

无线传感器网络覆盖控制技术研究^{*}

毛莺池^{1,2} 陈力军² 陈道蓄²

(河海大学计算机及信息工程学院 南京 210098)¹

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)²

摘要 无线传感器网络具有广泛的应用背景,目前已经发展成为一个重要的计算平台。但是,由于无线传感器网络自身的特点,使其也面临许多问题,如何有效地进行覆盖控制,在保证网络覆盖质量的前提下,减少能量消耗,延长网络寿命是其中最重要的问题之一。覆盖控制可以使无线传感器网络的资源得到优化分配,更好地完成环境监测、信息获取和数据传输等任务。本文总结了近年来提出的各种覆盖控制问题的、具有代表性的研究成果,并对相关覆盖控制协议与算法进行了分析比较,最后指出了目前覆盖控制技术存在的问题,对全文进行总结。

关键词 无线传感器网络,覆盖控制,节能,状态调度

A Survey on Coverage Control Techniques for Wireless Sensor Networks

MAO Ying-Chi^{1,2} CHEN Li-Jun² CHEN Dao-Xu²

(College of Computer and Information Engineering, Hehai University, Nanjing 210098)¹

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)²

Abstract Wireless sensor networks have a wide range of potential, practical and useful applications. However, there are many challenging problems that need to be addressed for efficient operation of wireless sensor networks in real applications. One of the fundamental and important problems in sensor networks is the coverage control problem, since most sensors are equipped with non-rechargeable batteries and the density of deployed sensors is very high. The coverage control algorithms can result in not only network resources' optimal allocation but also efficient sensing and collecting of the environmental information, and communicating with neighboring nodes by wireless sensor networks. In this paper, we survey the state-of-the art coverage control techniques, present an overview and analysis of the solutions proposed in recent research literature. In the end, the open research issues in this field are pointed out.

Keywords Wireless sensor networks, Coverage control, Energy-efficiency, State scheduling

1 引言

随着无线和嵌入式技术的发展,生产廉价的微型无线传感器已经成为可能。由大量的、微型传感器节点组成的无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSNs),通过节点间的相互协作,将其监测和感应的多种环境信息(如温度、湿度等)传送到基站进行处理。WSNs具有广泛的应用背景,如军事、安全监视、生态环境监测、医疗健康等领域^[1]。

与无线自组网(MANETs)不同,WSNs一般具有较大的节点密度(密度可高达20 nodes/m³),以及较弱的节点移动性(一般部署后传感器节点不再移动)的特点。同时,由于受到成本以及体积等原因的限制,无线传感器节点的处理能力、通信带宽以及电池容量等资源极为有限。特别是在很多应用中,传感器节点被部署在危险或者恶劣的环境中,节点的能量无法得到补充。另一方面,在高密度部署的网络中,并不需要所有的节点持续地同时工作来完成监测任务。如果所有的节点都同时处于工作状态,可能有多个传感器节点同时发送相同的消息,这不仅会造成消息冗余,网络耗能过多,而且可能引起数据包冲突。那么如何利用冗余的节点,减少能量消耗,

延长无线传感器网络的寿命成为设计WSNs相关协议需要考虑的关键因素之一。

WSNs的覆盖控制问题可以看作是在传感器网络节点能量、无线网络通信带宽、计算处理能力等资源普遍受限情况下,通过网络传感器节点放置以及路由选择等手段,最终使WSNs的各种资源得到优化分配,从而使感知、监视、传感、通信等各种服务质量得到改善。WSNs的覆盖控制问题可以一般性地总结为通过各个传感器节点协作而达到对监视区域的不同管理或感应效果^[2]。

近年来,在WSNs优化覆盖控制方面有许多的研究工作,并取得了一定的进展。本文综述了近年来在这一领域所取得的研究成果。本文第2节描述了WSNs的网络模型;第3节介绍了评价覆盖控制协议的性能指标;第4节详细介绍和讨论了覆盖控制技术,并对相关协议进行了比较;第5节指出了目前覆盖控制技术存在的问题;最后对全文进行总结。

