

# 无线传感器网络的拓扑控制算法综述<sup>\*</sup>

刘林峰 金杉

(东南大学计算机科学与工程学院 南京 210096)

(计算机网络和信息集成教育部重点实验室 南京 210096)

**摘要** 无线传感器网络的首要设计目标即延长网络生命期,而网络拓扑作为路由层协议和 MAC 层协议的重要平台,对其进行控制是实现这一目标的支撑基础。本文总结和分析了传感器网络领域已有的拓扑控制方面的研究成果,阐述了多种受研究者关注较多的典型拓扑控制算法,并指出其中有待解决的问题,进而总结了拓扑控制算法设计中需考虑的因素,随后针对功率控制和分簇控制分别设计了两种算法模型,最后探讨了今后应研究的问题,指明了下一步研究中的重点和难点。

**关键词** 无线传感器网络,综述,拓扑控制,功率控制,分簇控制

## Overview of Topology Control Algorithms in Wireless Sensor Networks

LIU Lin-Feng JIN Shan

(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

(Key Laboratory of Computer Network and Information Integration, Ministry of Education, Nanjing 210096)

**Abstract** The main objective of wireless sensor network design is to fulfill the task of prolonging network lifetime. The network topology, which is the important foundation of routing layer protocols and MAC layer protocols, serves as the supportive groundwork for achieving this goal. This paper summarizes and concludes the existing research of topology control in wireless sensor networks. Some algorithms attracting many researchers are introduced in this paper and their defects are pointed out. The key factors in the designing of topology control algorithm then are proposed. Aiming to power control and clustering control two algorithm models are designed respectively. At last the problem in future research is discussed, furthermore, the key-stone and difficulty of research in wireless sensor networks are indicated.

**Keywords** Wireless sensor network, Survey, Topology control, Power control, Clustering control

## 1 引言

随着通信技术、嵌入式技术、传感器技术、无线技术的迅速发展和日趋成熟,具备通信能力、计算能力和感知能力的微型传感器节点开始在世界范围内涌现。数目众多的传感器节点协同工作,它们随机分布于监测区域周遭环境,通过自组织的无线通信方式构成传感器网络<sup>[1]</sup>(wireless sensor network, WSN)。节点所采集的兴趣数据逐跳路由至汇聚节点,以对客观物理世界的感知和控制。传感器网络具有易部署、自组织、高容错、可靠性等特点,在国防军事、环境监测和预报、智能家居、建筑物状态监控、空间探索、医疗卫生、城市交通等诸多领域有着广阔的应用前景,这也使得无线传感器网络成为当前无线网络领域的一个热门研究方向,它的出现被视作信息感知和采集领域的一场革命。在我国目前正在进行的下一代互联网 CNGI 的建设中,传感器网络被给予了高度重视,该领域的研究和部署工作也将相继开展。

传统无线网络的设计彰显高服务质量的保障和高效带宽的利用,然而传感器网络并不相同,由于缺乏持续、稳定的能量补充,其首要设计目标是通过高效使用能量来最大化网络生命期,从而也能采集更多的兴趣数据。其中 WSN 生命期<sup>[2]</sup>通常定义为在传感器网络系统的流量路由过程中,最早因耗尽电池能量而失效的节点的生存时间。网络生命期体现

了能耗的效率,生命期极大化是高效能耗 WSN 的优化目标,从本质上揭示了网络拓扑结构、节点可用能量和路由选择等因素对生命期的影响。从生命期极大化的角度来优化可控因素,以避免系统内节点能量达上限,从而能提高网络的整体能耗效率。传感器网络的绝大部分能量消耗于通信传输环节<sup>[3]</sup>,因此作为路由层协议和 MAC 协议的运行平台,网络拓扑显然是实现生命期最大化的必要条件。由于 WSN 的自组织、无线信道、节点功率可控等特点,使得对于其拓扑结构的优化控制得以施行。良好的拓扑结构不仅能提高路由协议和 MAC 协议的效率,从而实现 WSN 首要设计目标,拓扑结构的控制还与网络整体性能的优化存在着密切的联系,为时间同步、数据融合及目标定位技术提供支撑基础,因此研究拓扑控制对 WSN 而言具有重要意义。本文正式定义拓扑控制为一项通过调整节点传输功率和(或)节点间层次关系而能获得在一定程度上满足网络结构及应用场景需求的技术。拓扑控制是对节点间交互作用的协同控制,使节点所采取的局部优化能在宏观上推动网络向全局优化的方向演进,它是一项与图论、随机图论、概率论、运筹学、博弈论等多学科相关的技术。WSN 的拓扑控制属于 NP-hard 问题<sup>[4]</sup>,如何设计具有良好性能的近似解决方案属于当前 WSN 研究的热点和难点之一。

当前传感器网络中拓扑控制的研究开展得如火如荼,但对该领域现有成果的综合评述尚未见全面报道。选取前人工

<sup>\*</sup>国家自然科学基金资助项目(60573133)、国家自然科学基金资助项目(90604003)、CNGI 网络总体研究、国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2003CB314801)。刘林峰 博士生。

作中所提出的一些较为重要的算法进行比对和剖析,无疑有利于揭示拓扑控制的本质,并能引导下一步的研究方向。本文对传感器网络中已有的拓扑控制方面的研究成果进行了总结和分析,阐述了各种算法的性能和有待解决的问题,并归纳出传感器网络的拓扑控制算法所应具备的特征。本文在第2节首先对现有拓扑控制算法进行了分类,接着在第3、4、5节分别简述了多种受研究者关注较多的典型算法,并对所介绍的拓扑控制算法进行了比对和分析,进而总结了拓扑控制算法设计中需考虑的因素。在第6节探讨了今后应研究的问题,指明了下一步研究中的重点和难点。

