

A Survey on Routing Algorithms in Wireless Sensor Networks

Dongmei Xing

Department of Mathematics, Nanchang University, Nanchang Jiangxi
Email: 2404061160@qq.com

Received: May 23rd, 2019; accepted: Jun. 7th, 2019; published: Jun. 14th, 2019

Abstract

Wireless sensor networks are self-organized and consist of sensors with limited energy whose topological structures are constructed according to the strength of the signal transmitted by sensors as constituent elements. The researchers have designed a large number of routing algorithms from different perspectives and focusing on the performances of wireless sensor networks. Data are sent from the source to the sink in the wireless sensor networks by the means of the collection, storage and forwarding of data signals. We review and classify heterogeneous routing algorithms on wireless sensor networks. Those issues are considered in the points of topology control, energy optimization, transmission energy consumption control and the quality of the network service, etc. We think the ultimate purpose of the routing algorithms is to prolong network lifetime while making the network robust. In the meantime, let the performances of wireless sensor networks meet the predetermined requirement.

Keywords

Routing Algorithms, Network Topologies, Energy's Depletion, Network Lifetime, Wireless Sensor Networks

综述无线传感器网络路由算法

幸冬梅

南昌大学数学系, 江西 南昌
Email: 2404061160@qq.com

收稿日期: 2019年5月23日; 录用日期: 2019年6月7日; 发布日期: 2019年6月14日

摘要

传感器网络是由能量有限的传感器通过自组织形成的自助网络, 其拓扑结构由作为构成元素的传感器依

据发射信号的强弱构建而成。研究工作者从不同的角度,侧重不同的性能指标,设计了大量的传感器网络的路由算法。依据相应的路由算法,让数据信息在网络收集与存储转发,完成数据从源点送到汇聚点的任务。传感器网络的路由算法各异,对已有路由算法的总结分类,有助于设计出新的算法。我们从拓扑控制、能量优化与传输耗能控制、网络的服务质量等角度,综述路由算法,将路由算法归纳分类。认为路由算法的最终目的,在于让无线传感器网络的性能指标达到预定的要求,延长网络寿命,同时使网络具有好的健壮性。

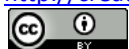
关键词

路由算法, 网络拓扑, 能量消耗, 网络寿命, 传感器网络

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

无线传感器网络(WSNs: Wireless Sensor Networks)通过无线通信技术,让大量的具有感应、计算、存储和无线通信能力的微型传感器建成一个自组织、自适应、多跳的无线传感器网络。无线传感器网络在多数时间必须保持低能耗,对带宽的要求不高。传感器网络在军事上和民用方面均有广泛的应用,其实用性非常强。行军作战中,由于机构与人员的移动性强,使用固定的接入点不能满足要求,而且固定的设施易为敌方发现和毁坏,各类信息的传递可以使用移动设备(如:车辆、坦克、舰艇、飞机等)安装有发射与接收功能的设备(如传感器)完成。无线传感器网络是无线(移动)自组网的一个子集。民用方面,大量手机、笔记本、车载系统等设备,在移动过程访问互联网,通过移动自组网络完成。在一些不方便安装固定设施的地方:如抗洪救灾现场、野外动物生活习性等的监控、病患的实时监控,以及不方便使用固定装置的各种情况,均可以通过移动自组网络达到监控的目的。从处理方式和数据角色地位的不同,研究传感器网络的应用主要侧重于三个方面:以数据为中心、层次型拓扑结构和基于局部性。从应用领域来分类,传感器网络体现为各种各样的物联网 IoT (Internet of Things),如:环境保护与监测,战争中对敌情的侦查和对兵力、装备、物资的监控,医疗中对患者的护理和对病房的监测,在危险工作环境中的安全监测,城市交通管理、建筑物内部的温度/照明/安全控制[1] [2] [3]。无线传感器网络中每个传感器所携带的能量有限,在一些危险或特殊的环境中安置传感器作为网络设备,节约传感器自身携带的能量,延长传感器网络的生命周期显得尤其重要。近年来,无线传感器网络是计算机领域的研究热点。

无线传感器网络是一种任务型网络,其基本功能是进行数据收集与发送传输、数据融合,无控制中心、自组织、资源有限、动态拓扑是其主要的特点。无线传感器网络自组建网的构成方式,涉及多方情况的规划与决策。考虑到组成网络的微型传感器的能量及存储量受限,传感器网络的各种任务必须协同合作与协同控制。在研究无线传感器网络的路由协议、网络安全等方面,引入博弈的方法,建立可选的策略域并设计合适的效用函数,综合考虑各方面的影响因素,得到最佳的解决方案[4] [5],使传感器网络的通信功能可以顺利实现。

2. 相关工作

组成无线传感器网络的微型传感器的能量、计算能力和存储容量均有限,无线传感器网络的生存时间成为设计路由协议考虑的主要因素之一[6]-[22]。如果注重数据的安全性,需要考虑传输信道的利

