 (为了便于计算工作时间表), $Ref \in [T_{ss}, T_{wc}]$, 参考时间 Ref 是一个根据邻居节点信息和自身剩余能量产生的随机值, 计算自己的工作时间表。图 2 中 T_f 是在 Ref 前节点持续活动时

间, T_e 是在 Ref 后节点持续活动的时间。节点应该在 $(T_{wc} \times i + Ref - T_f - T_{ss})$ 时候醒来进入活跃状态, 在 $(T_{wc} \times i + Ref + T_e)$ 时进入睡眠状态, 关闭一切工作模块, 只保留定时器。

在网络感知阶段节点根据计算出来的工作时间表在活跃与休眠状态之间转换, 实现对整个网络中事件的监测。

下面描述节点 S_i 的参数 Ref_i, T_f, T_e 的选择, S_i 节点首先产生一个在 $[T_{ss}, T_{wc}]$ 内的随机值 Ref_i , 然后通过接收到 S_i 的邻居信息, 并把这些信息保存在自己的邻居的信息表中, 其中包括邻居节点的位置坐标、ID、剩余能量和随机参考时间 Ref 。在考虑覆盖住整个监测区域之前, 我们先考虑如何覆盖住单个单元立方体, 如图 3 所示, 能够监测到单元立方体 X 的节点有 S_1, S_2, S_3 , 节点 S_1 会在邻居信息表中保存节点 S_2, S_3 的信息, 而由于 S_4 没有监测到 X , 因而也就不保存节点 S_4 的信息。同理, 节点 S_2, S_3 保存它的位置信息和邻居信息, 节点 S_1, S_2, S_3 分别将邻居节点的 Ref 信息以升序的方式保存在一个循环链表 L 中, 利用下面公式计算自己的工作

$$T_{f,x,i} = (Ref_i - \text{prev}(Ref_i)) / 2 \tag{2}$$

$$T_{e,x,i} = (\text{next}(Ref_i) - Ref_i) / 2 \tag{3}$$

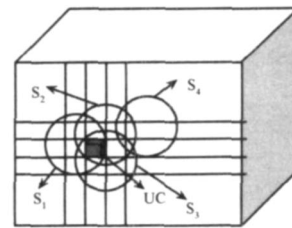


图 3 单元立方体的邻居关系

对于任何一个单元立方体 x , 只要能够监测到 x 的邻居节点在 $[Ref_i - T_{f,x,i}, Ref_i + T_{e,x,i}]$ 内保持活跃状态, 则 x 在每一工作循环中都被一个传感器节点所监测到。

将监测区域划分为多个单元立方体, 对每一个单元立方体进行同样的计算, 最后, 每一个节点都有一系列时间表 (如图 4), 从这些时间表中根据公式 (4) 和 (5) 选取 T_f 和 T_e 。

$$T_f^i = \max\{T_{f,x,i}\} \tag{4}$$

$$T_e^i = \max\{T_{e,x,i}\} \tag{5}$$

这样节点 S_i 在时间段 $[Ref_i - T_f^i, Ref_i + T_e^i]$ 是活跃的, 保证了 S_i 邻居的任何一个单元立方体都能被监控到, 如果所有节点执行这样的操作, 则整个网络能被覆盖。

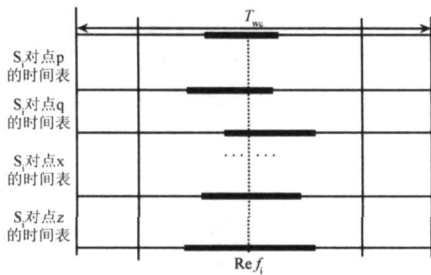


图 4 节点工作时间的确定

2.2.2 K 覆盖控制算法的实现

我们通过调整 1 覆盖算法的监测时间 (T_s) 来满足网络对 K 覆盖监测精度的要求。如果我们将监测时间延长 K 倍即 $K T_s$, 同时每一节点都按照 1 覆盖控制算法中制定的工作时间表进入活跃状态, 在经历 $K T_s$ 时间后进入休眠状态, 即 $[Ref_i - k \times T_{f,x,i}^i, Ref_i + K \times T_{e,x,i}^i]$ 时间段内是活跃的, 这样就能保证在任一时间都有 K 个传感器对单元立方体监测, 从而实现 K 覆盖的监测精度的要求。下面以实现 2 覆盖算法为例对覆盖算法实现进行解释, 如图 5 所示, 节点 S_1, S_2 对空间中一单元立方体 X 实现覆盖监控。在 1 覆盖情况下, 节点在 $[T_1, T_2]$ 这段时间内实现监控功能, 为了满足覆盖度为 2, 节点 S_1 将在 $[T_0, T_3]$ 这段时间保持感知状态, 同理对于节点 S_2 而言, 为了满足覆盖度为 2 就需要在 $[T_4, T_5]$ 这段时间内保持感知状态, 当两节点延长感知时间后就保证了在 $[T_1, T_2]$ 这段时间内始终有两个节点对 X 实现覆盖监控。