## 2 拓扑控制的目标和分类

就通常意义下的 WSN 而言,其拓扑控制的共性目标主要包含:保障节点间可达性、降低能量损耗、提升网络容量、减小信道干扰以及增强空间复用率等多个方面。对于某些特定应用,针对网络需求,拓扑控制的目标还涉及支持弱移动性、减小传输延迟、优化通信链路质量等其它方面。由于节点发射功率的全方位扩散特征,因此 WSN 结构可抽象为单位圆图(unit disk graph, UDG)。从图论角度结合上述共性目标不难发现,经拓扑控制调整所获网络结构图应具备连通性、对称性/弱对称性、稀疏性、节点度(物理度/逻辑度)受限、平面性等基本属性。从算法中的拓扑管理方式、形成依据、实现需求等不同角度,拓扑控制算法存在多种归类方法。

(1)拓扑控制算法从管理方式可划分为节点功率控制和分簇拓扑控制两类,其中节点功率控制机制指通过设置或动态调整节点的通信功率,以保证网络拓扑连通、双向连通或多连通,同时尽量避免隐终端和暴露终端<sup>[5]</sup>问题。分簇机制采用分层结构形成处理和转发数据的骨干网络,其中非簇头节点可通过空闲休眠策略来达到节能目的。功率控制适用于网络规模相对较小、对兴趣数据准确性和敏感度要求较高的网络环境,而分簇控制适用于部分节点可以实行休眠策略的大规模网络;

(2)从拓扑的形成依据来看,算法可分为<sup>[6]</sup>几何方式和概率方式。几何方式以某种特定结构(如最小生成树(minimum spanning tree, MST)、RNG 图<sup>[21]</sup>(relative neighborhood graph)、GG 图<sup>[21]</sup>(gabriel graph)、DT 图<sup>[21]</sup>(delaunay triangulation)及 YG 图<sup>[21]</sup>(Yao graph)等来构架网络,概率方式(如几何随机图<sup>[22]</sup>、占位理论<sup>[23]</sup>、连续渗流理论<sup>[24]</sup>)指计算具有较好性质时的节点功率和度值,并按此形成拓扑;

(3)从算法的实现需求看,可分为基于精确地理位置的算法、基于方位信息的算法和基于邻居集信息的算法;

(4)根据最终生成拓扑中节点功率是否一致,可区分为临界传输功率(critical transmitting range, CTR<sup>[25]</sup>)算法和差异传输功率分配算法;

(5)从算法的执行频率,可把算法分为周期性执行算法与单数据包(per-packet)调整的拓扑控制算法;

(6)根据算法是否考虑节点的剩余能量问题,可分为基于能量的拓扑控制算法和非基于能量的拓扑控制算法;

(7)根据算法的实现需全局网络信息还是局部网络信息,可分为基于全局信息的算法和基于局部信息的算法。

随着拓扑控制研究的不断发展,多种分属不同类别的策略被组合用于拓扑的形成,因此拓扑控制算法的分类愈加趋于模糊,同一算法可能分属不同类别。本文将依照管理方式的划分标准,选取较为重要的拓扑控制算法,对其拓扑形成过

程、特点及优缺点进行描述和分析。

## 3 节点功率控制算法

以延长网络生命期作为前提,分别立足网络层和数据链路层分析拓扑需求:从路由的角度出发,网络拓扑应保持全局连通,使任意两传感器节点间存在可通信路径;为避免在数据转交过程中局部区域的负载过重及抑制 WSN 生命期的瓶颈形成,网络中能量相对充沛的节点对端之间的链接在路由时会被优先选择;从 MAC 协议的效率来看,网络拓扑的连通冗余度过高,则意味着节点的信号覆盖范围可能过大,会造成隐终端和暴露终端问题,从而引发数据报文的信道冲突,继而导致了数据重传及其产生的无谓能耗,最终会缩短网络的生存时间。节点的功率控制一般可转化为具有多种优良特征的图拓扑求解问题,回顾已有的无线多跳网络功率控制机制,较为典型的功率控制算法有 COMPOW<sup>[7]</sup>、LMA<sup>[8]</sup>、LMST<sup>[9]</sup>、CBTC<sup>[10]</sup>、R&M<sup>[28]</sup>、Dist\_RNG<sup>[30]</sup>、K-NEIGH<sup>[31]</sup>等。

(1)COMPOW(Common power)算法<sup>[7]</sup>。回复确认机制对于无线通信非常重要,因此链接的双向性是网络拓扑的必要条件之一。为此,作为最为典型的 CTR 算法 COMPOW 采用节点同构方式,即所有节点具有统一的传输功率,并且该功率是能确保整体网络的连通的最小功率。功率的统一性正是基于链接的双向连通性考虑,而功率的最小化是为了在降低传输能耗的同时提高网络的吞吐能力,因此 COMPOW 显然具有延长网络生命期、提升网络容量、降低 MAC 层冲突等多种优势。COMPOW 算法中统一功率的确定分三步进行:

①节点维护对应于不同功率等级的多个路由表,全体节点同时以某功率等级发射并形成拓扑;

②在生成的网络拓扑上执行 DSDV 协议,从而节点获得一个能反映与网内节点连通情况的路由表;

③节点选择与最大功率情形下全局连通程度相等的最低功率。

易证此时所有节点的最低功率等级一致,因而符合了功率的统一性。然而,功率的统一性和最小化带来益处的同时也导致 COMPOW 算法存在无法避免的缺陷。功率的统一性约束了 COMPOW 的适用范围,当节点分布不均时必将迫使所有节点采用过大功率,极大地违背了算法的设计目标;功率的最小化虽使得全局连通冗余度较低,但拓扑将不具备较好的容错能力。另外,对全局网络拓扑信息的需求也带来较为显著的负载开销增长和节点能耗增加。

(2)LMA(Local mean algorithm)算法<sup>[8]</sup>。LMA 算法是一种周期性算法,首先给定节点度值的上下限,通过动态调整传输功率使得节点度坐落于该区间,节点度的上下限选取需保证拓扑连通具有一定程度的可扩展性和冗余性。LMA 算法可分为如下三步骤:

①在起始状态,赋予所有节点相同的初始传输功率 TransPwr,节点定期广播一个包含自身唯一标识的报文 LifeMsg;

