doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.020

航空施药中雾滴沉积传感器系统设计与实验*

张瑞瑞[1,2]　陈立平[2]　兰玉彬[3]　徐　刚[2]　阚　杰[4]　张东彦[2]

(1.中国农业大学信息与电气工程学院，北京 100083；2.北京农业智能装备技术研究中心，北京 100097；
3.美国农业部农业航空应用技术中心，德克萨斯 77845；4.首都师范大学信息工程学院，北京 100048)

摘要：基于变介电常数电容器原理设计雾滴沉积传感器及检测系统，由此实现对航空施药中雾滴地面沉积量的快速获取。通过实验，分析建立了传感器对电导率487 μS/cm、25 mS/cm雾滴的沉积量测量线性回归方程，决定系数R^2分别为0.992 3和0.954 4。利用M-18B型飞机和AU-5000型喷雾机，对系统进行了应用测试，结果表明：与水敏纸图像分析方法对比，2种方法获得的雾滴地面沉积量分布曲线拟合度可达0.914 6，样点单位面积沉积量的相对测量误差分布在10%~50%之间。

关键词：航空施药　沉积量测量　电容传感器　传感器网络

中图分类号：TP212.9　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2014)08-0123-05

引言

农药喷施精确与否取决于药液在农作物(靶标)上的有效沉积。航空施药中，地面药液的沉积分布特性是航空施药喷施效果的重要参考指标。沉积分布特性的快速、有效获取能够减少航空施药实验成本、降低实验复杂度和操作难度[1-6]。

Zhang Huihui等[7-8]研究了基于地面光谱反射率测量的药液有效沉积特性分析方法。Zhu Heping等[9-12]研究了基于图像分析技术和水敏试纸的药液沉积分析系统。Salyani等[13]通过研究药液沉积量对导体电阻率的影响，设计了一种基于可变电阻器原理的药液沉积传感器，并建立了利用自来水做药液时的传感器输出电压与药液沉积量关系模型。洪添胜等[14]采用DGPS定位、叶片面积测试等试验方法，研究了葡萄树中的雾滴沉积分布。袁雪等[15]利用CFD模拟技术研究了温室风送式弥雾机雾滴的沉积模型。张慧春等[16-19]利用激光粒度仪研究了喷头的雾谱尺寸和扇形雾喷头 在不同压力、风速、喷雾距离情况下的雾滴粒径、数量等参数变化情况。赵春江等[20]研究了应用红外光谱成像技术分析测量航空施药中雾滴的空中漂移和地面沉积分布的方法。目前，航空施药雾滴沉积地面实时传感技术研究还相对较少。相比于传统施药中的雾滴沉积分布特性检测，航空喷施作业中的雾滴粒径较小、单位面积雾滴沉积量较少，且对检测的实时性要求较高。

本文基于变介电常数电容器原理和传感器网络技术，设计航空施药雾滴地面沉积实时监测系统，并探究该系统用于雾滴地面沉积量测量的实用性。

1　测量原理

电容式传感器是以电容器作为敏感器件，将被测物理量变化转换为电容量变化以实现物理量到电信号转换的传感器。电容式传感器结构简单、分辨率高、测量精度好，并具有耐高温、耐辐射等特性，能在恶劣条件下稳定工作。

2块平行金属板或导线可构成最简单的电容器。当忽略边缘效应，其电容为

$$C=\frac{\varepsilon S}{d} \tag{1}$$

式中　ε——极板间介电常数
　　S——平行板覆盖面积
　　d——平行板间距

当所设计电容器的S和d固定不可变，通过极板间介电质改变引起介电常数变化，从而改变电容器电容的电容传感器为变介电常数传感器。

雾滴沉积量传感器实现原理如图1所示。A、B

收稿日期：2013-12-03　修回日期：2014-03-10

*国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA101901)、北京市自然科学基金资助项目(4121001)和北京市农林科学院青年科研基金资助项目(QNJJ201217)