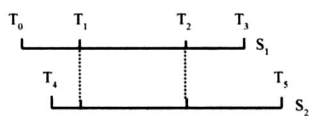


图 5 2 重覆盖算法实现

2.3 算法优化机制

影响算法性能因素主要有三个方面, 1) 由于在节点计算工作时间过程中, 个别节点可能制定过长的工作时间造成节点能量过度消耗而使节点实效, 造成网络盲区和覆盖盲区的产生; 2) 节点间时钟同步出现差异, 造成节点间工作不连续出现覆盖盲区; 3) 由于原有节点的失效造成网络工作和通信混乱。

对于节点间能量消耗的不均衡性问题, 我们使剩余能量大的节点保持更长的工作时间, 进而使能量小的节点的工作时间在一个工作循环中变短。当节点发现其剩余能量值比其邻居节点的剩余能量的平均值大时, 就选择较长的工作时间。剩余能量越多, 选择的工作时间就越长。引入剩余能量参数, 修

改上面式(1)和式(2)有:

$$T_{f,x,i} = (Ref_i - \text{prev}(Ref_i)) / 2 \times (Re_i / RE) \quad (6)$$

$$T_{e,x,i} = (\text{next}(Ref_i) - Ref_i) / 2 \times (Re_i / RE) \quad (7)$$

其中 RE 节点 s_i 的所有邻居节点的平均剩余能量值。

在此协议中可能因为时钟的不同步造成节点间工作不连续问题, 通过节点的感知状态引入了一个随机等待时间 T_w 来延长单个节点在每一工作循环中的感知时间, 在 T_w 时间内节点继续保持活跃状态, 一方面感知数据, 另一方面监听邻居节点的状态, 如果邻居节点未能正常进入活跃状态, 该节点就继续保持活跃状态, 直到下一个有效邻居节点进入活跃状态。

节点失效是指节点停止了感知和转交数据, 并且不和邻居节点通信。对于处在工作时间表上的一个失效节点, 它没有发出继续工作的信号, 由于我们引入了随机等待时间 T_w , 在工作时间表上的上一个节点会继续工作, 直到有下一个节点发出继续工作信号为止, 这样节点因该在 $(T_w \times i + Ref_i + T_e + T_w)$ 时进入睡眠状态, 关闭一切工作模块, 只保留定时器工作着。在下一轮工作循环中失效节点不再参与新的工作时间表的制定, 从而节点的失效不影响网络的拓扑稳定。

3 算法仿真

为了验证算法的有效性, 我们使用了 OPNET 10.0 网络仿真工具对覆盖算法的进行仿真验证。

为了便于性能的比较, 我们假定仿真的场景为: 网络的规模为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$, 节点均匀随机分布在监测区域中, 节点的通信半径和感知半径分别为 50 m , MAC 层采用 802.11 协议。

图 6 是随机部署网络覆盖率随节点数目变化曲线, 图 7 是随机部署网络活动节点随节点数变化曲线, 从图中可以看出, 对于 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的网络, 为了达到覆盖率 90% 以上, 算法给出至少需要 190 个传感器节点在网络生存时间内保持活跃状态。也就是说对于一个特定的网络, 通过覆盖控制算法来保证一定数目节点处于活跃状态, 这样可以在节省网络能量的情况下, 保证网络正常监测功能。对于随机密集部署的传感器网络, 通过本文算法使得活跃节点数目大大小于部署的节点数目, 从而有更多的节点处于休眠状态而成为冗余节点, 这对于在满足网络覆盖率的情况下, 合理利用冗余节点能量, 延长网络的生存时间, 优化网络资源配制和

提高监测质量有着重要作用。

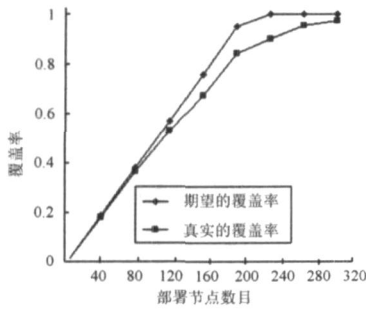


图6 随机部署网络覆盖率随节点数变化

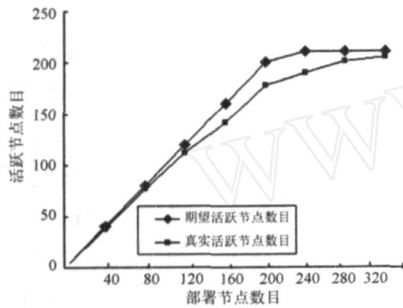


图7 随机部署网络活跃节点随节点数变化

传感器网络的主要用途是用来收集数据,然后将其输送给观察者,传感器网络的生存时间越长,越有利于观察者采集到越多的数据。由于传感器网络节点能量大多消耗在数据的传送上,因而有效的减少网络的负载,对于延长网络的生存时间非常重要,从图8的试验结果可以明显的观察到通过施加覆盖算法能明显的减少网络负载。