用率,同时兼顾数据的传输服务质量,设计网络协议时较注重快速恢复能力、延迟性功能[5] [9] [23]-[28]。数据在任何网络中传送,丢包情况在所难免,设计具有容错性的协议非常重要[23]。布局合理的无线传感器网络,均已经将网络的覆盖范围设定好。正常情况下,在指定范围内的数据均能够被送达汇聚结点(通常也称之为基站),但是实际使用过程中每个微型传感器接受数据的不均匀性,可能导致实际覆盖范围与设计的理论上的覆盖范围的不一致性情况出现。某些传感器结点在无线传感器网络失效之前能量耗尽,导致某些数据不能送达汇聚结点,针对这种情况,我们需要有填补出现的空洞的解决方案[7] [27] [29] [30]。

传感器网络能量的消耗涉及到多个方面,数据存储转发作为无线传感器主要功能之一,涉及数据存储和数据的转发两个方面的能耗。从数据的传播来考虑,传感器又分为发出信号的结点与接收信号的结点。数据接收过程中,分为接收数据消耗的能量与排队等候转发的存储数据所耗费的能量;数据的转发需要能量,包括数据转发前信号放大需要的能量,传播数据需要的能量。

从减少能量消费、提高网络服务质量与拓扑结构考虑,路由选择协议可以分成四类,虽然这四类有交叉性。第一类是控制每个结点的数据传送的能量消耗级次[29] [31] [32] [33];第二类是以主要能量消耗优化为目标的路由选择[4] [23] [31] [34];第三类是控制网络的拓扑结构[7] [8] [9]-[22] [24],拓扑控制或功率控制通常指的是通过网络的拓扑结构,调整每个节点的传输范围的发射功率;换句话说,拓扑控制确定了在每个节点的发射功率。数据在无线传感器网络中转发时,确定结点是否参与数据的传递、参与数据融合,结点的参与方式形成了网络的拓扑结构。第四类是以服务质量为衡量目标[25] [26] [27] [28],主要涉及可靠性方面的特征,例如安全、正确且时延较少地将数据传送到目的结点,确保服务质量,减少或扼止丢包与连接失败的情况发生,使网络具有快速恢复的功能,同时在可靠性有保障的前提下尽量增加网络的吞吐量。此外,无线传感器网络的研究,依据传输内容的分布情况设计路由选择算法[10],采用单播或组播方式传送数据。无线传感器网络的组成单元是微型传感器,合理布局无线传感器网络的设备,微型传感器安放时尽量做到减少发射信号间的干扰,提高传播质量;传感器进行通讯时使用一定的发射频率,拓宽供选择的无线射频范围,有利于数据的传送与网络性能的提高[35]。

下文中,我们分别从不同的角度阐述无线传感器网络的研究。首先,从网络拓扑控制方面着眼;接着,概述以能量优化为目标的而设计出的算法,分析能量控制的策略;然后叙述以服务质量为衡量准则的情况;最后,简要说明我们对路由算法的出发点和目的的理解。

3. 网络拓扑控制算法

无线传感器局域网络是自组形成的,每个微型传感器通过定时发射无线信号探知邻近的传感器,建立邻接关系。传感器之间的拓扑形式有多种:扁平(flat)拓扑结构[4] [24] [29] [31] [32],层次型结构[7]-[22] [30] [35],块状结构。扁平拓扑结构中,除了网络汇聚结点外其余的每个结点同属一个等级,彼此自由地依据地理位置及其发射功率的建立邻接关系。层次型结构中,除了网络汇聚结点外其余的结点之间有隶属关系,可能属于不同的层次,结点只将数据传送给自己的上层结点,同一个结点的所在层次可能动态变化。块状结构中,传感器按它们所处的地理位置,分成不同的区域(类似于有线网络中的自治系统),相邻区域的传感器之间的信息传递类似于有线网络中选择的 BGP (Border Gateway Protocol)发言人(BGP 发言人往往就是 BGP 边界路由器),隶属于扁平拓扑结构,参见图 1,图 2。