作者简介：张瑞瑞，博士生，北京农业智能装备技术研究中心助理研究员，主要从事农业传感器研究，E-mail：zhangruirui@iea.ac.cn

通讯作者：陈立平，研究员，主要从事农业信息化和智能装备技术研究，E-mail：chenliping@iea.ac.cn

为具有一定间距 d、一定厚度 t 和一定长度 L 的金属板,两金属板表面喷涂绝缘涂层并如图 1b 所示底侧固定于树脂板,这样 A、B 即形成电容器。将多个这种电容器并联,并等间距固定,即可用于雾滴沉积测量。

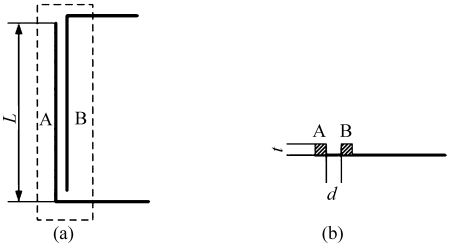

图 1 雾滴沉积量传感器原理图

Fig. 1 Deposit sensor principle

设定空气介电常数为 ε_0,当电容极板 A、B 间无液滴沉降时,电容器电容为

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S_0}{d} \tag{2}$$

其中 $S_0 = Lt$

当极板 A、B 间有雾滴沉降时,因 A、B 间介质变成由液滴和空气组成的混合体,液滴的介电常数与空气不同,所以电容等效介电常数值发生变化,从而使电容器电容发生变化。当电容极板的间距和厚度非常小,且可与雾滴粒径相比较时,电容极板面积 S 可以根据介质不同,分割成空气介质面积 S_1 和药液介质极板面积 S_2,设定药液的介电常数为 ε_y,根据电容器电容计算公式,有雾滴沉积的电容器电容量 C_d 可以表示为

$$C_d = \frac{\varepsilon_0 S_1 + \varepsilon_y S_2}{d} = \frac{\varepsilon_0 (S_0 - S_2) + \varepsilon_y S_2}{d} = \frac{\varepsilon_0 S_0}{d} + \frac{(\varepsilon_y - \varepsilon_0) S_2}{d} = C_0 + \frac{(\varepsilon_y - \varepsilon_0) S_2}{d}$$

即

$$C_d - C_0 = \frac{(\varepsilon_y - \varepsilon_0) S_2}{d} \tag{3}$$

施药过程中,药液浓度一旦固定,在忽略环境温差变化对溶液介电常数影响时,药液的介电常数是定值。所以不难看出,电容变化 $C_d - C_0$ 与药液覆盖面积 S_2 单变量线性相关,可以通过电容的变化来反映药液在传感器上的沉积覆盖面积变化。

传感器沉积药量为

$$m = \frac{d^2 (C_d - C_0) \rho}{\varepsilon_y - \varepsilon_0} \tag{4}$$

式中 ρ——施药药液质量密度

在式(4)中,对于同一传感器、在同一次施药中,参数 d、ρ 等为定值,可以通过电容的变化来反映药液在传感器上的沉积量变化。所以,从理论分析来看,可以通过喷施前后电容器电容的变化来反映雾滴在传感器上的沉积量。

2 系统设计

2.1 系统结构

系统基于 Zigbee 通信技术设计,由传感器节点、协调器和数据分析计算机 3 部分组成。系统设备部署并启动完成后,根据网络规模和协调器与传感器节点的距离,传感器节点与协调器自组织形成 Zigbee 星形或树形拓扑网络。网内所有传感器节点数据都发送给协调器。协调器通过 USB 通信接口将数据发送给计算机,同时,计算机也可以经协调器将配置信息和指令信息发送给传感器节点。

