

利用无线传感器网络提高地质灾害监测能力

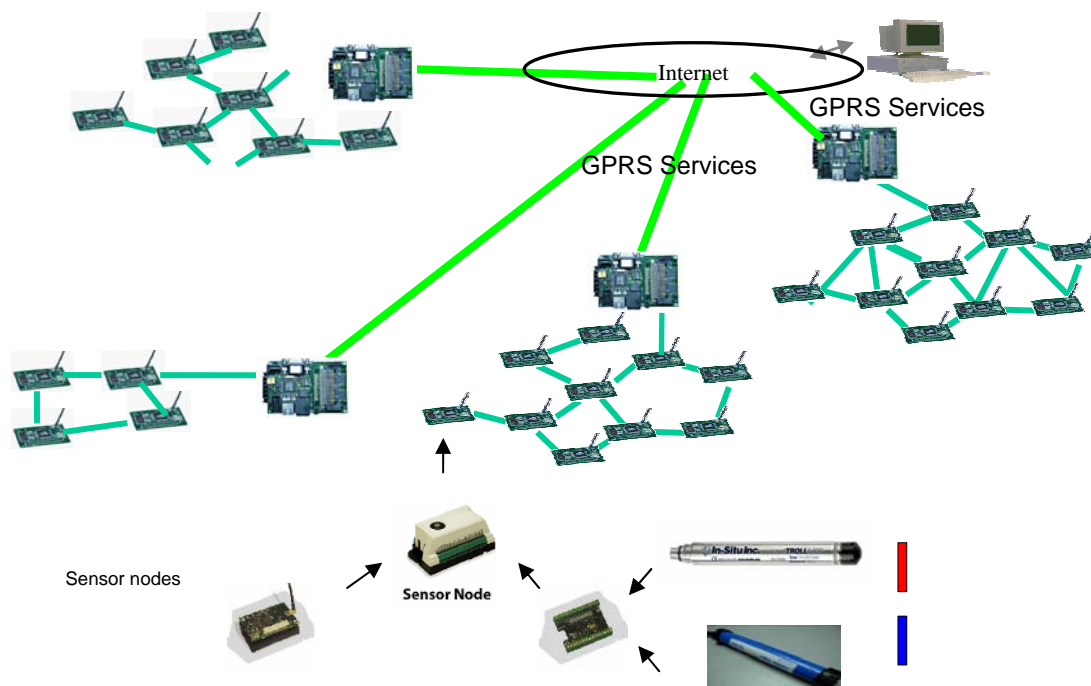
秦飞
无线产品经理
Crossbow 北京代表处

序言

2008年5月12日，发生在中国四川省汶川地区的8级特大地震灾害，牵动了每一个中华儿女的心。地震灾害给汶川人民的生命财产带来了巨大的损伤，6万多鲜活的生命离开了我们，无数栋房屋变成瓦砾，学校停课，工厂停工，地震造成的伤痕可能需要中国人民花费数十年的时间去抚平。

痛定思痛，在捐款捐物，尽一份普通人的微薄之力之余，如何能够更有效的贡献出自己的能力成为环绕于作者脑海，久久挥之不去的念头。

作者服务于无线传感器行业多年，对其技术及应用小有心得。在将多年与地质灾害相关项目整理之后，终于有此篇文章问世。



技术概述

无线传感器网络诞生于上世纪90年代末，最初是美国军方提出用以进行战场环境监测的新技术，将大量的廉价传感器节点遍撒指定区域，数据通过无线网络传回监控中心，监控区域内的所有信息就会尽收观察者的眼中了。

该计划由美国加州大学伯克利分校承担研究任务，在初期产品完成后由美国 Crossbow 科技公司负责民用推广。

无线传感器网络相对于传统的网络，其最明显的特色可以用六个字来概括即：“自组织，自愈合”。自组织是指在无线传感器网络中不像传统网络需要人为指定拓扑结构，其各个节点在部署之后可以自动探测邻居节点并形成网状并最终汇聚到网关节点的多跳路由，整个过程不需人为干预。同时整个网