3.1. 扁平拓扑结构

在非层次型拓扑结构的无线传感器局域网中,每个结点处于同等的地位,针对不同的待优化特性,数据传送时选取路由的方式不同。

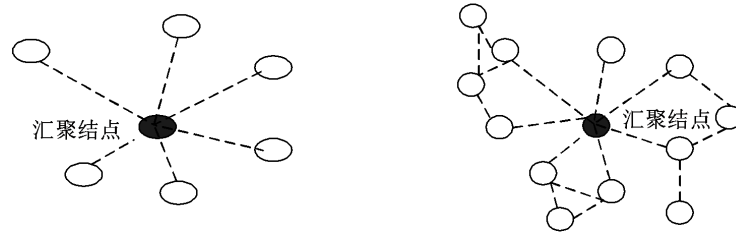


Figure 1. Single-hop and Multi-hop networks

图 1. 单跳与多跳网络

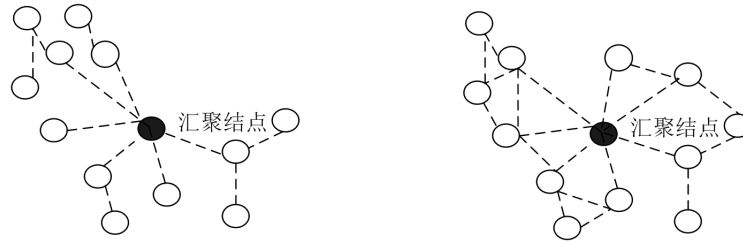


Figure 2. Hierarchy and flat structure

图 2. 层次与扁平结构

考虑到传感器网络中传感器结点的能量一直处于动态变化之中，以网络寿命极大化、能耗极小化为准绳，蔡钊等[4]用博弈论的思想提出了一种 WSN 拓扑控制算法。构建了势博弈的拓扑控制 PGTC (Potential Game Topology Control)模型(N, P, u(x))，其中结点域 N、策略域 P、效用函数 u(x)。定义最短潜在寿命、结点度值各为主要与次要效用函数，并且以最短潜在寿命为博弈的势函数。在策略域 P 中，主要与次要效用函数协作下设计出能效最佳的算法。理论分析得出纳什均衡点为势函数取得最大值的点，也是优化问题的最优解，即帕累托最优解。传感器的控制过程与转发过程具有可分离性，让传感器结点具有一定的计算功能(让簇头携带其中的调度模块，进行路径的分配)，宛考等[6]对于软件定义网络系统中的调度算法设计了新的算法，使得调度算法与网络实体的运行状态的信息收集和评价体系的权值选择相分离，达到网络中过程控制与数据收集、整理、融合相分离。传感器结点执行传输数据之前，利用其控制过程，将结点的状态信息添加到待转发的数据中，对数据流进行融合、分类，传感器结点依据网络中的状态信息参数选择最短路径进行数据转发，达到减少能耗的目标。Miguel Sepulcre 等[24]针对无线传感器网络中各结点处于同一层次的情况进行研究。设计多路径路由协议，采用具有自适应的、随机线性的路径编码的方法选择最佳路由。每个结点的窗口大小为某固定值，为确保服务质量，任何一对结点之间均有两条以上的路径信息。杨詠等[29]讨论了 WSNs 结点调度算法，从感知覆盖与通信覆盖两者权衡考虑，尽量减少冗余的传感器结点。设计了在蜂窝式拓扑结构的网络中，添加桥梁“结点”去填补“空洞”现象，使得整个网络达到全“通信覆盖”和全“感知覆盖”。信俊昌等[31]依据过滤思想设计了一种滑动窗口轮廓的查询(数据丢弃原则，丢弃数据减少传输的数据量，达到延长生存时间)算法，负载较高且剩余能量较低的结点构成轮廓。轮廓中的结点是影响网络生命活力的关键因此，算法持续地维护滑动窗口的轮廓查询，有选择地从轮廓中选择支配结点得到支配集和覆盖集，建立完整的网络拓扑结构。滑动窗口中存储一定数量的待传递的数据，这些数据经过滤后传送，分布式地、自适用地选择轮廓中的结点及传输路径，进而执行结点的存储转发功能。彭颖等[34]分析了移动网络中基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略，考虑了单信道中数据生成速率与传输延时已知的情况下，信道质量随着时间变化。信道质量的变化依据信道增益函数周期性服从某种规律(如 Rayleigh 分布、Rician 分布)，在给定数据传输率情况下，以数据传输能耗最小为目标考虑了数据的发送与停止的时间，选择最佳的发送与停止时间。

3.2. 层次型结构

在层次型网络拓扑结构的无线传感器局域网中, 隶属不同的层次的结点有: 汇聚结点(基站)、簇头结点、普通结点等, 不同的簇区域将整个网络划分成若干部分, 每个簇中的数据传给汇聚结点之前, 由簇头收集。

在静态的传感器网络(即: 传感器一旦布置好, 就不再发生位置改变)中, 簇头结点百分比的期望值确定, 首先通过自适用算法选择簇头, 然后网络中其余的结点自适用地加入某一个簇区域, 形成非簇头结点、簇头结点、汇聚结点这样三个层次的拓扑结构。W.R. Heinzelman [9]等针对第一通信模型, 提出了基于簇分层的 LEACH (Low energy adaptive clustering hierarchy)算法。算法分成二步完成: 第一步建簇阶段, 第二步稳定阶段, 数据在网络中依次进行存储与转发; 之后重复第一、第二步的动作, 直至网络生命终结。建簇阶段: 簇头选择与簇成员确定过程。簇头的生存时间动态变化, 每个结点独立地、分布式地参与竞选簇头。竞选簇头时, 给结点 n (n 代表任意一个结点)定义一个阈值 $T(n)$, 同时为结点 n 分配一个(0, 1)范围的随机数 p ; 若 p 小于 $T(n)$, 则结点 n 成为簇头; 被选上为簇头的结点 n 将自己为簇头的信息广播通知其他结点, 同时重置 $T(n) = 0$, 在后续选择中结点 n 不再被选为簇头。簇成员确定过程: 非簇头结点根据信号的强弱选择一个簇头, 并加入该簇。重复这种方式, 直到有足够的簇头, 所有簇区域能够将整个无线传感器网络覆盖为止。

$T(n)$ 定义为簇头结点百分比的期望值 P 、当前轮次、非簇头结点的百分比的函数, 具体如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times \text{mod}(r, 1/P)}, & n \in G \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中, r 是当前轮次, G 是在的 $1/P$ 轮中非簇头结点的集合。若每轮产生一个簇头结点, $\text{mod}(r, 1/P)$ 则代表在第 r 次重复中成为簇头的结点数目, G 是在最后的 $1/P$ 轮中非簇头结点的集合。