2.2 传感器节点设计

传感器节点主要由数据处理微控制器、射频通信电路、传感器电路、电源电路等组成(图 2)。微控制器采用支持低功耗工作模式和支持在线固件程序更新的 Atmage 128A 单片机[12];射频电路基于 Zigbee CC2530 芯片[13] 和射频前端电路芯片 RFX2401[14] 设计,通过射频输出电路优化和射频前端调整,使传感器节点的射频输出功率达 22 dbm,接收灵敏度 -110 dbm,可视通信距离 1.5 km;雾滴沉积测量基于可变介电常数原理的 LWS 电容传感器[15] 和运算放大器 AD822 设计[16];电源采用可充电锂电池,并且通过微控制器对节点的低功耗控制,使得传感器节点设备可进入最低功耗 40 μA 的工作模式,从而延长节点设备的持续工作时间。

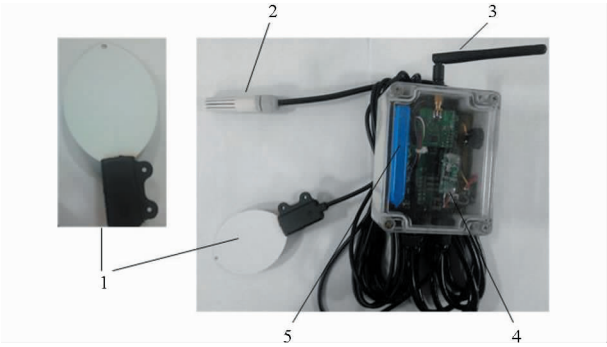

图 2 传感器节点

Fig. 2 Sensor node

1. LWS 传感器 2. 空气温湿度传感器 3. 射频通信天线 4. 数据采集通信电路板 5. 锂电池

LWS 传感器可将传感器沉积药液转换为 525 ~ 2 500 mV 电压信号。经过实验分析,航空施药中雾滴沉积可使 LWS 传感器输出 200 mV 的增量电压信号,为提高采样精度,采用 AD822 设计了运算放大电路如图 3 所示。其中 AD822 放大器 1 用于获得约 540 mV 的基准电源,放大器 2 用于实现 LWS 输出电压与 540 mV 压差的运放放大。

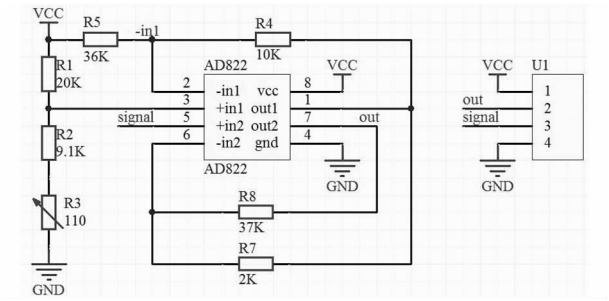

图 3　LWS 信号调理电路

Fig. 3　LWS signal processing circuit

传感器采样周期设定为 0.2 s。微控制器将每次采样数值与上次采样值做比较，如果传感器电压变化大于 0.04 mV，则将最新的电压发送给协调器，反之则继续下次采样。这种设计方式一方面可使传感器节点在没有施药发生时保持射频电路处于低功耗的休眠状态，降低设备电源功耗，另一方面可以减少网络冗余数据。

3　实验与测试

3.1　LWS 传感器实验

为测试分析 LWS 用于雾滴沉积测量的性能，在实验室分析了 LWS 传感器输出电压与表面雾滴沉积量的相关性。

自来水（电导率 487 μS/cm）作为药液，利用手持喷雾器向 LWS 传感器表面喷雾。每次喷雾前用吸水纸擦拭传感器表面，记录其输出电压，并用分析天平称其质量。喷雾后，记录传感器输出电压，并迅速将传感器放置于天平内称量。重复上述过程，得到 50 组实验数据。如果忽略雾滴称量过程中的蒸发量，可近似认为传感器前后两次质量差即为雾滴在传感器上的沉积量。以喷施前后传感器电压变化差为自变量，以药液沉积量为因变量，进行回归分析如图 4 所示。