络具有动态鲁棒性，在任何节点损坏，或加入新节点时，网络都可以自动调节路由随时适应物理网络的变化。这就是所谓的自愈合特性。

这些特点使得无线传感器网络能够适应复杂多变的环境，去监测人力难以到达的恶劣环境地区。此次地震发生之后所有通信设施中断，在后期只能依靠人力对余震，山体滑坡，堰塞湖等进行检测。效率低下，且缺乏量化数据进行科学分析预测。如果能够在灾区部署无线传感器网络就能有效的解决这一问题。无线传感器网络节点体积大多小巧，Crossbow 公司的 Mica 系列节点仅为两节五号电池大小，电池供电可以保证数月工作时间，不需现场拉线供电，非常方便在应急情况下进行灵活部署监测并预测地质灾害的发生情况。

举例而言，因地震而形成的唐家山堰塞湖，可以在湖区不同位置安置配备了液位传感器的无线节点实时监测水位变化状况，再汇总至监控中心后，就可以结合地理位置信息，和历史数据，形成 3 维数据，观察水位变化趋势，推导对坝体压力，以及在关键点水深超过危险门限值时自动生产报警信息。其部署效率和能够为决策者提供的信息量都远远超过单纯的人力监测。

当然这只是一设想，在时间就是生命的现在，在唐家山堰塞湖部署这套没有测试过的系统只能是增加整体救灾工作的不稳定因素，目前能够依靠的仍然是现场的英勇的解放军战士和经验丰富的水利工程师。作者希望的是能够从这次灾害中归纳提炼出一些技术方案，在以后遇到类似灾害时可以更加有效率的去救灾，能够减轻解放军战士的工作量，和为救灾专家们提供更多更简单的手段，就像这次地震中得到广泛应用的生命探测仪一样。

下文介绍到的是作者参与或了解的国内外已经部署了的一些无线传感器网络的典型应用，将它们归纳在一起是因为笔者相信，这些案例所代表的技术思路完全可以通过改进形成一些制式装备，用于地质灾害的监测。当然，无线传感器网络只是一种工具，如何应用的更好在于使用者的创新，如果这篇文章能够起到抛砖引玉的作用，在下次遇到类似地质灾害时，救援人员可以拥有更多更有效的专业仪器设备，作者心愿足矣。

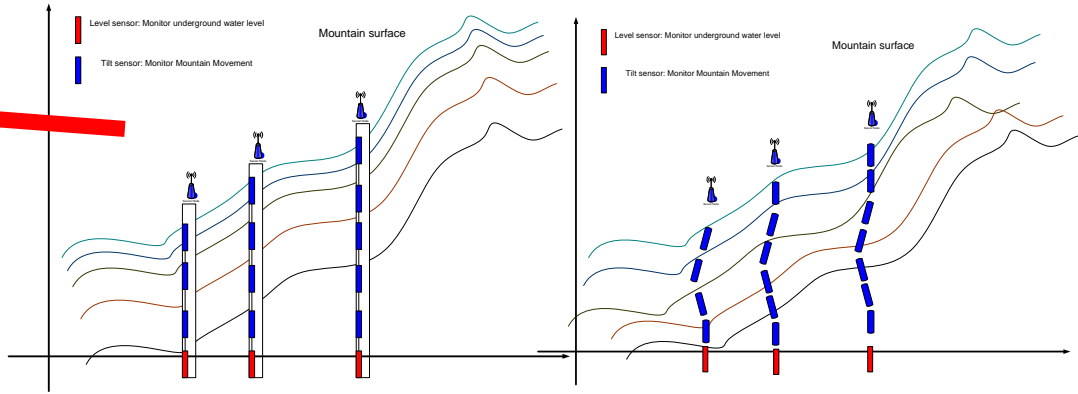
案例介绍

➤ 山体滑坡

香港由于存在大量山地地貌，城市居民人口众多，要求土地必须保持较高的利用率，因此大量建筑和道路都位于山区附近。由于地处中国南方，地理位置决定了该地区降雨量常年偏高，尤其在每年夏季的梅雨季节，会出现大量的降水。不稳定的山地地貌在受到雨水侵蚀后，容易产生山体滑坡现象，对居民生命财产安全造成巨大的威胁。

过去数十年内在某些极其危险地域发生了多次山地滑坡现象，因此政府部门试图部署一种灵活稳定的系统对山体滑坡进行监测和预警。该市政府部门尝试部署过多套有线方式的监测网络，但是由于监测区域往往为人迹罕至的山间，缺乏道路，野外布线，电源供给等都受到限制，使得有线系统部署起来非常困难。此外有线方式往往采用就近部署 Datalogger 的方式纪录采集数据，需要专人定时前往监测点下载数据，系统得不到实时数据，灵活性较差。

