

无线传感器网络拓扑控制的理论探讨

张 学 龚海刚 刘 明

(电子科技大学计算机学院 成都 611731)

摘 要 拓扑控制是无线传感器网络中重要的节能技术,并且已经形成了功率控制和睡眠调度两个主流研究方向。针对当前研究工作中存在的问题,对拓扑控制进行了基础性的研究。全面地考虑了网络的通信能耗和空闲能耗,在理想情况下给出了以最小化能耗为目标的拓扑控制问题的一个明确定义;证明了这个问题是 NP-难的,同时非形式化地讨论了更实际的拓扑控制问题的计算复杂性;并且在此基础上,进一步提出了关于如何设计能量高效的拓扑控制协议的 3 个必要性原则。希望本研究成果有助于探索更好的拓扑控制协议。

关键词 传感器网络,拓扑控制,能量高效,复杂性,设计原则

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Theoretical Discussion about Topology Control for Wireless Sensor Networks

ZHANG Xue GONG Hai-gang LIU Ming

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract Topology control is an important energy-saving technique used in wireless sensor networks. It has evolved into two dominant research directions, power control and sleep scheduling. Based on the observation of existing problems, this paper did fundamental research on topology control. We made a full-scale consideration on energy consumption of the network, both consumed in communications and in idle states. Then, under an ideal circumstance, we proposed a clear definition of the topology control problem with the objective to minimize energy consumption. We proved that it is NP-hard, and informally discussed the computational complexity of more realistic topology control problems. Based on that, we further put forward three necessary principles about how to design energy efficient topology control protocols. It is wished that this paper could contribute to the development of better topology control protocols.

Keywords Sensor networks, Topology control, Energy efficiency, Complexity, Design principles

无线传感器网络有着广阔的应用前景和重大的应用价值,然而有限的能量供应阻碍了无线传感器网络的应用。因此如何最大限度地延长网络的生存时间是无线传感器网络研究的一个主要问题。拓扑控制作为一种重要的节能技术,受到了广泛的关注。所谓拓扑控制,简言之,就是要提供一个良好的网络拓扑。拓扑控制研究不仅仅在于使其能十分有效地节省能量,从而延长网络的生存时间,还对减小通信干扰、增大网络容量、提高 MAC 协议和路由协议的效率等具有重要的意义。

拓扑控制研究一般以节能为主要设计目标,并且已经形成了功率控制和睡眠调度两个主流方向。功率控制的基本思想是通过降低节点的发射功率来降低网络的能耗,睡眠调度的基本思想是通过关闭冗余节点来降低网络的能耗。虽然近几年来研究人员提出了多种多样的拓扑控制算法,但是,拓扑控制研究仍然存在着许多问题。首先,大多数的研究工作对所研究的拓扑控制问题没有给出清晰的定义,而仅仅给出问题的模糊描述。这一方面是因为无线传感器网络是应用相关的,另一方面是由问题本身的复杂性造成的。其次,大多数的

研究工作不能全面考虑网络的能耗。功率控制主要考虑如何降低网络的通信代价,睡眠调度主要考虑如何降低网络的空闲能耗,然而很少有工作将二者结合起来考虑。再次,拓扑控制研究缺乏理论基础,大多数的作品仅仅是通过有限规模的模拟或者少量节点的实验来代替理论分析。最后,由于上述几个问题的存在,带来了一系列的其他问题,诸如算法的优劣难以度量,算法的实用性较差,研究结果不具有说服力等。

有鉴于此,本文对拓扑控制进行了基础性研究,其贡献可概括为以下几点:(1)综合地考虑了网络的通信代价和空闲能耗;(2)给出了以最小化能耗为目标的拓扑控制问题的一个严格定义;(3)讨论了无线传感器网络中的拓扑控制问题的计算复杂性;(4)提出了设计能量高效的拓扑控制协议的 3 个必要性原则。

下面首先介绍拓扑控制的研究现状;然后提出一种新的网络能耗模型;再给出以最小化能耗为目标的拓扑控制问题的一个严格定义及其复杂性分析,同时非形式化地讨论更实际的拓扑控制问题的计算复杂性;在此基础上,进一步讨论关于拓扑控制协议设计的原则性问题,并提出了设计能量高效