2 网络模型

在设计WSNs的覆盖控制协议时,针对不同的应用需求,将采用不同的网络模型,因此需要考虑以下不同的模型假

^{*} 基金项目:国家“九七三”重点基础研究发展规划(2002CB312002),国家“八六三”高技术研究发展计划(编号:2004AA112090);国家自然科学基金(60573132)资助。毛莺池 博士生,讲师,主要研究领域为传感器网络,分布式计算;陈力军 副教授,主要研究领域为移动网络,QoS技术;陈道蓄 教授,博士生导师,主要研究领域为分布式计算。

设:

(1) 节点部署方式

通常采用以下几种部署方式:随机部署、规则部署以及计划部署^[3]。其中随机部署中是指部署后节点在部署区域内呈现为均匀分布。随机部署方式被认为是易于实现和价格低廉的^[3],而且对于预先未知监测区域情况的应用场景,采用随机部署方式也是合理的。随机部署的方式主要应用于军事用途以及一些偏远的、不易接近的地区。目前,大多数的研究是基于节点随机部署方式的。规则部署是指部署后的节点可以构成规则的拓扑结构,比如网格、立方体等。规则部署通常采用确定的部署方式,通过几何计算的方法,确定每个节点放置的位置,一般适用于友好、可达的环境。对于大范围的监测区域而言,确定部署的方式似乎不可行。而计划部署是指在监测现象的高发区其节点的部署密度也较高。在计划部署中,虽然节点在部署区域内呈非均匀的分布,然而在一个较小的范围内节点的分布仍可近似为均匀分布。节点部署方式的不同对网络拓扑控制协议将产生很大的影响,因此需要根据不同的部署方式,采用不同的覆盖控制技术。

(2) 节点感知模型

节点的感知模型分为两类:布尔模型和随机模型。布尔模型是在感知范围内的所有节点都可以接收到其发送的消息,而在感知范围之外的节点都不能接收到其发送的消息。随机模型则根据信号衰减模型和设定的阈值,节点根据收到的信号强度,决定是否正确地接收到消息。另一方面,节点的感知范围可以规则,即以节点为圆心,传感半径为半径的圆或球,也可以是任意形状。目前,大多数的研究是基于布尔感知模型,而范围是规则的。

(3) 节点通信范围

某些节点的通信设备可以通过调整其发射功率,获得多个不同的通信范围。比如节点 MICA2 mote 可以提供多级发射功率,具有多个通信范围。而某些节点的发射功率是固定的,其通信范围保持不变。

(4) 时间同步

某些覆盖控制协议与算法要求节点之间时间同步,节点可以同时被唤醒开始新一轮状态调度,满足应用覆盖需求。而某些协议与算法并不要求节点间的时间同步。时间同步也是 WSNs 重要的研究问题。

(5) 节点位置信息

目前大多数的研究要求根据节点精确的位置信息,调度节点状态,达到应用要求的覆盖度。节点可以通过装备 GPS,有向天线或一些定位算法获得其物理位置信息。准确定位在 WSNs 中也是一个重要的研究内容。

3 覆盖控制协议的评价指标

WSNs 覆盖控制技术的应用,有助于节点能量的有效控制、感知服务质量的提高和网络寿命的延长。另一方面,也会带来数据传输、管理、存储和计算等代价的提高。所以 WSNs 覆盖控制协议的性能评价标准对于分析一个覆盖控制算法的可用性与有效性非常重要。

(1) 覆盖能力

WSNs 最基本的功能是利用节点监测部署区域的情况,进行数据收集,因此网络覆盖能力是评价网络服务质量的重要指标之一,也是衡量一个 WSNs 覆盖控制协议是否优秀的首要标准。对于区域覆盖而言,若网络中的节点可以监测整

个区域,则称为 1 重覆盖。若整个监测区域至少被 k 个不同的节点同时监测,则称为 k 重覆盖。某些应用并不要求网络提供完全覆盖,当网络的覆盖率大于某个阈值时,即可满足要求,这称为部分覆盖。