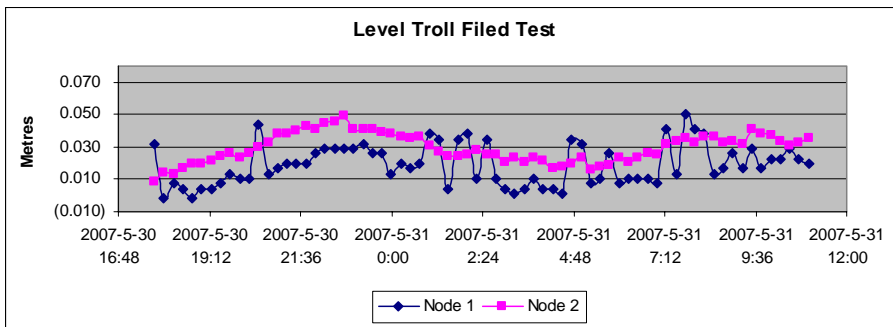
Crossbow 在与地理监测专家进行多次交流，并进行数次实地考察后，Crossbow 帮助地质专业公司 FT 与 Fugro 在香港青山和大屿山地区部署了基于无线传感器网络的山体滑坡监测方案。



山体滑坡的监测主要依靠两种传感器的作用，液位传感器以及倾角传感器。在山区容易发生危险的区域，将会沿着山势走向垂直设置多个孔洞，如图所示。

每个孔洞都会在最下端部署一个液位传感器，在不同深度部署数个倾角传感器。

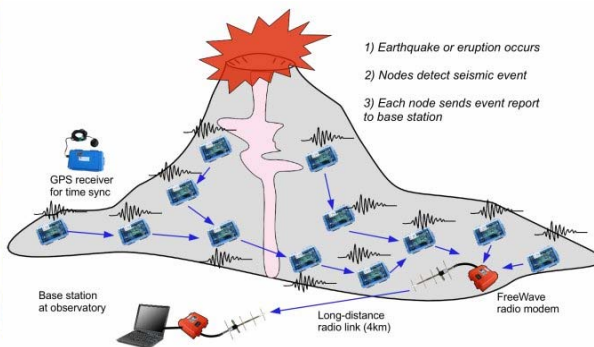
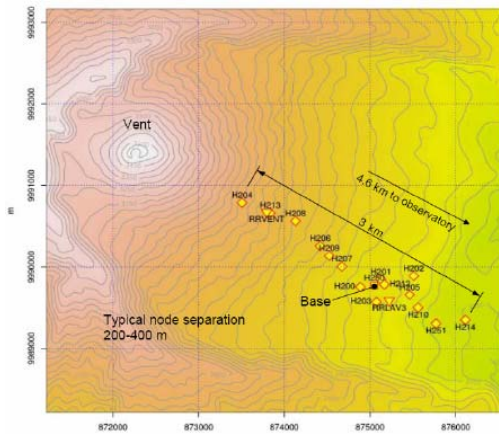
由于该地区的山体滑坡现象主要是由雨水侵蚀产生的，因此地下水深度是标识山体滑坡危险度的第一指标。该数据由部署在孔洞最下端的液位深度传感器采集并由无线网络发送。



通过倾角传感器我们可以监测山体的运动状况，山体往往由多层土壤或岩石组成，不同层次间由于物理构成和侵蚀程度不同，其运动速度不同。发生这种现象时我们部署在不同深度的倾角传感器将会返回不同的倾角数据，如图所示。在无线网络获取到各个倾角传感器的数据后，通过数据融合处理，专业人员就可以依据此判断出山体滑坡的趋势和强度，并判断其威胁性大小。

山体滑坡在地震之后的灾区随处可见，尤其是交通要道两侧的山体滑坡对救援进度更是会造成巨大的威胁，相信无数人仍然记得在听到理县到汶川的生命线在打通后不到一天的时间就因山体滑坡而中断时那揪心的感觉。