②对于接收到 LifeMsg 报文的节点,反馈给对端一个回复报文 LifeAckMsg,节点由反馈回的 LifeAckMsg 报文可统计出其周边邻居数 NodeResp;

③若 NodeResp 低于预设的度值下限 NodeMinThresh,节点将按公式(1)更新 TransPwr,若 NodeResp 高于度值上限 NodeMaxThresh,则按公式(2)更新 TransPwr。

$$\text{TransPwr} = \min \{ B_{\max} \text{TransPwr}, A_{\text{inc}} \cdot (\text{NodeM}$$

$$\text{inThresh} - \text{NodeResp} \cdot \text{TransPwr} \} \quad (1)$$

$$\text{TransPwr} = \max \{ B_{\min} \text{TransPwr}, A_{\text{dec}} \cdot (1 - (\text{NodeResp} - \text{NodeMaxThresh}) \cdot \text{TransPwr}) \} \quad (2)$$

式(1)和(2)中  $B_{\max}, A_{\text{inc}}, B_{\min}$  和  $A_{\text{dec}}$  为预设系数,从表达式可知它们直接关系到功率调整的幅度。LMA 算法优势在于简单和易部署,仅需依靠局部信息判断邻居数即可确定节点的功率,然而度值上下限及预设系数会对算法性能产生至关重要的影响,其选取应综合考虑节点分布、部署环境及应用背景等因素。此外,度值区间的单一考虑必将带来一个不可忽略的负面制约,即无法较好地权衡影响网络生命期的多种拓扑特性。

(3) LMST(Local minimum spanning tree)算法<sup>[9]</sup>。Li 等人提出一种基于本地最小生成树结构的拓扑控制算法 LMST,它是一种典型的基于邻近图的功率控制算法。LMST 算法由以下四个步骤组成:

- ①信息交互阶段,节点  $u$  定期以最大传输功率发送 Hello 报文,从而获知其可视邻居区  $NV_u(G)$  内的所有节点的信息;
- ②拓扑构建阶段,节点  $u$  独立地以 Prim 算法<sup>[19]</sup> 方式获得本地最小生成树  $T_u = (V(T_u), E(T_u))$ ;
- ③传输功率确定阶段,依据已确定的本地最小生成树的结构,节点决定自身传输功率;
- ④双向化处理阶段,由于所获拓扑中可能存在单向链接,为使网络具有双向连通这一良好特性,对当前所形成的拓扑中单向链接实施添加或删除。如图 1 所示,节点  $A$  与  $B$  间即为单向链接。

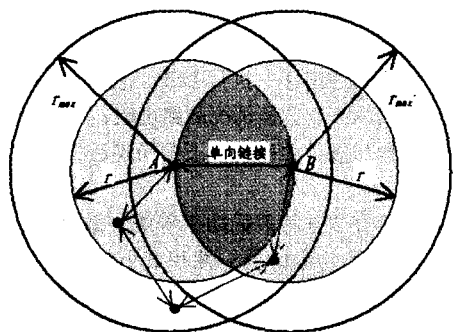


图 1 存在单向链接的 LMST 生成拓扑

LMST 通过全局调整局部独立构建的最小生成树,最终实现拓扑的双连通,能有效地降低维持全局连通的传输功率,且生成拓扑中节点具有值为 6 的度上限,缓解了 MAC 层冲突。LMST 算法是基于本地收集的信息构建拓扑,因此所需的交互报文量和时延均较小,且针对节点移动问题能有的放矢地进行局部拓扑修复。但 LMST 忽视了拓扑结构的健壮性,在拓扑生成过程中未考虑形成链接的对端能量是否相对充沛,所形成的脆弱拓扑很大程度上会削弱网络生命期的延续能力,无法满足拓扑之上路由协议均衡耗能的要求。

(4) CBTC(Cone-based distributed topology control algorithm)算法<sup>[10]</sup>。文[10]中提到一种基于锥角的近似算法 CBTC,CBTC 算法无需 GPS 等设备的支持,而仅依赖数据报文收发方向信息。CBTC 算法通常归结为以下三步:

- ①初始状态时,节点以低功率发送 Hello 报文,并收集其他节点的回复;
- ②节点根据邻居信息,判断若在周边所有锥角  $\alpha$ (以某节点为参考系)内均至少存在一个邻居则结束,否则继续增大传

输功率直至条件满足;

- ③移除冗余链接,以保证拓扑的对称性。

可以证明,当锥角  $\alpha$  大于  $2\pi/3$  时,拓扑的连通性和对称性无法同时得以保证,所有节点必须计算其所需最小功率,使得所有  $\alpha(\alpha \leq 2\pi/3)$  的锥形角度内存在可达下跳节点,此时方可确保网络的连通性。CBTC 算法能得到具有全局连通、对称性、节点度受限等特点的拓扑,但 CBTC 未对低能量节点采取保护策略,忽略了节点在路由中的能耗不平衡问题,因此若兴趣数据流量的分布不均,极易造成局部网络过早失效。

(5) R&M(Rodoplu and Meng)算法<sup>[28]</sup>。R&M 算法是一种基于节点位置、针对汇聚节点唯一场景的功率控制算法,通过计算转播区域和衡量转播代价,以低功率实现了网络连通。算法的实现分为两个阶段:第一阶段,每个节点分布式地计算局部闭包图,闭包图反映了一个该节点附近通信代价最低的邻居覆盖区域,当采用路径损耗模型且衰减指数为 2 时某节点  $i$  的闭包图如图 2 所示,因此确定了符合高效能耗目标的邻居集合;第二阶段,由汇聚节点始发起反向最小耗费树的找寻工作,最终每个节点生成一条通往汇聚点的最短路径。经 R&M 所获拓扑具有强连通、稀疏性、低能耗等良好特性,然而该算法与无线信号能量衰减模型密切相关,在应用中必须获知较为准确的模型参数,因此其部署性受到一定的限制。