(2) 网络连通性

由于 WSNs 是一种无基础设施的网络,大量节点采用自组织方式协同完成数据查询、搜集等任务,因此,网络节点之间需要能够以无线多跳的方式直接或间接地通信。网络的连通性将有效地保证网络自身以无线多跳自组织地方式协同工作,并直接决定了 WSNs 感知、监视、传感、通信等各种服务质量。

(3) 能量有效性

由于传感器节点能力受限、节点数量巨大、实际应用的环境条件复杂且大多不允许对节点进行电池更换,因此如何减少节点的能量消耗,延长整体网络的生存时间已成为 WSNs 的重要性能指标。不同的无线传感器网络应用,对网络寿命的定义是不同的。有些定义网络中所有节点全部死亡时,网络寿命结束;有些定义网络中失效的节点数量超过某个阈值时,网络寿命结束;有些定义在网络出现不连通情况时,网络寿命结束;有些定义网络提供的覆盖率低于某个阈值时,网络寿命结束。现有的覆盖控制技术通常采用减小节点通信发射功率、节点状态调度、减少节点间消息交换开销、减少节点信息维护开销等方法减少网络能耗,使网络寿命最大化。

(4) 能耗负载平衡

在 WSNs 中,若某些节点能耗负载过大,会导致节点过早死亡,使网络监控产生盲点或使网络产生分割,节点数据不能转发到基站,因此节点能耗负载平衡也是覆盖控制协议设计的目标之一。覆盖控制协议通常采用定期按轮运行的方式,实现节点能耗负载平衡。

(5) 算法复杂性

不同 WSNs 覆盖控制算法其实现方式不同导致算法复杂程度也有较大差别。衡量一个 WSNs 覆盖控制算法是否优化的一项重要标准就是其算法的复杂性程度,通常包括时间复杂度、通信复杂度以及实现复杂度等。

(6) 网络可扩展性

可扩展性是 WSNs 覆盖控制的一项关键需求。通常 WSNs 采用大规模地随机部署方式,若没有网络可扩展性的保证,网络的性能会随着网络规模的增加而显著降低。因此,网络的可扩展性需求在 WSNs 中尤为明显。

4 相关工作

WSNs 的覆盖控制就在满足一定的网络覆盖率的前提下,一般以延长网络寿命为主要设计目标,兼顾通信干扰、网络延迟、负载均衡、连通性、可扩展性等其他性能,通过节点状态调度,形成优化的网络结构。下面介绍一些典型的覆盖控制算法。

4.1 节能覆盖

由于 WSNs 中传感器节点自身体积较小、电池能量资源有限,如何保证大规模网络环境下传感器节点能量的有效使用就成为需要关注的一项重要研究内容,它直接影响到整个网络生存时间能否充分延长。在文[4~18]中采用轮换节点“活跃”和“休眠”状态的节能覆盖方案,有效地提高网络生存时间。

在文[4,5]中提出将所有的节点分成若干个不相交的独

立集(disjoint set),每个集合中的节点都可以独立地完成区域监测任务。这些集合中的节点按一定的顺序轮流执行区域监测任务。这种方法的目标就是最大化独立集合的数目,但是计算最大的独立集是一个 NP 完全问题^[4]。文[4,5]中分别提出了 most-constrained least-constraining 算法和基于 graph-coloring 算法计算独立集。

Tian 等人在文[6]中提出了基于节点状态调度的分布式覆盖算法(Sponsored Sector)。算法根据节点的位置信息或者通过有向天线获得信号达到角度来计算节点与其邻居的覆盖关系,选取工作节点。为了避免产生覆盖盲区,采用了后退(back-off)机制。但是 Sponsored Sector 算法没有考虑节点覆盖区域之间的重叠,导致选出的工作节点过多。