到稿日期:2009-11-20 返修日期:2010-01-27 本文受国家自然科学基金(60903156,60903158,60703114)资助。

张 学(1975—),男,博士,讲师,主要研究方向为无线自组织网络,E-mail:zhangxue@uestc.edu.cn;龚海刚(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线网络;刘 明(1972—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线网络。

的拓扑控制协议的3个必要性原则;最后总结全文。

1 拓扑控制的研究现状

目前拓扑控制研究一般以能量高效作为主要设计目标,并集中于功率控制和睡眠调度两个方面^[1]。

功率控制的基本思想是:根据信号衰减模型,多次短跳通信往往比一次长跳通信更节能,因而降低节点的发射功率可以达到节能的目的。功率控制问题是复杂的,对于其复杂性的认识是基于发射范围分配问题,又称RA(Range Assignment)问题。设节点的位置是已知的,RA问题就是要在保证网络连通的前提下,使网络中所有节点的发射功率的总和最小。在一维情况下,RA问题可以在多项式时间内解决;然而在二维和三维情况下,RA问题是NP难的^[2,3]。在功率控制方面,代表性的研究工作有Narayanaswamy等人提出的COMPOW^[4]、Kawadia等人提出的CLUSTERPOW^[5]、Kubisch等人提出的LMA/LMN^[6]、Wattenhofer等人提出的CBTC^[7]、Li等人提出的DRNG/DLMST^[8]等。关于功率控制的综述可参见文献^[9]。

睡眠调度的基本思想是:无线传感器网络通常是密集部署的,网络中存在着大量的冗余节点,因而可以通过关闭冗余节点的办法来达到节能的目的。对于其复杂性的认识是基于图论上的最小支配集问题。所谓最小支配集问题,就是要寻找一个最小的节点子集,使得任何一个节点,或者属于这个集合,或者与这个集合中的某个节点相邻。理想地,基于分簇的拓扑控制就是要选取最少且足够的链路作为网络的通信骨干,同时减小控制和维护的开销。图论上的最小支配集问题和最小连通支配集问题是对分簇方法的最好描述。众所周知,最小支配集问题和最小连通支配集问题都是NP完全问题。在睡眠调度方面,代表性的研究工作有Chen等人提出的SPAN^[10]、Kumar等人提出的RIS^[11]、Xing等人提出的CCP^[12]、Xu等人提出的GAF^[13]、Deb等人提出的Top-Disc^[14]、Younis等人提出的HEED^[15]等。

关于拓扑控制问题的复杂性,未见专门的讨论,其原因是难以给出拓扑控制问题的严格定义。不管是发射范围分配问题,还是最小支配集问题,即使在十分理想的情况下,也都不能作为拓扑控制问题的定义,因为它们与实际的拓扑控制问题相差甚远。功率控制着眼于降低网络的通信代价,睡眠调度着眼于降低网络的空闲能耗,而且二者有时是矛盾的(具体分析见5.1节)。因此对于一般的网络而言,无论是功率控制还是睡眠调度,都不能做到真正意义上的能量高效。然而很少有工作将二者结合起来。据我们所知,在综合考虑网络的通信代价和空闲能耗方面,Xing等人做出了重要的尝试,并且提出了MPCP协议^[16]。不管是Xing等人的工作还是以上所述的其他工作,都局限于一个具体的拓扑控制协议,都不是专门对拓扑控制基础理论的研究。本文试图在全面考虑网络能耗的基础上,给出拓扑控制问题的一个严格定义及其复杂性分析,并在此基础上,进一步讨论关于拓扑控制协议设计的原则性问题。