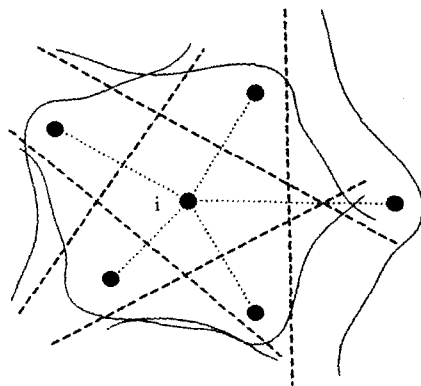


图 2 节点  $i$  的闭包图

(6) Dist\_RNG 算法<sup>[30]</sup>。Dist\_RNG 算法是一种基于方位信息的 RNG 图分布计算算法,算法可分为以下两节点:第一阶段,节点逐步扩大发射功率直至发现新邻居,根据邻居的方位信息确定一个以自身为起始点、与邻居连线为中轴、跨度  $2\pi/3$  的锥形区域,该区域定义为当前覆盖域(cover region);第二阶段,节点继续扩大功率至发现一个在当前覆盖域外的新邻居,计算该邻居的所覆盖的锥形区域,取此区域与覆盖域的并集作为覆盖域的更新,重复第二阶段直至覆盖域跨越  $2\pi$  或节点已达功率最大值。经证明,Dist\_RNG 算法最终能获得一个 RNG 图,如图 3 所示,尽管单向链接  $(u, v)$  生成的半月形内存在节点  $k$ ,但图中的双向链接能符合 RNG 图特征。拓扑多项性能指标,如节点度、传输范围、连通性、跳直径等往往互相冲突,而 RNG 图可作为一种介于 MST 和 minR 图的较好折中,因此 Dist\_RNG 算法具有广泛的应用价值。

(7) K-NEIGH( $K$ -neighbors)算法<sup>[31]</sup>。K-NEIGH 算法是一种典型的基于邻居集和距离估测技术的分布式控制算法,节点首先以最大功率广播 ID 编号,并根据接收到的广播报文运用距离估测技术进行由近至远的排序,因而确定  $K(K = c \log n)$  个最近节点置入邻居集,最后交互邻居集合,对单向链接实施删除或增添,以满足链接的双向对称性。K-NEIGH

算法所获拓扑具有连通性、节点物理度受限等良好特性,算法本身执行简单、报文复杂度较低,且距离估测技术的误差结果对算法性能也不会造成过大影响。

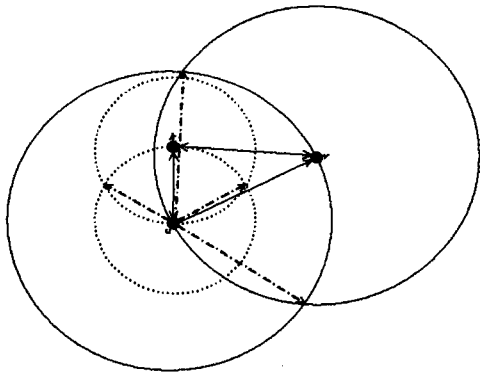


图3 Dist\_RNG算法示意图

从算法本身出发,算法执行所需的报文交互会消耗节点能量,传感器节点计算能力也极其有限,若复杂度过高亦不利于算法现实施行,所以生成拓扑的算法代价也是评判一种拓扑控制算法优劣的重要依据。对自组织网络而言,算法的分布性尤为重要,传感器网络的节点功率控制算法也不例外,并且分布式特性也必将降低算法对节点能力的要求。分布式特性表现为算法执行必须具有“本地化”的特点,其中“本地化”一般包括信息收集和拓扑调整两步,即每个节点基于其所获取的邻接区域信息对周遭拓扑制定适当的决策。其次,从节点层面来看,传感器节点的通信功率过高会造成其能量的过快损耗,且加剧节点间的信道干扰并导致通信冲突,而功率过低则会使网络内出现孤岛区域,因此在本地拓扑的控制中节点需权衡其通信功率的高低;从链路层面来看,由于拥有较高剩余能量的节点对端间的通信链接具有较强的健壮性,选择相对健壮的链接组成路由有益于 WSN 生命期的延长,因此健壮性也是功率控制中必须考虑的问题之一。综合分析,作者认为性能良好的功率控制算法应能在满足拓扑双向连通性的前提下,依照低功耗、低干扰、高健壮性的三者折衷方式确定节点的功率。此外,算法所基于预知信息(节点位置、信号方向、邻居集合)的精准度直接关系运行结果的优劣程度,同时预知信息愈精准则必然意味着对辅助设备需求愈发苛刻和算法代价的大幅提升,因此对于通常意义下的 WSN 应用,算法期望能凭借较“模糊”预知信息即可执行拓扑控制进程。

#### 4 分簇拓扑控制算法

节点根据网络拓扑为当前传输辖域内的邻居节点提供报文接收和转发服务,随着数据流量的经由,节点的无线收发能耗和通信模块的闲时开销使得电池能量不断降低。通常情况下,节点在未获知兴趣数据和承担转发任务时并不关闭通信模块,而节点的通信模块在空闲状态仍会侦听无线信道的占用情况和探测兴趣数据的传递需求,该状态的能耗与数据收发状态接近<sup>[3]</sup>。因此,全局网络拓扑被划分为相连的簇区域,在每块簇内依策选举簇头,由簇头构成贯穿整个拓扑的骨干网,并且休眠非簇头空闲节点,从而大幅度降低了空闲状态时侦听行为对节点能量的吞噬,进而延长了 WSN 的生命期。其中簇头除需担负簇内节点协调和数据转发任务外,一般还需具有数据融合功能,但本文的分析中暂不考虑融合功能。分簇机制渗透了聚类管理的理念,弥补了空闲状态节点无谓