我们提出了一种与节点位置无关的覆盖控制算法 DELIC^[7]。在文[7]中讨论了在理论上在节点均匀分布的情况下,工作节点的平均覆盖面积,及工作节点的平均密度,从而确定每个节点的广播范围。DELIC 协议根据节点的广播范围和节点的能量大小,通过多次循环迭代来确定节点是否竞争为最终的工作节点。DELIC 算法的特点是无需节点位置信息,具有良好的扩展性,可以实现能耗负载均衡。

Kumar 等人提出了一种简单的状态调度算法 RIS(Randomized Independent Scheduling)^[8]。基于时间同步方法,RIS 将时间划分为固定的周期,在每个周期的开始,每个节点以某一概率独立地决定是否进入睡眠状态。RIS 算法需要较为严格的时间同步。

Gao 等人在文[9]中提出了一种分析节点冗余度的数学模型。该模型不依赖于节点位置信息,根据节点感知范围内的邻居数量计算自身成为冗余节点的概率。Gao 等人根据数学模型提出了基于部分冗余进行节点状态调度 LDAS 算法^[9],提供对覆盖度的统计保证。

我们针对随机部署 WSNs 的特性,分析了在已知监测区域大小和节点感知范围情况下,无需节点位置信息,应用期望的覆盖率与所需的工作节点数量之间的数学关系。根据分析结果,提出了一种与节点位置无关的服务质量协议(EL-IQoS)^[10]。协议根据节点能量大小选取最少的工作节点,并利用启发式节点调度算法动态调整工作节点的数量,满足应用期望的覆盖率,达到节能的目的。

4.2 连通性覆盖

对覆盖控制问题而言,除了满足一定的覆盖率,还需要保证网络的连通性,使节点收集的数据可以通过多跳的方式转发到基站。

Ye 等人在文[11]中提出了基于探测(probing)的密度控制算法 PEAS。PEAS 算法要求每个睡眠节点定期地在其探测范围内探测邻居节点的状态,若在其探测范围内没有工作节点,则进入工作状态;否则仍处于睡眠状态。节点的物理位置用于计算节点探测范围和所要求的节点密度。显然,PEAS 算法中的某些节点可能持续工作,导致其过早地死亡,能耗负载不均匀。PEAS 能够保证渐近连通性,即部署区域和节点数量趋于无穷大,网络连通的可能性趋于 1。

Xu 等人在文[12]中提出 GAF(Geographical Adaptive Fidelity)算法。在 GAF 算法中,每个节点根据其位置信息将整个区域划分为若干个虚拟单元格(grid),其大小必须保证相邻格子中任何一对节点可以直接通信。因此,只需要在每个格子中选择一个节点作为活动节点转发数据包,可以实现通信。但是 GAF 算法没有考虑到实际网络中节点之间的距

离的邻近并不能代表节点之间可以直接通信的问题,也不能保证节点能耗均匀。

Zhang 等人在证明了若节点的通信范围 R_c 至少两倍于节点感知范围 R_s ($R_c > 2R_s$) 时,如果活动节点能够覆盖整个监测区域,则该节点集合也是连通的。根据这个结论,Zhang 等人提出了一个分布式的节点密度控制算法 OGDC^[13]。算法以轮次循环运行,每轮开始时,随机选择开始节点并广播消息。当节点接收到广播消息后,根据其邻居信息、自己的位置信息,计算是否被邻居节点所覆盖。对于 $R_c < 2R_s$ 时,OGDC 算法不能保证同时满足网络连通性覆盖。

Wang 等人证明了在 $R_c > 2R_s$ 的情况下, k 重覆盖的网络一定是 k 度连通的,并提出了 CCP 算法^[14]。CCP 算法思想与 OGDC 算法类似。另一方面,在 $R_c < 2R_s$ 的情况下,作者将 CCP 与 Chen 等人提出的 SPAN 算法^[15]相结合。SPAN 协议是 Ad Hoc 网络中的拓扑控制协议,利用 SPAN 协议,可以保证工作节点是连通的。

Carle 等人利用 MPR-DS(MultiPoint Relay Dominating Set)算法^[16]提出 SCR-CADS 算法^[17]。SCR-CADS 算法根据每个节点的位置信息,在 $R_c = R_s$ 的情况下,通过状态调度保证网络覆盖和连通。