结点 n 的初始能量为 E_{n_max} 、剩余能量(也称为当前能量)为 $E_{n_current}$ 。 $E_{n_current}$ 的值与结点 n 选为簇头呈正相关, 故在 $T(n)$ 的计算中加入 $E_{n_current}$ 的影响因子 $\frac{E_{n_current}}{E_{n_max}}$; 经过多次选择簇头后, $E_{n_current}$ 变得很小时

重置 $T(n)$, 认为结点的剩余能量多或未成为簇头的结点成为簇头的可能性更大, $T(n)$ 的计算增加影响因子 $\frac{E_{n_current}}{E_{n_max}}$ 、 $\left(r_s \text{div} \frac{1}{P}\right) \left(1 - \frac{E_{n_current}}{E_{n_max}}\right)$ [12]。

调整了 $T(n)$ 为:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times \text{mod}(r, 1/P)} \cdot \frac{E_{n_current}}{E_{n_max}}, & n \in G \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{或 } T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times \text{mod}(r, 1/P)} \cdot \left[\frac{E_{n_current}}{E_{n_max}} + \left(r_s \text{div} \frac{1}{P}\right) \left(1 - \frac{E_{n_current}}{E_{n_max}}\right) \right], & n \in G \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

其中: G 为在 P 轮未成为簇头的结点集合, r_s 为结点 n 没有成为簇头的连续循环次数, 当 r_s 接近于或等于 $\frac{1}{P}$ 时, 将重置阈值为初始阈值。当节点 n 成为簇头, 将 r_s 重置为 0。

LEACH 算法确实比非层次结构的平面多跳路由算法更优, 仿真实验表明, 它延长了的网络生命周期 [9]。LEACH 算法只考虑了各传感器具有相同能量和性能的网络, 没有考虑微型传感器能量有差异的情

况；LEACH 算法选取簇头结点具有随机性，导致簇头分布在网络中可能不均匀；LEACH 算法是基于单跳的路由算法，即簇头直接将信息传递给汇聚结点，没有考虑通信的代价。针对这些情况，研究工作者改进了 LEACH 算法，改进的 LEACH 的算法有 C-LEACH (Centralized LEACH) [12]、MODLEACH (Modified LEACH) [13]、Stable Election LEACH [14]、MH-LEACH (Multi hop LEACH) [15]、Two Level-LEACH (Two levels LEACH) [16] [17] [18]、V-LEACH (Vice-LEACH) [19] [20] [21]，仿真实验比较了 LEACH 算法及相关算法的性能，进行了相应的参数分析[10] [11]。

C-LEACH [12]算法中引入了中心结点，中心结点(汇聚结点充当)收集了所有结点的地理位置、剩余能量等信息，确定簇头结点。C-LEACH 得到了均匀分布的簇头，但是只支持簇头结点到汇聚结点的单跳路由方式。

MODLEACH [13]算法对更换簇头的方式进行了改进，不需要在每个轮次中进行簇头的更换，只在其能量小于阈值时才进行换新；Stable Election (heterogeneous) LEACH [14]算法，依据结点的初始能量分为两类：正常结点和高级结点，高级结点有更多机会成为簇头；MH-LEACH (Multi hop LEACH) [15]算法在处理数据转发时，设计簇头不是直接将数据发送给基站，而是将它交付给位于到 BS (Base Station)的路径上的传感器结点，然后再传给基站。M. Ushal 等[16]综述 LEACH 算法的优点与不足，比较了改进算法与 LEACH 算法，Z. Fui 等[17]从能量均衡角度改进了 LEACH 算法，在部分簇区域引入了第二簇头负责数据接收与数据融合，簇头负责发送数据，达到平衡能量消耗，延长网络寿命。增加第二簇头的簇区，簇头或者离汇聚结点较远，或者剩余能量在本簇中较少。Two Level-LEACH [18]算法设计了两个簇头：第一簇头和第二簇头，将任务划分为两个组成部分：数据收集与数据传输，第一簇头用于传送数据，而第二簇头用于收集数据。改进的算法 V-LEACH [19] [20] [21]进行簇头选择时，选出了簇头和副簇头，副簇头在簇头失效时充当簇头，完成簇头的任务。Nigam, G. K.等[30]研究了用粒子群 PSO (particle swarm optimization)优化 LEACH 的 PSO-LEACH 算法。

无线传感器网络的 HEED (A Hybrid, Energy-Efficient Distributed clustering approach)算法[22]着眼于分层思想，认为无线传感器网络中的簇头结点与汇聚结点以一跳的形式进行数据传输不可取，将分散无线传感器网络中的结点划分成若干个簇，每个簇选取一个簇头，簇头负责与汇聚结点的数据通信。分层次、多侧面的方式选取簇头，选择时考虑主次两个因素：主要因素是结点当前的剩余能量与初始能量的百分比，次要因素是簇内的结点之间的通信耗能，以平均最小可达能量为衡量准则。