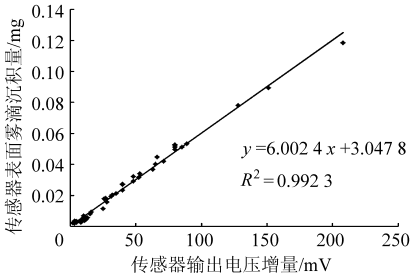

图 4　自来水沉积时传感器回归方程

Fig. 4　LWS sensor regression equation with tap water deposits

考虑药液有一定电导率，用电导率为 25 mS/cm 的碳酸氢钠溶液作为药液，重复了上述实验，并进行回归分析如图 5 所示。通过 2 次实验数据对比，不同溶液电导率对 LWS 传感器的回归方程有较大影响，但传感器电压与药液沉积量的线性相关性较好。所以，在同一次航空施药中，基于电容传感器获取的数据可以用于雾滴沉积量的测量及施药均一性分析。

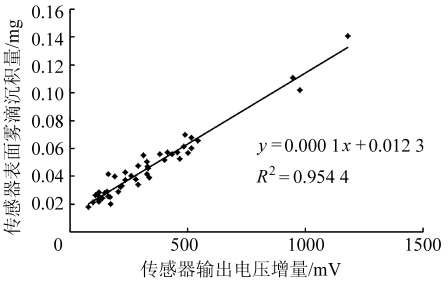

图 5　碳酸氢钠溶液沉积时传感器回归方程

Fig. 5　LWS sensor regression equation with sodium bicarbonate solution deposits

3.2　系统应用测试

2013 年 9 月 22 日，系统在黑龙江省佳木斯某农用航空机场进行了实地应用测试。实验中飞机及喷雾器技术参数如表 1 所示，地面气象条件如表 2 所示。喷施液体选用电导率 487 μS/cm 自来水。地面共设置 14 个样点，以飞机航道为中心线左右各放置 7 个样点，采样间距 3 m。传感器节点如图 6 所示安装于支架上，水敏纸与传感器节点间隔 20 cm 平行放置。实验进行了 4 次重复，得到 56 个有效样点数据。利用测量系统和文献[6]所述的水敏纸图像分析工具分别对 56 个样点的雾滴沉积量进行计算，得到如图 7 所示的 2 条数值分布曲线。2 条曲线 R^2 为 0.914 6。可见，2 种方法对雾滴沉积量分布趋势测量结果的一致性较好，利用该系统测量数据基于变异系数分析方法得到的施药有效幅宽及雾滴沉积均一性数据相一致。需要指出的是，水敏纸图像分析方法的检测精度与雾滴粒径相关性较大，对于粒径小于 50 μm 的雾滴，其最大测量误差可达 34%，而对于粒径大于 1 000 μm 的雾滴，其测量误差则仅有 1.2%[6]。

表 1　飞机及喷雾器技术参数

Tab. 1　Parameters of aircraft and sprayer

参数	数值
飞机机型	M－18B
喷洒设备	AU－5000
流量调节阀	13
雾化器安装角度/(°)	55、45、45、45、55
喷液量/($L \cdot km^{-2}$)	2 000
流量/($L \cdot min^{-1}$)	270
飞行高度/m	5
喷幅/m	45
速度/($km \cdot h^{-1}$)	180