Gupta 等人在文[18]中通过选择节点连通的路径来得到最大的网络覆盖效果。当基站向网络发送一个监测区域查询消息时,Gupta 等人分别提出了集中与分布式两种贪婪算法,选择最小的连通节点集合并充分覆盖监测区域。

4.3 覆盖控制算法比较

为了对已有算法进行相互间的比较性总结,本小节给出了 WSNs 覆盖控制各种算法的优缺点总结和比较,见表 1。

5 存在的问题

虽然 WSNs 覆盖控制研究已经取得了一定的成果,但是仍有很多问题需要解决,主要概括为以下几点:

(1) 感知数学模型的完善。现有的覆盖控制研究中,所使用的感知模型基本上是理想球状发射模型,其数学模型过于理想、简单,没有考虑实际无线信道中出现的通信干扰等因素。然而研究已经发现,由于天线、地形等许多复杂的因素,实际的信号强度等高线不是球状的,而且相差很大,需要进一步考虑更加完善的感知模型。

(2) 对网络的异构性研究不多。目前,WSNs 的研究主要针对节点同构的情况,而在实际的应用,可能采用异构的传感器节点构成网络进行目标监测。事实上,即使在同构网络中,由于设备、环境等方面的差异,各个节点所形成的感知范围和通信也是各不相同的。所以异构网络相对于同构网络而言是更实用的网络模型。

(3) 对实际应用中的困难考虑得很少。许多研究假设传感器节点能够精确定位,但是,节点配备 GPS 不仅成本相对较高,耗能多,对于室内环境,基于 GPS 的系统并不能可靠地工作。此外,诸如节点之间严格同步等假设对于 WSNs 而言是非常困难的,也是不现实的。

(4) 提供移动性支持不够。目前,WSNs 覆盖控制协议大都假定传感节点是静态的,但在战场等应用中可能需要节点或网络具有移动性,因此新的覆盖控制理论与协议需要提供对移动性的支持。

(下转第 26 页)

- 19
- 3 李建中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展. 软件学报, 2003, 14(7)
 - 4 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感网络. 软件学报, 2003, 14(7)
 - 5 SMART DUST—Autonomous sensing and communication in a cubic millimeter. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>
 - 6 Lu Y, Wang W, Zhong Y, et al. Study of distance vector routing protocols for mobile ad hoc networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom) Dallas Fort Worth, Texas, Mar. 2003
 - 7 Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless Sensor Networks: A Survey. Computer Networks, 2002, 38(4): 393~422
 - 8 Schwiebert L, Gupta S K S, Weinmann J. Research challenges in wireless networks of biomedical sensors. Mobile Computing and Networking, 2001. 151~165
 - 9 Wang Hanbiao, Elson J, Girod L. Target classification and localization in habitat monitoring. In: Proceedings of the IEEE ICASSP 2003, Hong Kong, April 2003

(上接第 22 页)

表 1 WSNs 覆盖控制算法比较

文献 Article	覆盖能力 Coverage ability	网络连通 Network connectivity	感知范围 Sensing range	可调的通信范围 Adjustable transmission range	时间同步 Time synch.	可扩展性 Network scalability	能量有效性 Energy efficiency	基于位置信息 Location based	能耗负载平衡 Balanced energy consumption
[4]	全覆盖	不连通	布尔	否	是	弱	一般	是	是
[5]	全覆盖	不连通	布尔	否	是	弱	一般	是	是
[6]	全覆盖	不连通	布尔	否	是	一般	弱	是	是
[7]	全覆盖	不连通	布尔	是	是	强	强	否	是
[8]	部分覆盖	不连通	布尔	否	是	强	强	否	是
[9]	部分覆盖	不连通	布尔	否	否	强	强	否	是
[10]	部分覆盖	不连通	布尔	否	是	强	强	否	是
[11]	部分覆盖	连通	随机	是	否	强	强	否	否
[12]	部分覆盖	连通	布尔	否	是	强	强	是	是
[13]	全覆盖	连通	布尔	否	是	强	强	是	是
[14]	全覆盖	连通	布尔	否	否	强	强	是	是
[17]	全覆盖	连通	布尔	否	是	一般	一般	是	是
[18]	全覆盖	连通	布尔	否	是	一般	一般	是	是