➤ 地震检测



地震是由地壳变化释放能量在地表形成机械波传递的现象。因此安置在地表的振动传感器可以用

来检测地震的发生和强度。这次汶川的地震强度 8 级，以及后续的各次余震都是通过地震局汇聚部署在各地的振动传感器信息，再还原为地震中心点的振动数据。

当然长期的地震监测网络，由于其部署地点确定，使用有线监测方式是较为合适的选择。但是在应急情况下，可以随时部署获取数据的无线地震监测网络也具有相当的意义。比如在地震之后用以监测余震的发生，机械波的传递远远慢于无线电波，因此可以抢出宝贵的几分钟预警时间给救援人员后撤。

美国哈佛大学在去年部署了一套类似的应急地震监测系统，主要部署在火山地区用来检测因火山爆发而导致的震动信息。

系统采用 TelosB 无线传感器节点，搭载 24 位 ADC 用以监测 MEMS 加速度计传送的微弱振动信息。节点以火山口为中心径向部署，间隔数百米部署一个节点。在部署完毕后可以检测出地震沿径向传播各点的振动信息。

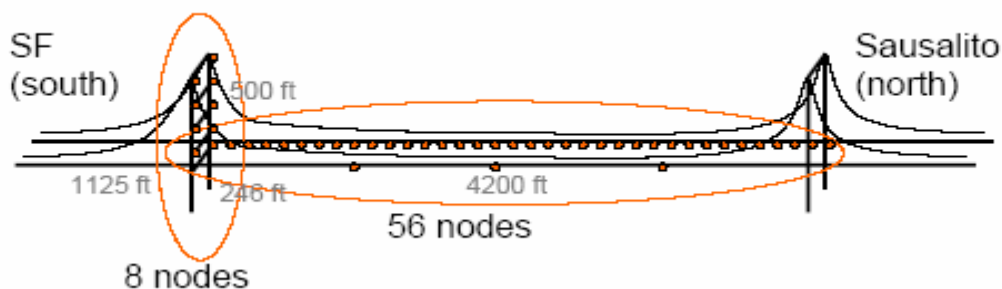
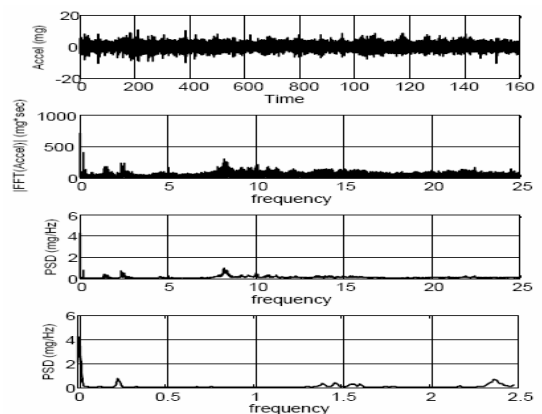
节点在本地进行检测，一旦判断出超过预设门限的振动信息立即发送报警信息，同时通知所有节点开始采集振动波形。所有节点的振动数据会被传送回监控中心，用以进行数学建模还原地震波传递情况。

类似的系统在余震监测和震后应急补充部署时将具有重要的意义。中国地震局，哈尔滨工程力学研究所，中国台湾地震研究中心在近年都开始进行类似项目的研究。期待可以看到在不远的将来能有类似装备问世。

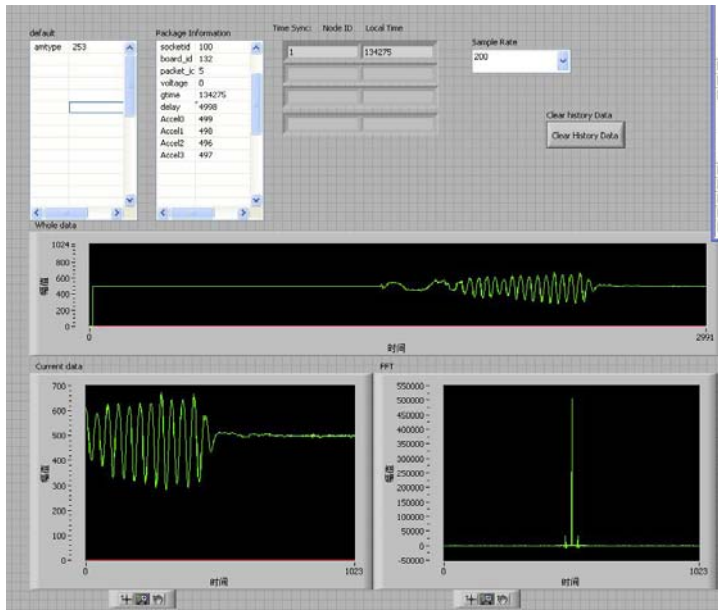
➤ 建筑物健康监测

显而易见在地震中，对人民生命财产安全造成最大伤害的就是建筑物的倒塌。而现今大都市中，摩天大楼林立，在这次汶川大地震中，北京地区也有震感，华贸·国贸等高层写字楼均有晃动，大量人员有不适感，但直至通过广播，网络确认地震发生后，写字楼人员方开始撤离。如果震中发生在北京附近这几分钟的迟疑就会带来高层写字楼数千生命的消逝，而北京至少拥有数百栋高层写字楼。