表 2 气象参数

Tab. 2 Parameters of weather

参数	数值
最大风速/(m·s^{-1})	1.3
最大风速风向(与正北顺时针角度)/(°)	301
气温/℃	9.7
空气相对湿度/%	97

图 6 传感器节点的安装

Fig. 6 Deployment of sensor node

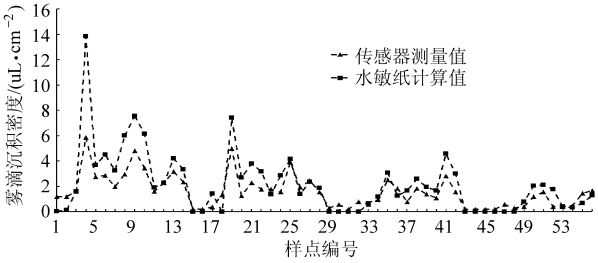

图 7 雾滴沉积量测量值对比

Fig. 7 Comparison of deposits measurement values

4 次实验数据分解来看,实验 4 次重复中,第 1 次数据序列(样点 1 ~ 14)的相关性最好,相关系数为 0.963 4,第 4 次(样点 43 ~ 56)的相关性最差为 0.686 7,第 2 次和第 3 次的相关性系数分别为 0.877 6 和 0.899 4。施药时间间隔是导致 4 次实验数据差异较大的原因,施药 4 个重复的时间间隔分别为 12、56 和 14 min。所以,该系统单次测量完成后,要待传感器表面沉积药液充分蒸发完毕后,再进行第 2 次测量,否则传感器的测量精度下降。

以水敏纸图像处理方法获得的数据为参照,从图 7 中可以看出,测量系统对雾滴沉积量的量化测量值中,有 11 个点的测量相对误差小于 10%,占总样点数的 20%;有 8 个点的测量误差大于 50%,占总样点数的 14%;绝大多数点的测量相对误差在 10% ~50%之间。从测量偏差来看,第 1 次数据测量偏差较大,第 4 次测量偏差较小。结合水敏纸样点数据,分析得出测量偏差主要来自于两个影响因素:一是雾滴沉积量的非均一性影响。受飞机飞行及气象影响,在飞机与地面间形成多变复杂的气流,气流使沉积量在较小距离范围内可能产生较大变化,现场的水敏纸数据表明即使距离相近(小于 10 cm)的 2 个样点沉积量都会有较大差异。另外,雾滴的相互粘连也是重要的影响因素。当雾滴出现相互粘连时,可能导致传感器测量误差增大。

4 结论

(1) 分析了基于变介电常数电容器原理传感器用于航空施药雾滴沉积量测量的可能性,理论推导了雾滴沉积量与电容传感器参数的线性关系和计算方程。

(2) 实验分析建立了 2 种不同电导率溶液 LWS 电容传感器的输出电压增量与表面雾滴沉积量的关系方程,给出了两者的线性相关系数,实验证明了利用变介电常数电容器原理进行雾滴沉积量测量的可行性。

(3) 结合应用场景,设计了雾滴沉积量检测系统,对系统进行了应用测试,并参照水敏纸图像处理方法数据对系统的测量数据进行了分析。分析结果表明,基于电容变介电常数原理和 Zigbee 技术设计的测量系统,对雾滴沉积趋势和沉积特性的检测与水敏纸测量方法的结果一致性较好,而雾滴沉积量测量精度不够理想。因此,系统在雾滴沉积均一性、有效幅宽等测量方面具有较大的实用性。

参 考 文 献

1 薛新宇,兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2013,44(5):194 - 201.
Xue Xinyu, Lan Yubin. Agricultural aviation applications in USA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):194 - 201. (in Chinese)

2 傅泽田,祁力钧,王俊红. 精准施药技术研究进展与对策[J]. 农业机械学报,2007,38(1):189 - 192.
Fu Zetian, Qi Lijun, Wang Junhong. Developmental tendency and strategies of precision pesticide application techniques[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007, 38(1):189 - 192. (in Chinese)

3 祁力均,傅泽田. 影响农药施药效果的因素分析[J]. 中国农业大学学报,1998,3(2):80 - 84.

4 Lan Y, Hoffmann W C, Fritz B K, et al. Spray drift mitigation with spary mix adjuvants[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2007,24(1):5 - 10.

5 张京,何雄奎,宋坚利,等. 无人驾驶直升机航空喷雾参数对雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报,2011, 42(4):66 - 69.
Zhang Jing, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Influence of spraying parameters of unmanned aircraft on droplets deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4):66 - 69. (in Chinese)