HEED 算法中剩余能量较多的结点具有较大的当选概率，在结点分布相对密集的区域，结点成为簇头的概率较大。HEED 算法可以有效控制簇头的分布，使其分布尽量均匀，也让能耗尽可能均匀地在网络区域内进行，避免局部结点失效影响网络寿命。算法选取簇头时，既利用了剩余能量信息，也利用了网络结点通信开销信息。HEED 要消耗能量进行每次的簇头选择；此外，在进行数据通信时，先将数据从源点传到本簇区域的簇头，簇头利用路由路径传到汇聚结点。路由路径从源点到汇点，除两端的端结点外，其余的中间结点(也称为中继结点)均为簇头。路径的选择时忽视了中继结点的情况，没有考虑由于每个簇中的内部结点相对固定可能引起的“能量洞”问题。

匡哲君[7]对于静态布局的无线传感器网络，从消除“能量洞”的角度出发，提出了对 HEED 算法的改进，即基于角色成员关系的分簇算法(A role, energy-efficient, membership clustering, 简称 REEM)。考虑角色、关系两个方面：从簇关系考虑，有成员结点与非成员结点两种；从结构层次来划分：有汇聚点，中继点和源点三种角色，同一层次与同簇不同层次的结点角色有着内在联系的。簇的内结点有中继点和源点两种角色，不同角色凭借自身拥有的能量来进行转换(汇聚结点剩余能量 > 中继结点剩余能量 > 源点剩余能量)，路由选择时未被选中的中继点处于休眠状态，所以中继点在休眠状态与工作状态之间转换。

Xu [36]等研究了 GAF (Geographical adaptive fidelity)算法，以结点的地理分布为依据进行簇划分，簇

是由地理分布上的某一正方形区域中的结点所组成；每一个簇随机选择一个结点作为簇头，相邻区域的两个簇之间的结点通过簇头可以相互通信。GAF 算法不能使能量在网络中均匀消耗。Gulnaz Ahmed [37] 等依据能量的多少将簇区域区分为：正常能量簇区域、高能量簇区域和超高能量簇区域，相应的簇头也分成三类，设计了基于层次的簇算法 SEED (Sleep-awake Energy Efficient Distributed)。不过，簇头与汇聚点之间的信息传递是单跳到达的。表 1 给出了一些有代表性的算法及其特性，跳数指簇头到汇聚点的跳数， n 是网络中的结点数量。

Table 1. Several typical algorithms and their features

表 1. 一些典型算法与其特性

| 特性 vs 算法 | 跳数 | 中心结点 | 簇头选择 | 副簇头 vs 第二簇头 | 结点初始能量 | 通信代价 | 时间复杂度 | 集中式 vs 分布式 |
|-----------------------|----|------|----------|-------------|-------------------------|------|-------|------------|
| LEACH | 1 | 无 | 每轮次重选 | 无 | 相同 | 不考虑 | O(n) | 分布式 |
| C-LEACH | 1 | 有 | 每轮次重选 | 无 | 相同 | 不考虑 | O(n) | 集中式 |
| MODLEACH | 1 | 无 | 每轮次有条件重选 | 无 | 相同 | 不考虑 | | 分布式 |
| Stable Election LEACH | 1 | 无 | 每轮次重选 | 无 | 不同，分普通结点与高级结点 | 不考虑 | O(n) | 分布式 |
| MH-LEACH | 多跳 | 无 | 每轮次重选 | 无 | 相同 | 不考虑 | O(n) | 分布式 |
| Two Level-LEACH | 2 | 无 | 每轮次重选 | 第二簇头 | 相同 | 不考虑 | O(n) | 分布式 |
| V-LEACH | 1 | 无 | 每轮次重选 | 副簇头 | 相同 | 不考虑 | O(n) | 分布式 |
| HEED | 多跳 | 无 | 每轮次重选 | 无 | 相同 | 考虑 | O(n) | 分布式 |
| REEM | 多跳 | 无 | 每轮次重选 | 无 | 相同，但依据不同的剩余能量将结点分成不同的角色 | 考虑 | O(n) | 分布式 |
| GAF | 多跳 | 有 | 不清楚 | 无 | 相同 | 不考虑 | 未给出 | 集中式 |

4. 能量优化为目标的算法及传输耗能的控制

要设计无线传感器网络路由算法或网络拓扑结构，既要满足感知覆盖，使通信质量符合要求，又要尽可能延长整个网络的生命周期，确保数据均能传送成功且尽可能节约传输能量。无线传感器网络运行中，传感器网络主要能量消耗是数据在信道中传播所消耗的能量。有众多研究工作者以能量优化为首要因素设计路由算法时，以达到控制数据信息在网络中收发过程的能量消耗为目标[8] [29] [32] [33] [34] [38] [39] [40] [41]。

在无线传感器网络中，结点的能耗主要包括三个方面的能量消耗：数据发射(或接收)时的能量消耗，数据在通信线路中传播时的通信能耗，以及数据发射前在路由器中增强无线信号所消耗的能量。

以能量控制为终极目的的算法，可能基于层次型结构拓扑网络，如：尚小溥[8]设计静止的传感器网络中 M-CEA (Mutex Cluster Establishment Algorithm)和 H-CEA (Hypergraph Cluster Establishment Algorithm)算法，遵循 LEACH 算法选取簇头的规则，依据产生的(0 1)区间的随机数与给定的阈值比较选取候