能耗过高的缺陷,分簇的网络拓扑有利于分布式算法的应用,适合大规模部署的网络。分簇拓扑控制算法通常都可分为区域划分和簇头选取两阶段,两阶段在算法中出现的先后顺序略有不同。回顾前人所提出的分簇算法,较为典型的有 GAF<sup>[11]</sup>、LEACH<sup>[12,13]</sup>、TopDisc<sup>[14]</sup>、CLUSTERPOW<sup>[29]</sup>等。

(1) GAF (Geographical adaptive fidelity) 算法<sup>[11]</sup>。在文[11]中, Xu 等人提出一种基于地理位置的分簇算法 GAF,该算法首先将事件区域划分为如图 4 所示的虚拟方格,节点按照自身位置归入相应的格内,然后定期在格内选取簇头,簇头节点始终保持清醒状态,非簇头节点进入休眠状态。节点在休眠状态过后会再次与本格内其他节点交换信息来重选簇头,簇头通常由节点产生的定时随机值决定。由于簇头的选取具有一定的随机性,方格的边长  $r$  的选取必须能使相邻两格内任意节点可直接通信,因此  $r$  的大小如公式(3)所示:

$$r^2 + (2r)^2 \leq R^2 \Rightarrow r \leq R/\sqrt{5} \quad (3)$$

式(3)中  $R$  表示节点的最大通信半径。Santi 等人提出一种 GAF 改进算法<sup>[15]</sup>,在簇头选取时考虑其剩余能量。GAF 算法能显著降低节点侦听能耗,为最大限度降低侦听能耗,一般设置  $r=R/\sqrt{5}$ ,即簇头数最少。然而此方式未考虑簇区域较大导致簇内通信费用升高,因此仅适用于网络中流量较小即侦听费用成为能耗主因的情形。 $r$  的选取应根据实际网络环境对骨干网费用和簇内通信费用进行衡量。此外,对定位系统 GPS 的依赖,也使得 GAF 的部署受到很大局限。

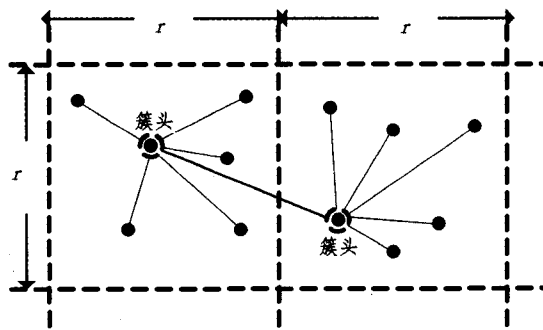


图4 事件区域划分

(2) LEACH (Low energy adaptive clustering hierarchy) 算法<sup>[12,13]</sup>。与 GAF 算法不同, LEACH 是一种先选簇头后划分区域的算法。LEACH 周期性地产生簇头,节点成为簇头取决于其产生的  $[0,1]$  区间内随机数是否低于  $T(n)$ 。若低于  $T(n)$ ,则当选簇头。 $T(n)$  的表达式如公式(4)所示:

$$T(n) = \begin{cases} P / \{1 - P \times [k \bmod (1/P)]\} & , n \in G \\ 0 & , \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中,  $P$  表示网络中簇头数所占节点总数的百分比,  $k$  表示当前选举轮数,  $G$  表示在最近  $1/P$  轮中未当选簇头的节点集合。簇头确定后,普通节点选择离其最近的簇头加入该簇头所辖区域,进而形成簇区域。LEACH 算法中节点等概率承担簇头角色,较好地体现了负载均衡思想。但是,由于簇头位置具有较强随机性,簇头分布不均匀,致使骨干网的形成无法得以保障。

(3) TopDisc (Topology discovery) 算法<sup>[14]</sup>。Deb 等人提出一种基于最小支配集问题的算法 TopDisc。与 LEACH 相同, TopDisc 本质上是一种先选簇头后划分区域的算法。按颜色数区分, TopDisc 分为三色算法、四色算法两种,颜色用于指代节点的当前状态。以四色算法为例, TopDisc 由以下

六步组成:

- ①发起节点标记自身为黑色,并广播一个拓扑发现请求报文;
- ②白色节点收到黑色节点的请求后标识为灰色,灰色节点等待与黑、灰两点间距离成反比的时间后再广播请求报文;
- ③白色节点收到灰色节点的请求报文则标识为深灰色,继续广播并开启定时器,定时时间与灰、深灰两点间距离成反比,若该节点在等待时间内收到黑色节点的请求报文,则标识为灰色,反之标识为黑色;
- ④当白色节点收到深灰色节点的请求报文,等待与深灰、白两点间距离成反比的时间,在等待时间内若收到黑色节点的请求报文,则标识为灰色,反之标识为黑色,随后继续广播请求;
- ⑤灰色或黑色节点忽略其他节点的请求;
- ⑥形成骨干网,黑色节点即为簇头,灰色节点为普通节点。

在以上步骤中,黑色指代已确定的簇头,深灰指代距最近黑点两跳的未覆盖节点,灰色指代簇内普通节点,白色指代尚未搜索到的节点。一个 TopDisc 执行的简单例子如图 5 所示,节点 A 发起拓扑发现请求并标识自身为黑色, B 收到 A 的请求后标识为灰色,等待后继续发送请求,节点 C、E 收到 B 的请求变成深灰色,随后继续发送请求并等待, D 接收到 C 的请求并在等待期内未收到黑色节点请求,则标识为黑色, C 收到黑色节点的请求后标识为灰色, E 等待期内未收到黑点请求因而标识为黑色。TopDisc 算法通过泛洪方式为每个节点标记颜色,随后根据颜色区分簇头和普通节点,可使节点在密集部署的 WSN 内快速成簇,并连接簇头形成树状的骨干网,但 TopDisc 算法重复执行的计算量和通信量过大,且未考虑节点的剩余能量问题,因而损害了分簇机制的合理性。