加速度计依然是监测建筑物的最简单有效方式。美国加州大学伯克利分校在 Crossbow 的协助下对旧金山金门大桥部署过建筑健康监测系统。其本意是用来检测桥体在风力作用下的各个关键受力点的振动状况，整体数据建模后就可以分析出桥体受损老化严重的部分从而进行有针对性的修补。



桥体和高层建筑有一个共同的特点，就是建筑结构及其敏感，因此其前端的测量点部署很难采用



有线方式，否则极易损害建筑结构受力。而无线技术，特别是不需供电的低功耗无线技术，在解决建筑物健康监测前端 100 米数据获取中具有极其重大的意义。节点具有无线能力，体积较为小巧，可以很容易的安装在建筑物的关键受力点上，而不影响建筑物外观。具有低功耗能力，节点一经部署不需要频繁更换。省去了复杂耗时的布线操作，只要打开节点开关，位于建筑物监控中心的接受终端就可以实时获取数据，与建筑报警系统联动后，一旦探测到可能威胁到建筑物的震动信息，立即发出报警通知建筑物内人员立即撤离。平时该系统收集的数据还可以用来监测建筑物老化状况，为建筑物维护提供辅助决策信息。

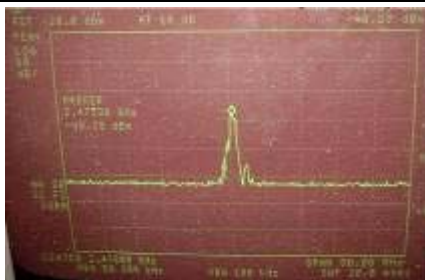
Crossbow 在国内与哈尔滨工程大学欧进萍院士领导的研究团队建立了联合实验室，专门针对建筑物健康监测进行研究。相关研究成果已经在国内数座桥梁的维护工作中得到应用。Crossbow 也推出过提供全套源代码的入门级振动套件，支持六个节点同步采集 4G 加速度计信息，并传回网关，通过 Labview 进行后期建模分析工作，可以作为广大研究和工程人员的一个参考设计。

问题与解决方案

● 通信距离

在将无线传感器网络应用野外时最大问题是如何保证 Mote 节点在重植被覆盖下仍能正常组网通信。容易发生地质灾害的山区往往植被密集，Crossbow 在进行香港项目（环境非常类似山区，人迹罕至，高达一人高的野草和大量树木）之前数次排人进行实地考察，并进行了详细的讨论和分析，最终 2.4GHz 被认为最为合适该环境的使用。

Situation	Attenuation in dB
torrential rain (4 inches/hr)	0.05 dB/km (0.08 dB/mile)
driving rain	0.1dB/km
Thick fog	0.02 dB/km (0.03 dB/mile)
A few trees	0.3 - 0.5 dB/meter
Vegetation	2 dB/meter
Oak, lime and plane trees	3-4 dB/meter
Conifers	8-10 dB/meter
Forest	300 dB/km

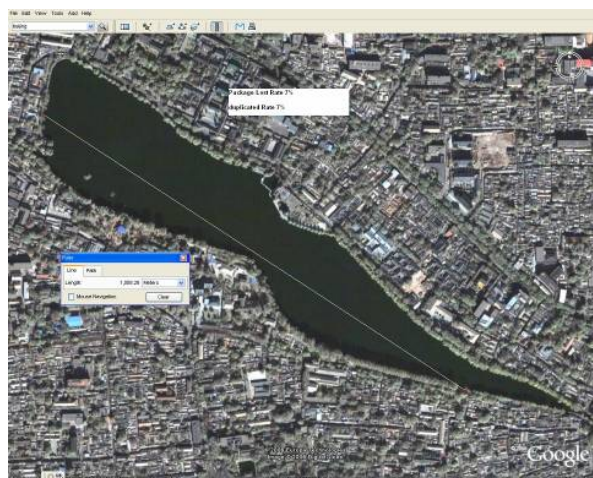
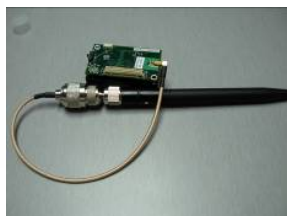