选簇头。M-CEA 算法可以控制距离汇聚结点远近的簇头结点的数量。M-CEA 和 H-CEA 算法可以让能耗具有一定的均衡性。杨詠等[29]同时考虑了网络的蜂窝拓扑结构与 LEACH 算法,设计了基于层次型拓扑结构的 RCSC (Communication and Sensing Coverage in the Randomly deployed WSNs)算法。算法 RCSC, 依照地理位置的正六边形中心安放传感器(即蜂窝式);考虑到可能有失效结点或有障碍物,选取出桥梁结点填补能量空洞,以传播过程消耗的能量优化为目标,兼顾无线传感器网络的覆盖区域极大。蜂窝式拓扑结构的调度,达到整个网络耗能极小、感知覆盖及通信覆盖区域极大化,延长了网络的生存时间。

在无线网络环境中,数据传播存在信道竞争,无线终端通过载波侦听多路访问/冲突避免机制访问信道。如果能够在信道处于最佳状态时进行数据信号发射,冲突可能会避免。彭颖[34]等研究了移动网络中传输能耗优化策略,在给定数据生成率、容许延时状态下,就分布式机会调度中单信道、单设备场景应用最优停止理论,选择最佳信道。无线链路信道增益函数 g 周期性地服从某种变化(如 Rayleigh 分布、Rician 分布),且在周期 T 内保持不变,选择最优时刻和最佳信道,进行数据传送,以达到节约传输能量目的。

Vikas Kawadia [32]等讨论了无线自助网络中能量控制与建簇。研究了结点非均匀地分散在空间中的场景。每个包的能量控制依赖于源点与终点,在进行能量控制的同时考虑簇的建立。文中给出了 3 个解决方法。首先提出了称为 CLUSTERPOW 的方法,由于地理位置的远近不同而导致传播能量的不同,得到不同的路由表。依据地理上的距离的不同,采用不同的路由表选择实现的路径,距离长的需要的传输能量更多,但是可以减少了在路由器中存储数据需要的能量。算法依据这种地理位置上的不同而产生了不同的路由表的策略,实现了在网络层空间复用技术,从而使得信道的传输容量极大化。如果源点与目的地址在地理上的距离达到一定值,使用封装技术,对于发送的数据包采用第二个称之为隧道的 CLUSTERPOW (Tunnelled CLUSTERPOW)的协议完成。文中最后设计的一个方法是,MINPOW (Minimum Power),这个协议运行在网络层,基本思想是让每个结点各自在通信中总的能量消耗上均提供一个最优的路由解法(optimal routing solution)。Swetha Narayanaswamy [34]等设计并实现了 COMPOW (Common Power)协议,利用了地理位置的远近设计路由,极大化整个网络的传输运载传输容量通过提供低能耗路由延长寿命,减少在 MAC 层的竞争。协议有即插即用的特征,它能够与任何能主动地维持路由表的路由协议联合使用。由 Linux 内核实现了所设计的路由选择,且可以嵌入到任何一个常用的路由协议中。Prasenjit Chanakt [39]等直接利用能耗的公式估计能耗,通过估计的值来设计各自的算法。通过详细的簇头能耗、成员能耗等计算公式,依据计算结果选择簇头、源点到汇点的路径等,减缓“空洞”现象出现。

另一种着眼于减少能耗的算法设计是基于连通支配集的思路。网络中的每个结点均能够通过连通支配集中的结点进行数据的传播或接收数据。

Wu [40]提出了寻找连通支配集来实现网络能耗均匀分布的 ECDS (Efficient distributed algorithm for calculating Connected Dominating Set in ad hoc)算法从而延长网络寿命。ECDS 算法在选择连通支配集时使用能量作为边的权值。算法有两个主要的步骤:一是建立最大独立集,由着色技术来完成该过程;另一个是选取网关结点,通过贪婪算法完成,而且网关结点不属于最大独立集。网关结点用于连通独立集中的结点,进行信息通信。ECDS 算法强调拓扑优化,有大量的管理控制消息产生。Chen [41]利用连通支配集得到网络的动态拓扑结构,设计了 SPAN 算法完成分布式拓扑结构的搭建。SPAN 算法与传统算法最主要的区别在于 MAC (Media Access Control)层特点,它采取了协议实现路由吞吐量的增加和延迟的减小,网络拓扑结构中的骨干结点可以自适应、周期性地进入睡眠状态。

5. 服务质量为衡量准则的算法

以服务质量为衡量目标[23] [24] [25] [26],综合考虑网络的时延、容错性、安全性,确保服务质量。

出现丢包情况时,相应的结点重新传递被丢弃的数据(利用所在时间间隙的不同,或者利用不同的时间维度完成),充分利用不同任务的时间维度不同、时间间隙的差异,使得无效网络路径的信息反馈之前就已经利用网络快速恢复功能保证了网络的正常通信。保证网络的服务质量,减少或扼止丢包率,减少连接失败的情况发生。这类研究问题以服务质量为主要因素,能量优化为次要因素。另一种防止因网络结点失效而导致不能确保服务质量思路是,定期给无线传感器结点供给能量,让网络不会因为结点失效而导致网络失去传播信息的功能;在供给能量时,以供给工具停下以供给能量的次数最小作为能量优化目标。