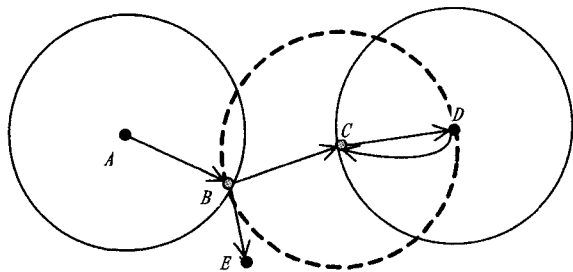


图 5 TopDisc 算法执行示例图

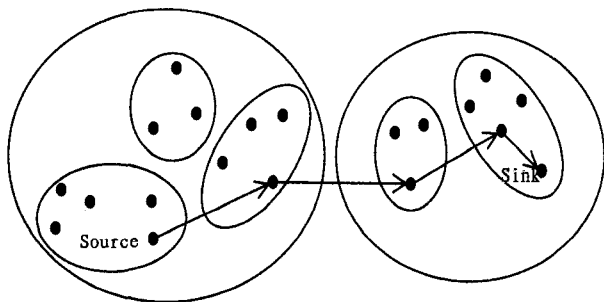


图 6 CLUSTERPOW 分簇通信示意图

(4)CLUSTERPOW 算法<sup>[29]</sup>。在节点分布不均情况下, COMPOW 算法中对所有节点功率要求相等的强制约束显得极不合理,因此 Kawadia 等人提出一种具有节点功率差异性的 CLUSTERPOW 算法。CLUSTERPOW 依照所处不同功

率等级时节点间的直接可达关系,表述为不同拓扑层次的成簇行为,从而可以转化为节点间的路由关系。在网络通信中,节点根据该层次分簇关系能切换至适当功率,避免了 COMPOW 中因极少数偏远节点而造成全体节点采用大功率的情形。一个三层的分簇通信图如图 6 所示,节点通信执行功率非减的规则。

分簇控制算法的本身需求与功率控制算法相同,因此不再赘述。节点管理的便捷是分簇机制的明显优势之一。从管理学角度出发,分簇算法适宜采纳如下通信原则:非骨干节点仅能与所属簇的簇头直接通信,簇头仅能与邻接簇的簇头及域内非骨干节点直接通信。在此通信原则下,骨干网的形成即簇头间的连通必须得以保障,簇内节点也应在本簇头的最大信号覆盖范围之内。侦听能耗的降低是分簇机制的又一重要设计理念,但闲时侦听能耗和网络通信开销的降低目标往往无法表现出完全一致的关系。因为侦听能耗的降低势必带来簇内通信代价的上升,所以本文认为在簇区域划分和簇头选取时应兼顾两方面的因素,使得全局能耗最小化。此外,与功率控制相同,出于实际传感器网络环境下兴趣数据流量是不可预测的考虑,还必须融入骨干网络的健壮性,以降低簇头的意外死亡机率。由于传感器网络是一种与应用相关的网络,因此高效分簇算法的设计必须考虑实际的应用环境和背景,使网络系统更加贴近应用,并且分簇算法应尽可能降低部署时的强制性约束条件,如对 GPS 等定位设备的需求,以便于在现实应用中具有更好的适用性和普遍性。

### 5 拓扑控制算法比较

由于传感器网络具有应用密切相关性,因此拓扑控制算法表现出多样性的特点,难以直接评判孰优孰劣。为便于说明,本文采用列表方式对上述的 7 种算法进行比较,表 1 中包括如 GPS 需求、周期性、计算量等 15 项算法属性。

表 1 拓扑控制算法比较表

算法	理论依据	功耗方式	分簇方式	几何方式	概率方式	周期执行	基于全局/局部信息	GPS 需求/定位技术
COMPOW	统一功率分配	√	×	×	×	否	全局	×
LMA	节点度区间约束	√	×	×	×	是	局部	×
LMST	邻近图 (MST)	√	×	√	×	是	局部	√
CBTC	邻近图 (Cone)	√	×	√	×	否	局部	×
R&M	转交区域和闭包图	√	×	√	×	否	全局	√
Dist_RNG	RNG 图	√	×	√	×	否	局部	×
K-NEIGH	K 邻居	√	×	×	×	否	局部	×
GAF	虚拟地理网格	×	√	×	√	是	全局	√
LEACH	随机数确定簇头	×	√	×	√	是	局部	×
TopDisc	最小支配集	×	√	×	×	是	局部	有无皆可
CLUSTERPOW	同功率等级互通同簇	×	√	×	×	否	全局	×

表 1(续)

算法	节点能量考虑	部署性	通信干扰程度	移动性支持	计算量	通信量	生成拓扑特点
COMPOW	无	较好	节点分布不均时较高	×	较小	较大	双连通、节点功率一般较低
LMA	无	较好	较低	×	较小	较大	节点度受限、链路有冗余
LMST	无	较差	较低	√	较大	较大	双连通、度上限为 6、功率较低
CBTC	无	较差	较低	√	较大	较大	节点度受限形成多对一(sink)的最优通信树
R&M	无	较差	较低	×	较小	较大	间于 MST 和 minR 图的较好折中
Dist_RNG	无	较好	较低	×	较小	较小	连通性、节点物理度受限
K-NEIGH	无	很好	较低	√	较小	较小	簇头功率较高、其他节点较低
GAF	有	较差	节点密集时较高	√	较小	较小	簇头分布可能不均
LEACH	有	较差	与簇头占总节点比例相关	×	较小	较大	节点功率较低、骨干网成树状结构
TopDisc	无	较好	较低	×	较小	很大	层次分簇结构
CLUSTERPOW	无	较好	较低	×	较小	较大	