由上表可以看出，重植被与暴雨都会对无线信号产生衰减。433MHz 由于其波长较长，因此绕射性能较好，在雨中具有较好的表现。2.4GHz 由于波长较短，穿透性较好，在重植被环境下具有较好的表现。而根据上表重植被造成的衰减为暴雨的数千倍，且系统工作在降雨环境下的时间应该在 50% 以下。因此 2.4GHz 应该更适合野外环境的使用。

此外，考虑频谱环境，目前使用 2.4GHz 的商用设备如 WiFi, BlueTooth 多为短距设备，因此 2.4GHz

频段较为干净，干扰较少。400MHz 与 900MHz 的干扰则相对较多。在地质灾害发生时，大量使用的单兵电台，步话机等及其容易造成相互干扰。从避免干扰的角度来说，2.4G 是较佳的选择。

尽管 2.4GHz 具有相对较好的表现，重植被和降雨仍然会对无线信号产生较大的衰减。Crossbow 在 2007 年最新推出了 IRIS 节点，由于采用了全新的 AT1281+RF230 芯片组，以及模块化设计生产。IRIS 在通信距离指标上得到大幅提高，同时其功耗反而得到一定降低。



Test at Beijing 1008 meters at 7% package loss rate

由上图可见，在北京后海地区进行的湖面环境测试时，该节点达到了一公里的通信距离。在换装 5dBi 增益天线后，IRIS 节点在北京二环路上下班高峰时期的车辆密集情况下也达到了 500 米的通信距离。而其功耗相对原有的 MicaZ 节点降低了 1/3 左右。

● 能源消耗

每个节点通过电池供电，在 Crossbow 公司的被称为 ELP 电源管理机制下，电池电量能维持节点连续工作 4 年以上。ELP 即为 Extend Low Power 模式，为 Crossbow 公司原有 Low Power 模式的改进版，能够提供更加优异的电量表现。在 crossbow 与中科院遥感所联合开发的用以南极科考的气象探测无线传感器网络，在零下 80 度时还可保持长达一年的工作时间。

电池的电压随时被监控，一旦电压过低，节点会将电压数据发至基站。这个数据发送成功后，节点会处于深度睡眠模式，管理者在获致了某个节点电压过低的警告后，就可以有目的的进行系统的维护工作。当这个节点被重新换上新电池后将自动正常工作。

● 可靠通信

无线通信都存在一定的数据丢失率，在用在环境监测中，丢失一次采集信息并不会对全局的海量数据造成任何影响。但是当用在地址灾害监测中时，它所传递的信息关系重大，一旦丢失所造成影响及其严重。End to End 的 ACK 提供了端到端的发送信息确认，专门用以发送类似的关心数据包，在该模式下每个数据包在经过多跳传输到达目的节点后，目的节点会立刻回传一个 ACK 数据包，发送端在经过确定时间延时（根据路由表跳数确定）没有收到 ACK 数据包，会立刻重新发送，重复该过程直到数据包安全到达目的地。

总结

无线传感器网络作为一项较新的技术，以其特有的能力可以解决日常生活中很多问题，本文结合作者专业所及为汶川大地震类似的地质灾害监测提供一种采用新技术来提高监测能力的设想。但是从设想到实现中间还会有相当长的路要走，这中间需要广大科技工作者的不懈努力和投入。相对中国数量庞大的软件和嵌入式开发人员而言，熟悉和了解无线传感器网络开发的工程人员在中国仍然屈指可数。从软件角度而言，在为无线传感器网络编写程序时，必须从整个网络全局考虑，类似于把线程的概念扩展到成百上千个 CPU 之上，彼此配合来完成特定的工作。从硬件角度而言，设计无线传感器网络节点时，必须考虑外部电路的低功耗设计，与手机，MP3 等一天到几天的工作时间相比，无线传感器网络必须要考虑的是靠有限的电池工作数月乃至数年的时间。