Lakshmi, N. V. S. S. R.等[23]就分布式无线传感器网络提出了一种基于 QoS (Quality of Service)的层次型路由协议 CQRP (Clustered QoS Routing Protocol),提出了一种方案解决分布式引起的结点移动、连接失败、传递数据的恢复、路由开销与降低丢包率问题。CQRP 协议将网络划分为若干簇,每个簇的簇头位于簇的几何中心,所有簇头连接成一条相互可达的路径。在进行信息传递时,簇成员将信息交于簇头,由簇头传递给目的结点。Miguel Sepulcre 等[24]就严酷恶劣的传播条件下数据传输具有可靠性和满足服务质量,提出了多路径策略。协议类似于有线网络的协议,对可靠性(Reliability)、延时(Delay)、确认(Validation)机制都加以考虑并设置应对方案。任何一对结点之间均构建了多条冗余路径,以确保网络数据传播的可靠性和满足具有容忍延时的服务质量要求。协议适合于其他的基于时分多路访(Time Division Multiple Access based, TDMA-based)的多跳无线网络。

传感器自身携带能量是有限的,在考虑如何有效地给关键结点(如汇聚结点,簇头结点)增加能量,L. Khelladi 等[25]考虑了这个问题,提出了一种移动充电模式,以最小的路径长度达到访问最多的结点,以给更多的结点充电。通过定期充电,结点不会因为能量的耗尽而失效,协议设计了一种路径方式。

6. 结束语

数据采集与数据的存储转发是无线传感器网络的主要功能。无线传感器网络有 6 个基本性能指标:能效、生存时间、时延、可扩展性、容错性、安全性,通常侧重于某个或某几个基本性能指标来衡量或评估无线传感器网络。通过对各具特色的无线传感器网络的路由算法的比较,我们了解到这些算法的设计侧重无线传感器网络的某些性能指标。通过从不同的角度和方面研究无线传感器网络,已经设计和实现了诸多的路由算法,它们应用在不同的场景中,如在物联网的底端无线网络的应用实现。路由算法的最终目标在于让无线传感器网络的性能指标达到预定的要求,使网络稳健而且具有尽可能长的寿命。

参考文献

- [1] 孙其博,刘杰,黎彝,范春晓,孙娟娟. 物联网:概念、架构与关键技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3): 1-9.
- [2] Atzori, L., Iera, A. and Morabito, G. (2010) The Internet of Things: A Survey. *Computer Networks*, **54**, 2787-2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- [3] Gubbia, J., Buyyab, R., Marusic, S. and Palaniswami, M. (2013) Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. *Future Generation Computer Systems*, **29**, 1645-1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- [4] 蔡钊,马林华,黄绍城,孙康宁,田雨. 基于序数势博弈的 WSN 拓扑控制算法[J]. 计算机科学与探索, 2016, 10(8): 1112-1121.
- [5] 沈士根. 基于博弈的无线传感器网络安全若干关键问题研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 东华大学, 2013.
- [6] 宛考,罗雪峰,江勇,徐格. 软件定义网络系统中面向流的调度算法[J]. 计算机学报, 2016, 39(6): 1208-1223.
- [7] 匡哲君. 无线传感器网络节能策略的研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [8] 尚小溥. 基于图相关理论的无线传感器网络若干拓扑问题研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [9] Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H. (2000) Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, Maui,