注:对 GAF、LEACH 等存在改进算法的,表中反映的是其改进算法的性质。

自组织作为传感器网络的成网方式和根本属性,以自组织理论<sup>[20]</sup>来剖析网络系统能从本质上把握拓扑控制算法的设计原则。本文期望传感器网络成为一个在内在机制的驱动下能自行组织、自行演化、能主动地从无序走向有序,最终无限接近最优状态的自组织系统,系统内各节点交互作用。节点作用既是为了其他节点,又是为了全局目标,从而由节点间的因果联结而产生整体网络,即节点通过独立决策和局部优化协作,迭代趋近于网络生命期延长的目标。内在机制应是一种相对简单且能被叠加运用于系统各单元进而形成大规模自适应行为的规则。显然拓扑控制算法等算法协议正属于传感器网络的内在机制,因此也必须满足该性质。同时,节点作用所服务对象的双重性使得内在机制尽管是基于局部信息的策略,但仍需符合全局优化的发展方向,能形成使全局均衡地、稳定地演化的驱动力。综合前述分析不难发现,无论是功率控制抑或分簇控制,它们的设计皆应贯彻全局负载均衡思想和多因素权衡思想。全局负载均衡思想在功率控制中体现为拓扑周期性变化的形式,这样才能缓解低能节点的负载压力,而在分簇控制中负载均衡体现为定期重新选举簇头的形式,这是由于簇头作为骨干网的组成成员必会较快地成为低能节点;多因素权衡思想不仅体现在影响网络生命期的多种拓扑特性(如功率大小、干扰程度、健壮性)上,还体现在能耗

效率与拓扑控制算法实现代价这对矛盾的处理上。

**结束语** WSN 网络拓扑控制的研究是推动 WSN 进一步发展的关键问题。网络拓扑作为上层协议运行的重要平台,良好性质的结构能提高路由由协议和 MAC 协议的效率,有助于实现 WSN 首要设计目标。传感器网络的自组织方式和节点能力约束使拓扑算法很难获得接近最优状态的拓扑,拓扑控制算法的评价标准取决于算法的效率,高效的算法应同时呈现于两个方面:降低单位数据传输的所耗能量和降低算法的实现代价。从上述的分析可知,实质上拓扑控制的内部矛盾可概括为需以尽可能小的能量耗费均衡地实现全局数据的传输,并在此基础上还需考虑算法本身实现的代价、现实环境中流量的不可预知性以及网络环境等多方面。从研究方法看,针对特定环境及需求建立相应数学模型,随后寻找一种能被节点能力所允许的近似解法,此种方法成为一种较合适的算法设计方式。

本文从以下 10 个方面归纳了今后传感器网络需关注和研究的问题。

①首先,传感器网络中通常节点数异常庞大,因此算法的实现代价和部署性将越来越受注重。如何在拓扑性能不过度下降前提下尽可能兼顾算法的实现代价和部署性,必将成为拓扑控制研究中的重点和难点之一。

②第二,传感器网络是一种动态网络,本文所分析的拓扑控制算法都是基于通常意义下(如文[3])的网络生命期定义。而事实上,在大部分应用中,个别或局部的节点失效并不意味着全网的瘫痪,残余网络所采集的兴趣数据仍有抵达汇聚节点的可能。如何在局部网络出现故障后迅速进行修复、重构或维持剩余网络的继续运作,也属于亟待解决的问题。

③第三,目前传感器网络的网络安全性和容错能力方面研究还略显薄弱,安全性和容错能力在 WSN 的商业应用和军事应用方面显得尤为重要。由于传感器网络具有节点能力有限、节点分布随机、带宽较低、应用相关性等特点,将使得 WSN 的安全策略与传统网络安全策略差异较大。此外容错能力的提高与拓扑的低功率期望又将成为一对新矛盾,这对矛盾的权衡可借鉴前述的算法设计思想。

④第四,当前兴趣区域的覆盖度问题<sup>[26]</sup>研究略显不足。覆盖度问题指对随机散布节点的监测区域能否覆盖全部兴趣区域的判定,该问题的研究将在环境监测、空间探索等领域表现出很强的实用需求。

⑤第五,尽管传感器网络中节点仅具有弱移动性,但仍会严重影响拓扑结构的稳定,所以拓扑控制算法中必须提供对节点移动性的支持。当节点因移动拓扑改变时,能及时调整网络并恢复到稳定状态。

⑥第六,当前理论研究及仿真试验所基于的无线信道模型和能量衰减模型相对过于简单化和理想化,往往与真实 WSN 网络环境差异较大,从而导致理论研究结论在实际网络环境并不适用。因此,针对特定应用场景的理论研究需在模型的精准度和复杂度间选取恰当的折中点。

⑦第七,QoS 在传感器网络研究领域处于薄弱环节,对于针对突发事件处理的 WSN 应用,生成报文延迟较小、丢包率较低的拓扑显得极为重要,因此 QoS 也将是 WSN 的拓扑控制研究中关注点之一。

⑧第八,为延长 WSN 生命期,可采用两种不同的节点流量负载均衡策略:生成  $k$  连通<sup>[27]</sup>拓扑或定期执行基于能量的拓扑控制算法。前者使得拓扑维持一定的冗余度,节点需采

用相对较大的通信功率,因而导致了能量损耗的增加和信道干扰的恶化;后者定期执行算法,势必增加了交互报文量和计算量,进而也造成额外能量的损耗和传输延时的扩大。两者孰优孰劣,应结合算法复杂度(时间复杂度、报文复杂度)、原始拓扑及应用需求等因素进行综合判断。

⑨第九,当前关于拓扑控制的理论与算法设计通常基于二维平面网络的前提假设,然而事实上传感器节点的部署具有很强的随机性和地域受限性,因此三维立体空间更贴切传感器网络的实际部署环境。分析与研究三维空间中传感器网络的拓扑性质,运用结论设计相应的控制算法,也必将成为未来拓扑控制技术研究领域的趋势之一。

⑩最后,WSN的生命期优化目标涉及从底层硬件到上层应用的所有环节,因此仅通过拓扑控制往往难以达到最理想效果,需要拓扑控制与其他上下层协议的紧密耦合协同。因此,拓扑控制的设计还必须兼顾各层协议的特点,以便在WSN体系结构中扮演好承上启下的重要角色。

