

绿野千传： 突破自组织传感网大规模应用壁垒

刘云浩
香港科技大学

关键词：传感器网络

1998年，我刚参加工作不久，作为临时翻译被派到纽约，坐在距离IBM总裁郭士纳一尺远的地方听他说理想中的E-service概念。当时我并不知道著名的“智慧尘埃”概念已经公之于众了，郭士纳先生也未必知道自己将因为所谓的15年周期定律被我们频频提起；大家抽空用中文悄悄交换着刚听到的传奇般的雅虎和免费的Email空间。真正在听郭士纳滔滔不绝演讲的，其实只有我这个翻译。没有人意识到在此后一年多，互联网要经历一次泡沫迸裂，而席中半数的精英即将加入失业大军。人们热烈地规划着今后几年的暴发路：大家津津乐道的是贫困的大妈因为住在网络中心楼上就发了财的故事，还有天后王菲的“相约九八”。

我在第一次走进五星级饭店洗手间的时候知道了传感器原来离我这么近。传感器的开发和使用的多很年了，但是给传感器附加通信功能，组成自组织和自我协同的智能化网络系统，是近十年内取得的巨大进步。在“智慧尘埃”之后，无线传感网的概念迅速拓展到民用。在一个无线传感网中，大量的传感器等微型化计算设备通过无线多跳网络自组织联接在一起，完成持续环境监控和大规模数据采集的任务，填补了计算世界里数据来源这个“木桶短板”。

加州大学伯克利分校的大鸭岛动物监测与红木监测，哈佛大学的火山遥感和麻省理工学院的河流监控，进一步推动了自组织传感网领域研究的热潮。2003年，一个偶然的时机我走进了传感网研究的圈子。2004~2007年，我们以煤矿安全生产和紧

急救援为应用目标，提出无线传感器网络煤矿监控系统。通过自动监控煤矿工作空间的氧气含量和瓦斯浓度，以及实时检测渗水和矿道地质结构变形等事件，为探测煤矿意外事故的发生提供预警，并为发生事故后的紧急救援提供关键导航功能。2007~2008年，我们和青岛海洋大学一起把传感网应用到海洋生态环境监控中，研制了OceanSense（海上无线传感器网络实验场）系统，在黄海海域部署了上百个节点用来收集温度、光照和海深等环境数据。在此期间，国内外研究取得了显著进展，无线传感网应用延伸至众多领域，包括军事、工业控制、环境观测、生态安全、数字生活和交通监控。

但在世界范围内，传感网研究的热度在3年前开始下降。

传感器到底怎么了？

回答这个问题要先看看表1的数据，里面列举了国际上比较有代表性的无线传感网系统。从表1的数据不难看出，当前实际系统可以达到的规模和运转寿命与当初无线传感网被提出时的目标相去甚远。我们曾经设想的传感网都是成千上万的节点，不论是面路由（Face Routing）还是边界检测（Boundary Detection），只有在规模庞大的系统中才有存在的意义；而简单残酷的事实是，目前演示系统还只停留在“百”这个量级上，何况真实系统；网络存活的时间，更是短得看不到优势。我们不得不思考，大规模长期部署的无线传感网系统到底面临什么挑战？

说到这里，读者可能会提出一个尖锐的问题：

什么是大规模？互联网和手机网都有上亿个节点，而且从广义上看都可算是传感网，为什么本文却说“千”是大规模？难道是原来的方法不对吗？

表1 四个典型无线传感网系统

系统名称	研制单位	系统规模	部署时长	部署方式	电源类型
VigilNet	弗吉尼亚大学	200	3~6个月	室外应用系统	干电池
Motelab	哈佛大学	190	常年运转	室内实验平台	有线电源
SensorScope	洛桑理工学院	97	6个月	室外应用系统	干电池
Trio	加利福尼亚大学伯克利分校	557	4个月	室外应用系统	太阳能电池

我用一个也许不恰当的比喻来解答这个问题。在自组织网络里，没有中心节点，通信又是多跳的，因此一般认为几百个就是大规模了。这就好比国庆表演集体操，如果事先演练好了，大家按流程表演，几万人跳整齐了并不难；如果事先没有演练，由某个人来指挥，并保证大家都能直接听见他的号令（类似单跳无线网络，如移动手机网的情形），跳整齐了也不算太难；然而，事先没有演练，而指挥又不能给所有人发出他们直接听得见的号令，只有事先的一个草案，指挥的命令只能发给身边的几个人再慢慢一个个传开，临时碰上各种情况大家还要商量着来，那么就很难保证几百人能跳整齐了。

为了探寻大规模自组织网所面临的挑战的根源和解决方案，我们发起了“绿野千传”项目。当时提出了“3个1”的决心，即在一个野外的真实环境，部署超过1000个节点的无线传感网系统，连续运转一年以上。当时之所以选择林业为应用背景，是因为：

一方面，林业在可持续发展战略中占据重要地位，在生态建设中居于首要地位，在中国西部大开发中处于基础地位，在应对全球气候变化中占据着独特地位。2007年9月8日，胡锦涛在悉尼APEC（Asia-Pacific Economic Cooperation，亚太经济合作组织）非正式会议上提出了“森林方案”，强调通过森林的恢复和增长来增加碳汇¹，减缓气候变化；2009年9月22日在纽约G20（二十国集团）气候变

化峰会上，他也提出用“森林碳汇”来减缓气候变化——发展林业是应对全球气候变化的战略选择。

另一方面，林业应用是在森林这个复杂系统中展开的。森林物种繁多、类型多样、分布地域广阔、生长周期长。传感网林业应用在时间上要求同步、有持续性；在空间上要求范围广、测点多；同时还要求维持较低的人力和设备成本。林业已有的技术和方法遭遇了难以精确刻画系统结构与功能的瓶颈。以碳汇为例，众所周知森林能固碳，但是具体森林能固多少碳，目前还没有准确的说法。因此，探寻新技术新方法势在必行！无线传感网具有低功耗、智能化自组织、大规模持续同步监测和低成本等诸多特点，是一个有效解决林业应用瓶颈的可行方案。