6 Wolf R E, Gardisser D R, Loughin T M. Comparison of drift reducing/deposition aid tank mixes for fixed wing aerial applications [J]. Journal of ASTM International, 2005, 2(8): 1 – 14.
7 Zhang Huihui, Lan Yubin, Lacey Ronald, et al. Ground-based spectral reflectance measurements for evaluating the efficacy of aerially-applied glyphosate treatments[J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(1): 10 – 15.
8 Castro-Esau K L, Sanchez-Azofeifa G A, Rivard B. Comparison of spectral indices obtained using multiple spectroradiometers[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 103(3): 276 – 288.
9 Zhu Heping, Masoud Salyani, Robert D Fox. A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(1): 38 – 43.
10 Fox R D, Derksen R C, Cooper J A, et al. Visual and image system measurement of spray deposits using water sensitive paper [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(5): 549 – 552.
11 Hoffmann W C, Hewitt A J. Comparison of three imaging systems for water-sensitive papers [J]. Applied Engineering in Agricultark, 2005, 21(6): 961 – 964.
12 Franz E. Spray coverage analysis using a hand-held scanner[J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(5): 1271 – 1278.
13 Salyani M, Serdynski J. Development of a sensor for spray deposition assessment[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 90: 1464 – 1469.
14 洪添胜, Tisseyre B, Sinfort C, et al. 基于 DGPS 的农药喷施分布质量的研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 42 – 44.
Hong Tiansheng, Tisseyre B, Sinfort C, et al. Study on the quality of pesticide spraying distribution based on DGPS technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 42 – 44. (in Chinese)
15 袁雪, 祁力钧, 季荣华, 等. 温室风送式弥雾机气流速度场与雾滴沉积特性分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 71 – 77.
Yuan Xue, Qi Lijun, Ji Ronghua, et al. Analysis on features of air-velocity distribution and droplets deposition pattern for greenhouse air-assisted mist sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 71 – 77. (in Chinese)
16 张慧春, Dorr Gary, 郑加强, 等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞实验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 53 – 57.
Zhang Huichun, Dorr Gary, Zheng Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment of influence on droplet size distribution of flat fan nozzles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 53 – 57. (in Chinese)
17 张京, 宋坚利, 何雄奎, 等. 扇形雾喷头雾化过程中雾滴运动特性[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 66 – 69.
Zhang Jing, Song Jianli, He Xiongkui, et al. Droplets movement characteristics in atomization process of flat nozzle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 66 – 69. (in Chinese)
18 Kirk I W. Measurement and prediction of atomization parameters from fixed-wing aircraft spray nozzles[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 693 – 703.
19 Guler H, Zhu H, Ozkan H E, et al. Wind tunnel evaluation of drift reduction potential and spray characteristics with drift retardants at high operating pressure[J]. Journal of ASTM International, 2006, 3(5): 1 – 9.
20 北京农业信息技术研究中心. 航空施药中药雾分布与飘移趋势遥测系统及方法: 中国, 201110209409.0[P]. 2011 – 07 – 25.

Development of a Deposit Sensing System for Aerial Spraying Application

Zhang Ruirui[1,2]　Chen Liping[2]　Lan Yubin[3]　Xu Gang[2]　Kan Jie[4]　Zhang Dongyan[2]

(1. *College of Information and Electrical Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture*, *Beijing* 100097, *China*
3. *Sino-US Agricultural Aviation Cooperative Technology Center*, *USDA ARS*, *College Station*, *Texas* 77845, *USA*
4. *College of Information Engineering*, *Capital Normal University*, *Beijing* 100048, *China*)

Abstract: Deposit distribution pattern is an important index in aerial applications. A sensor with variable dielectric capacitor and network system is developed to measure the deposit volume near real-timely in aerial spraying application. The linear regression equations of output voltage and deposit volume with electric conductivity 487 μS/cm and 25 mS/cm are built by experiment with linear correlation coefficients of 0.992 3 and 0.954 4, respectively. The system is field tested in a spraying operation using aircraft M – 18B and with nozzles AU – 5000. The test result indicates that comparing with measurement method of water sensitive paper imagine analysis, the fitting degree of distribution pattern curve is 0.914 6 and the relative measurement errors of deposit volume are in 10% ~50%.

Key words: Aerial spray　Deposit measurement　Capacity sensor　Sensor network