现有拓扑控制问题的研究通常着眼于局部网络结构或拓扑特征的实现,很少关注全局网络的拓扑特征,未能从全局网络特征合理、算法可行的双重目标出发来设计合适的方案。本文对传感器网络拓扑采用自顶向下的研究方法。由于大规模是传感器网络的典型属性之一,伴随而来节点间链接关系错综复杂,同时网络拓扑的多目标间交互作用也使得对传感器网络的定性分析愈加困难。通过刻画传感器网络的统计特性,根据统计特性要求寻找理想的拓扑形成方式,通过研究节点入网时功率设置和链接选择行为,是作者未来研究工作的重点之一。综上所述,WSN作为ad hoc网络的特殊分支和衍生种类,其拓扑控制及其它关键技术的研究可以在凸现自身特性基础上借鉴ad hoc已有的丰富成果及实验结论,密切结合应用背景和部署环境,遵照WSN目标需求权衡并把握算法设计中出现的多对矛盾的主要方面。随着拓扑控制技术的日趋成熟,传感器网络必将迎来更广阔的发展空间,展现出更巨大的应用价值。

## 参考文献

- Estrin D, Govindan R, Heidemann J, et al. Next century challenges: scalable coordinate in sensor network [A]. In: Proc. of 5th ACM/IEEE Int'l Conf on Mobile Computing and Networking [C]. Washington, USA: ACM Press, 1999. 263~270
- Chang J H, Tassiulas L. Routing for maximum system lifetime in wireless ad-hoc networks [A]. In: Proc. of 37th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing [C]. Monticello, IL, 1999
- Estrin D. Tutorial "Wireless sensor networks" part IV: sensor network protocols [EB/OL]. <http://nest1.ee.ucla.edu/tutorials/mobicom02/>. 2002/2006-5
- Amis A D, Prakash R, Vuong T H P, et al. MaxMin d-cluster formation in wireless ad hoc networks [A]. In: Proc. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000) [C]. Tel Aviv, Israel: IEEE Press, 2000. 32~41
- Yeh C-H. The heterogeneous hidden/exposed terminal problem for power-controlled ad hoc MAC protocols and its solutions [A]. In: Proc. of Vehicular Technology Conference [C]. Milan Italy: IEEE Press, 2004. 2548~2554
- 李铭. 拓扑控制[J]. 计算机世界报. 第40期 B7版
- Narayanawamy S, Kawadia V, Sreenivas R S, et al. Power Control in ad-hoc networks: theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol [A]. In: Proc. of European wireless Conf [C]. Italy, 2002. 156~162
- Kubisch M, Karl H, Wolisz A, et al. Distributed algorithm for transmission power control in wireless sensor networks [A]. In: Proc. of IEEE WCNC 2003 [C]. New Orleans: IEEE Press, 2003
- Li N, Hou J C, Sha L. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm [A]. In: Proc. of Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2003) [C]. San Francisco, CA: IEEE Press, 2003. 1702~1712
- Li L, Halpern J Y, Bahl P, et al. Analysis of a cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks [A]. Proc. of ACM Symp on Principles of Distributed Computing [C]. Newport, RI: ACM Press, 2001. 264~273
- Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing [A]. In: Proc. of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. Rome, Italy: ACM Press, 2001. 70~84
- Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660~670
- Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [A]. In: Proc. of the 33rd annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences [C]. Maui: IEEE Press, 2000. 3005~3014
- Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management [EB/OL]. <http://athos.rutgers.edu/dataman/papers/TopDisc.pdf>. 2001-5/2006-3
- Santi P. Silence is golden with high probability: maintaining a connected backbone in wireless sensor networks [A]. In: Proc. of 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks [C]. Berlin, 2004
- 刘林峰, 刘业. 传感器网络中基于模拟退火算法的拓扑控制方案 [J]. 通信学报, 2006, 27(9): 71~77
- 刘林峰, 刘业. 传感器网络拓扑的启发式分簇控制算法. 软件学报 [J] (已投稿)
- Hochbaum D S. Approximation Algorithms for NP-hard Problems [M]. Beijing: PWS Publishing Company, 1998. 266~293
- 殷人昆, 陶永雷, 谢若阳, 等. 数据结构(用面向对象方法与C++描述) [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 280~283
- 吴彤. 自组织方法论研究 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 3~27
- 周培德. 计算几何. 北京: 清华大学出版社, 2005
- Santi P. The critical transmitting range for connectivity in mobile ad hoc networks [J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2005, 4(3): 310~317
- Santi P, Blough D. The critical Transmitting range for connectivity in sparse wireless ad hoc networks [J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2003, 2(1): 25~39
- Gupta P, Kumar P. Critical power for asymptotic connectivity in wireless networks [A]. In: Proc of Stochastic Analysis, Control, Optimization and Application [C]. Boston, MA: IEEE Press, 1998. 547~566
- Yi C, Wan P. Asymptotic critical transmission ranges for connectivity in Wireless ad hoc networks with Bernoulli nodes [A]. In: Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C]. New Orleans, LA, 2005
- Wang X R, Zhang Y F, Lu C Y, et al. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks [A]. In: Proc. of ACM SenSys [C]. Los Angeles, CA: ACM Press, 2003. 28~39
- Diestel R. Graph theory. 第2版(影印版) [M]. 北京: 世界图书出版公司, 2003
- Rodoplu V, Meng T H. Minimum energy mobile wireless networks [J]. Selected Areas in Communications, 1999, 17(8): 1333~1344
- Kawadia V, Kumar P. Power control and clustering in ad hoc networks [A]. In: Proc. of IEEE Inforcom [C]. San Francisco, CA: IEEE Press, 2003. 459~469
- Borbash S, Jennings E. Distributed topology control algorithm for multihop wireless networks [A]. In: Proc. of IEEE International Joint Conference on Neural Networks [C]. Honolulu, HI: IEEE Press, 2002. 355~360
- Blough D, Leoncini M, Resta G, et al. The k-neighbors protocol for symmetric topology control in ad hoc networks [A]. In: Proc. of ACM MobiHoc 03 [C]. Annapolis, MD: ACM Press, 2003. 141~152