7 January 2000, 10 p.

- [10] Arora, V.K., Sharma, V. and Sachdeva, M. (2016) A Survey on LEACH and Other's Routing Protocols in Wireless Sensor Network. *Optik*, **127**, 6590-6600. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.04.041>
- [11] Nayebe, A. and Sarbazi-Azad, H. (2011) Performance Modeling of the LEACH Protocol for Mobile Wireless Sensor Networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, **71**, 812-821.
- [12] Heinzelman, W.B., Chandrakasan, A.P. and Balakrishnan, H. (2002) An Application Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **1**, 660-670. <https://doi.org/10.1109/TWC.2002.804190>
- [13] Mahmood, D., Javaid, N., Mahmood, S., Qureshi, S., Memon, A.M. and Zaman, T. (2013) MODLEACH: A Variant of LEACH for WSNs. *8th International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*, Compiègne, 28-30 October 2013, 158-163. <https://doi.org/10.1109/BWCCA.2013.34>
- [14] Smaragdakis, G., Matta, I. and Bestavros, A. (2004) SEP: A Stable Election Protocol for Clustered Heterogeneous Wireless Sensor Networks. *2nd International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications*, Boston, 2004, 1-11.
- [15] Neto, A.S., Cardoso, A.R. and Celestino, J. (2014) MH-LEACH: A Distributed Algorithm for Multi-Hop Communication in Wireless Sensor Networks. *The 13th International Conference on Networks*, Nice, 2014, 55-61.
- [16] Usha, M. and Sankarram, N. (2014) A Survey on Energy Efficient Hierarchical (Leach) Clustering Algorithms in Wireless Sensor Network. *The International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, **2**, 601-609.
- [17] Fui, Z., Wei, W. and Wei, A. (2013) An Energy Balanced Algorithm of LEACH Protocol in WSN. *International Journal of Computer Science*, **10**, 354-359.
- [18] Peng, H., Dong, H. and Li, H. (2015) LEACH Protocol Based Two-Level Clustering Algorithm. *International Journal of Hybrid Information Technology*, **8**, 15-26. <https://doi.org/10.14257/ijhit.2015.8.10.03>
- [19] Sindhwani, N. and Vaid, R. (2013) V LEACH: An Energy Efficient Communication Protocol for WSN. *Mechanica Confab*, **2**, 79-84.
- [20] Ahlawat, A. and Malik, V. (2012) An Extended Vice-Cluster Selection Approach to Improve V-LEACH Protocol in WSN. *3rd International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*, Rohtak, 6-7 April 2013, 236-240.
- [21] Shah, H. and Bhoyar, S.R. (2014) Improved V-Leach Protocol in Wireless Sensor Network with Data Security. *OSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, **9**, 49-54. <https://doi.org/10.9790/2834-09524954>
- [22] Younis, O. and Fahmy, S. (2004) HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad-Hoc Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **3**, 366-379. <https://doi.org/10.1109/TMC.2004.41>
- [23] Lakshmi, N.V.S.S.R., Babu, S. and Bhalaji, N. (2016) Analysis of Clustered QoS Routing Protocol for Distributed Wireless Sensor Network. *Computers & Electrical Engineering*, **64**, 173-181.
- [24] Sepulcre, M., Gosalvez, J. and Coll-Perales, B. ((2016)) Multipath QoS-Driven Routing Protocol for Industrial Wireless Networks. *Journal of Network and Computer Applications*, **74**, 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.08.008>
- [25] Khelladi, L., et al. (2016) Efficient On-Demand Multi-Node Charging Techniques for Wireless Sensor Networks. *Computer Communications*, **101**, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.10.005>
- [26] Singh, S. and Sharma, R.M. (2015) Some Aspects of Coverage Awareness in Wireless Sensor Networks. *Procedia Computer Science*, **70**, 160-165. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.10.065>
- [27] Pughat, A. and Sharma, V. (2017) Performance Analysis of an Improved Dynamic Power Management Model in Wireless Sensor Node. *Digital Communications and Networks*, **3**, 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2016.10.008>
- [28] Li, Z., Dong, C., Wu, F., Wang, H. and Zhao, W. (2017) Delay Constraint Energy Efficient Broadcasting in Heterogeneous MRMC Wireless Networks. *Computer Communications*, **97**, 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.09.011>
- [29] 杨詠, 汪文勇, 唐勇. 基于通信与感知覆盖的 WSNs 结点调度算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(7): 54-60.
- [30] Nigam, G.K. and Dabas, C. (2018) ESO-LEACH: PSO Based Energy Efficient Clustering in LEACH. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, In Press. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.08.002>
- [31] 信俊昌, 王国仁, 张小艺. 无线传感器网络中滑动窗口轮廓查询算法[J]. 计算机科学与探索, 2009, 3(1): 37-50.
- [32] Kawadia, V. and Kumar, P.R. (2003) Power Control and Clustering in Ad Hoc Networks. *Proceedings of IEEE INFOCOM*, San Francisco, 30 March-3 April 2003.
- [33] Narayanaswamy, S., Kawadia, V., Sreenivas, R.S. and Kumar, P.R. (2002) Power Control in Ad-Hoc Networks:

- Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the COMPOW Protocol. *Proceedings of European Wireless 2002 Next Generation Wireless Networks: Technologies, Protocols, Services and Applications*, February 2002, 156-162.
- [34] 彭颖, 王高才, 黄书强, 王淦, 李道丰. 移动网络中基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略[J]. 计算机学报, 2016, 39(6): 1162-1175.
- [35] 李远. 分层异构无线网络的干扰特性和理论性能研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- [36] Xu, Y., Hwism, N.N. and Estrin, D. (2001) Geography-Informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing. In: *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM, New York, 70-84. <https://doi.org/10.1145/381677.381685>
- [37] Ahmed, G., Zou, J., Fareed, M.M.S. and Zeeshan, M. (2016) Sleep-Awake Energy Efficient Distributed Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks. *Computers and Electrical Engineering*, **56**, 385-398. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2015.11.011>
- [38] 黄宇. 无线网络高能效资源控制理论和方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- [39] Chanak, P., Banerjee, I. and Rahaman, H. (2015) Load Management Scheme for Energy Holes Reduction in Wireless Sensor Networks. *Computers and Electrical Engineering*, **48**, 343-357. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2015.05.013>
- [40] Wu, J., Dai, F., Gao, M., et al. (2002) On Calculating Power-Aware Connected Dominating Sets for Efficient Routing in Ad Hoc Wireless Networks. *Communications and Networks*, **4**, 59-70. <https://doi.org/10.1109/JCN.2002.6596934>
- [41] Chen, B., Jamieson, K., Balakrishnan, H. and Morris, R. (2002) Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks. *Wireless Networks*, **8**, 481-494.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3983, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjwc@hanspub.org