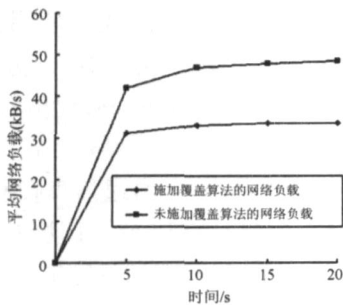


图8 施加覆盖算法和未施加覆盖算法的网络负载对比

4 结论

无线传感器网络覆盖问题与延长 WSN 的生存时间、优化网络资源配置、改善网络服务质量等密切相关,它已经成为 WSN 网络研究中几个亟待解决的问题之一。本文在对以往覆盖算法研究的基础上,针对 WSN 三维随机覆盖问题进行了深入的探讨,提出了一种能量有效的三维覆盖算法,从仿真结果上看,在密集型部署网络中施加覆盖控制算法,在保证网络覆盖率的情况下,能够有效的减少网络的

负载,进而减少网络的能量消耗,提高网络的生存时间。进一步改善覆盖算法的设计,使其具有高精度的控制性和适应性是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] Kulik J, Heinzelman W R, Balakrishnan H. Negotiation-Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks[J]. Wireless Networks, 2002(8):169-185.
- [2] Noury N, Herve T, Rialle V, et al. Monitoring Behavior in Home Using a Smart Fall Sensor[C]// Proceedings of the IEEE EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology. Lyon: IEEE Computer Society, 2000:607-610.
- [3] Tian D, Georganas N D. A Node Scheduling Scheme for Energy Conservation in Large Wireless Sensor Networks [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2003, 3(2):271-290.
- [4] Lin F Y S, Chiu P L. A Near-Optimal Sensor Placement Algorithm to Achieve Complete Coverage/ Discrimination in Sensor Networks [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(1):43-45.
- [5] Huang C F, Tseng Y C. The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network [C]// Sivalingam KM, Raghavendra CS, eds. Proc. of the ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA). New York: ACM Press, 2003:115-121.
- [6] Huang C F, Tseng Y C, Lo L C. The Coverage Problem in Three-Dimensional Wireless Sensor Networks[C]// Shah R, ed. Proc. of the GLOBECOM. Dallas: IEEE Press, 2004: 3182-3186.
- [7] Meguerdichian S, Koushanfar F, Qu G, Potkonjak M. Exposure in Wireless Ad Hoc Sensor Networks[C]// Rose C, ed. Proc. of the ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom). New York:ACM Press, 2001:139-150.
- [8] Gupta H, Das S R, Gu Q. Connected Sensor Cover: Self-Organization of Sensor Networks for Efficient Query Execution [C]// Gerla M, ed. Proc. of the ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC). New York:ACM Press, 2003:189-200.
- [9] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, Srivastava MB. Coverage Problems in Wireless Ad Hoc Sensor Network [C]// Sengupta B, ed. Proc. of the IEEE INFOCOM. Anchorage: IEEE Press, 2001:1380-1387.
- [10] Bugajska M D, Schultz A C. Co-Evolution of Form and Function in the Desion of Autonomous Agents: Micro Air Vehicle Project[R]. Navy Center for Applied Research in Artificial Intelligence, 2000.
- [11] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. Adaptive Beacon Placement [C]// UCLA, Los Angels, CA, 2001.
- [12] Clouqueur T, Ramanathan P, Saluja K K, Wang K. Value-Fusion Versus Decision-Fusion for Fault-Tolerance in Collaborative Target detection in Sensor Networks[C]// Fusion

2001 conference ,2001.

[13] Clouqueur T, Phipatanasuphorn V, Ramanathan P. Sensor

Deployment Strategy for Target Detection[C]// WSN'02, Atlanta GA ,2002.



张宝利,男,中科院深圳先进技术研究院博士研究生,于 2007 年获辽宁大学计算机软件和理论专业硕士,主要科研方向是无线传感器网络。



张足生为中国科学院计算技术研究院博士生,于 2003 年获得湖南科技大学学士学位,于 2006 年 7 月获得南开大学硕士学位,主要科研方向是无线传感器网络。



于峰崎,研究员,博士生导师,集成电子中心主任,获美国 UCLA 集成电路与系统博士学位,主要科研方向是低成本、低功耗射频(RF)集成电路与系统,其中包括 RFID 射频芯片、CMOS 传感器芯片、RFID 系统、无线传感器网络等。