林业给予了无线传感网技术足够强大的应用驱动力，而无线传感网的先进技术能给林业学科在研究方法和思维方式层面带来变革。基于这两点考虑，我们选择了林业作为应用场景。

“绿野千传”的系统研发工作始于2008年下半年。到今天为止，前后参与的单位 and 人员除了香港科技大学，还有浙江农林大学的周国模教授、西安交通大学的赵季中教授、杭州电子科技大学的戴国骏教授、美国伊利诺伊理工大学（Illionois Institute of Technology, IIT）的李向阳教授、清华大学的顾明教授、北京邮电大学的马华东教授、哈尔滨工业大学的李建中教授、同济大学的蒋昌骏教授等专家的团队，另外该项目还得到了国家自然科学基金委、科技部和国家林业局等单位专家直接或者间接的指导。研发组主要由香港科技大学的何源、王继良、李默，浙江农林大学莫路峰，西安交通大学郗旻、连硕、李睿、惠维，上海交通大学刘克彬和浙江大学董玮这些同学牵头，40多名硕士和博士生奋战在第一线上。2009年5月我们成功部署了一个120个节点的

¹ 森林碳汇（Forest Carbon Sinks）是指森林植物吸收大气中的二氧化碳并将其固定在植被或土壤中，从而减少该气体在大气中的浓度。

原型系统，同年10月原型系统扩充至330个点，至今已经运转超过11个月 (<http://greenorbs.org/>)。2009年8月我们在浙江省天目山脉实现了一个超过200个节点的实用系统，该系统至今已经连续运转超过8个月。

为什么我们不直接增加到1000个节点呢？实际上，算上我们在浙江农林大学其他几个实验点部署的小型系统，总的节点数早已经超过1000个，它们之间的数据是通过互联网互联互通的。我们总共部署和测试的节点，已经超过2000个。但这还并不是我们心目中真正的“千传”。虽然它们之间可以通过数据汇聚节点（Sink）和互联网交换数据，也可以认为是一个系统，但是我们所追求的，是要在一个数据汇聚节点控制范围内的1000节点。通过一年多的观察和对系统收集的大量传感网数据的分析，我们对当前无线传感网大规模应用面临的根本挑战有了一点认识。主要有以下3个方面：

第一，无线传感网传输和感知两大功能不匹配。主要表现为两种形式：一方面，图像、声音和视频等数据可以利用对应的图像和声音传感器直接获取，但这类数据量大，且经常要求实时传输，要通过带宽非常有限的无线多跳网络传送，难度很高；另一方面，不同应用需要各种各样的传感器数据。比如在林业应用中二氧化碳含量和光谱数据具有广泛用途，地震波强度数据在防灾减灾中的意义至关重要，这类数据量小，较易于传输，但现实的难题是，可以提供这些数据且适用于大规模部署的低成本传感器尚未成熟。即易感不易传，易传不易感。这个根本矛盾直接导致无线传感网无法满足真实应用领域的感知需求。要缓解这个矛盾，有若干关键问题亟待研究，如需要设计高性能低功耗传感器以突破网络传输带宽瓶颈，设计和优化路由协议以提升其可靠性和网络吞吐率等。我们把这个壁垒称作“传感失谐”。

第二，网络管理困难。与传统企业网络和互联网的节点不同，无线传感器节点经常处在恶劣环境当中，风吹日晒，雪打雨淋。同时传感器节点的通信和计算资源极端有限，传统网络上类似SNMP

（Simple Network Management Protocol，简单网络管理协议）类型的Agent汇报机制无法有效支持。更为严峻的是，如果传统网络断了，很容易判断是物理问题还是软件或者系统故障；而在传感网网络中，很难区分中断原因，给修复带来了巨大困难。我们把这称为“诊疗失据”。

第三，大多数现有研究工作都基于理想化的模型假设，比如UDG²（Unit Disk Graph）或者准UDG模型，忽略了无线传感网运行过程中伴随的各种不确定物理因素和可能的环境动态性。例如，定位算法大多基于规则的信号强度到物理距离的映射模型；覆盖算法设计大都采用各向同性的确定性的感知模型；拓扑控制对传输半径及其可控性作了很多假设但实际上连拓扑边的存在与否都要依赖于对链接（link）评估方式的定义。由此产生的研究成果一旦应用于大规模系统，就会立刻显现出与实际情况之间巨大的落差。因此这些模型无法直接应用于指导和仿真实用系统，这就是“模型失用”。

虽然面临很大的困难，但我坚信在不太远的将来，大多数的日常物体都将被连在网络上。我们今天所做的探索，无论离成功还有多远，都在朝着目标走去。

1970年，我爷爷60岁，早晨出门碰上大队书记，听见他口袋里竟然有人唱戏，惊讶而好奇，莫名其妙的跟了一路，忘了自己是捡粪来的；1990年，我20岁，拿到人生第一个可以录放的随身听，在没有暖气的初冬攥缩在学生宿舍被窝里手舞足蹈，任凭音乐响到凌晨断电，捂着吵得半聋的耳朵奔去食堂；2010年，我女儿5岁，在家里画画，顺手拿过桌上的iTouch，在互联网上搜到“Nobody But You”，唱着画着，怡然自得。■



刘云浩

香港科技大学计算机科学与工程系副教授。清华大学国家信息实验室特别研究员。liu@cse.ust.hk

² 节点都以最大功率工作时所生成的拓扑。