总结 无线传感器网络具有广泛的应用背景, 目前已经发展成为一个重要的计算平台。由于无线传感器节点的处理能力、通信带宽以及电池容量等资源极为有限, 通常采用大规模随机方式部署节点, 因此面临许多问题。如何利用冗余节点, 进行有效的覆盖控制, 减少能量消耗, 延长网络寿命成为无线传感器网络重要的研究内容。本文总结了近年来提出的各种覆盖控制问题的、具有代表性的研究成果, 并对相关覆盖控制协议与算法进行了分析比较, 最后指出了目前覆盖控制技术存在的问题, 对全文进行总结。

参 考 文 献

- 1 Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks, March 2002
- 2 Cardei M, Wu J. Coverage in wireless sensor networks. In: Ilyas M, Magboub I, eds. Handbook of Sensor Networks, chapter 19. CRC Press, 2004
- 3 Tilak S, Abu-Ghazaleh N B, Heinzelman W. Infrastructure tradeoffs for sensor networks. In: Proc. of the 1st International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02), Atlanta, USA, September 2002. 49~57
- 4 Slijepcevic S, Potkonjak M. Power efficient organization of wireless sensor networks. In: Proc. of IEEE Conference on Communications, Helsinki, Finland, June 2001. 2:472~476
- 5 Cardei M, MacCallum D, Cheng X, Min M, Jia X, Li D, Du D. Wireless sensor networks with energy efficient organization. Journal of Interconnection Networks, 2002, 3(3-4): 213~229
- 6 Tian D, Georganas N. A coverage-preserved node scheduling scheme for large wireless sensor network. In: Proc. of First International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02), Atlanta, USA, September 2002. 32~41
- 7 Mao Y, Liu M, Chen L, Chen D, Xie L. A Distributed Energy-Efficient Location-Independent Coverage Protocol in Wireless Sensor Networks. Computer Research and Development, 2006, 43(2)
- 8 Kumar S, Lai T H, Balogh J. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network. In: Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom'04), 2004. 144~158
- 9 Gao Y, Wu K, Li F. Analysis on the redundancy of wireless sensor networks. In: Proc. of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA 03), September 2003, San Diego, CA
- 10 Mao Y, Gong H, Liu M, Chen D, Xie L. An Energy Efficient and Location Independent QoS Protocol for Wireless Sensor Networks. Computer Research and Development, 2006, 43(6)
- 11 Ye F, Zhong G, Cheng J, Lu S, Zhang L. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor network. In: Proc. of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2003), 2003. 28~37
- 12 Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In: Proc. of ACM MOBICOM'01, July 2001. 70~84
- 13 Zhang H, Hou J C. Maintaining scheme coverage and connectivity in large sensor networks. In: Proceedings of NSF International Workshop on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc wireless, and Peer-to-Peer Networks, 2004
- 14 Wang X, Xing G, Zhang Y, Lu C, Pless R, Gill C. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. In: Proc. of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys 2003), 2003. 28~39
- 15 Chen B, Jamieson K, Balakrishnan H, Morris R. SPAN: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. In: Proc. of the International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), 2001
- 16 Laouiti A, Qayyum A, Viennot L. Multipoint relaying: An efficient technique for flooding in mobile wireless networks. In: Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, 2002
- 17 Carle J, Gallais A, simplot-Ryl D. Preserving Area Coverage in Wireless Sensor Networks by using Surface Coverage Relay Dominating Sets. In: Proc. on ISCC, 2005
- 18 Gupta H G, SRD, Gu Q. Connected sensor cover: Self-Organization of sensor networks for efficient query execution. In: Proc. of the ACM Int'l Symposium. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC). New York: ACM Press, 2003. 189~200