2 网络能耗模型

一个网络可以形式化地表示为 $G=(V,E)$,其中 V 是代表传感器节点的集合, E 是代表通信链路的有向边的集合。

本文用 V_G 来表示 G 的分量 V ,用 E_G 来表示 G 的分量 E 。 V 中的一个节点是一个四元组 (L,C,B,T) ,其中, L 是节点的位置,不同的节点具有不同的位置; $C=(P^s, P^r, P^i, P^o)$, P^s 是节点运行发送电路所需的基本功率, P^r 是节点的接收功率, P^i 是节点空闲侦听时的功率, P^o 是节点睡眠时的功率; B 是节点的带宽; T 是节点的类型,可以取值为SOURCE,RELAYING或DESTINATION,分别代表源节点、接力节点和目的节点。 $V=V_s \cup V_r \cup V_d$,其中

$$V_s = \{(L, C, B, T) | T = \text{SOURCE}\}$$

$$V_r = \{(L, C, B, T) | T = \text{RELAYING}\}$$

$$V_d = \{(L, C, B, T) | T = \text{DESTINATION}\}$$

需要说明的是,源节点也具有接力功能,目的节点在其它文献中常被称为汇聚节点(Sink Node)。 E 中的边是节点的有序对 (u,v) ,代表从 u 到 v 的链路。

下面详细讨论网络的能耗模型。首先面临这样一个困难:不同型号的传感器节点可能支持不同的工作模式,即使支持相同的模式,也往往采用不同的技术,因而能耗情况各不相同。为了简单,本文假设传感器节点只有两种模式:工作模式和睡眠模式。在工作模式,传感器的各个部件都是工作的,节点能够采集、处理、发送、接收数据以及做各种类型的计算。本文假设节点的发送部件和接收部件是集成在一起的,通常称为收发器。这意味着节点不能同时发送和接收数据。这符合大多数的实际情况。如果节点的发送部件和接收部件是分开的,下面的能耗模型只需稍作修改,本文的结论仍然适用。在睡眠模式,节点的处理单元被关闭,但是定时器或其它的触发机制依然运行,可以唤醒节点。

当传感器处于睡眠模式时,其功耗不管有多大,和其它模式相比总是最小的。因此大多数的研究工作不考虑睡眠时的能耗,即认为节点睡眠时的能耗为零。但事实上,节点在睡眠时依旧耗能,不管这种能耗有多小。本文的能耗模型要将节点睡眠时的能耗计算在内。这一方面是出于完整性考虑;另一方面的考虑是,如果节点在工作模式使整个网络增加的功耗不超过节点睡眠时的功耗,那么这个节点就不应该睡眠。

本文将整个网络的功耗看成是所有节点的功耗和所有边的功耗的总和。节点 u 的功耗定义为

$$P_u = \begin{cases} P_u^s, & \text{如果 } u \text{ 处于睡眠模式} \\ (1-\lambda_u)P_u^i, & \text{如果 } u \text{ 处于工作模式} \end{cases}$$

式中, P_u^s 是节点 u 睡眠时的功耗, P_u^i 是节点 u 空闲侦听时的功耗, $\lambda_u = (R_u^s + R_u^r)/B_u$, R_u^s 是节点 u 的发送速率, R_u^r 是 u 的接收速率, B_u 是节点 u 的带宽。

边 (u,v) 上的功耗定义为 $P_{(u,v)} = \lambda_u^s P_u^s(d(u,v)) + \lambda_v^r P_v^r$,其中, $\lambda_u^s = R_u^s/B_u$, $\lambda_v^r = R_v^r/B_v$, $P_u^s(\cdot)$ 是节点 u 的发射功率, $d(u,v)$ 是 u 和 v 的欧氏距离, P_v^r 是 v 的接收功耗。 $P_u^s(\cdot)$ 通常建模为 $P_u^s(d) = kd^\alpha + P_u^s$,其中, k 是常数, α 是路径衰减指数(path loss exponent), P_u^s 是节点 u 运行发送电路所需的基本功率。

因为目的节点通常具有很强的能力,不需要考虑能耗问题,所以本文假设任意两个目的节点都有边直接相连,并且认为目的节点上的功耗和它们之间的边上的功耗都为零。

按照上述定义,可以证明,所有节点的功耗与所有边的功耗的总和等于网络中所有传感器节点的功耗的总和。这样定义的能耗模型是合理的。需要说明的是,本文的网络模型中

的节点概念不能完全等同于传感器节点,因为本文将传感器节点的一部分功耗定义在边上。这样做的好处是能够把网络的通信能耗和空闲能耗清晰地区分开来。在本文定义的能耗模型中,边上的能耗就是通信能耗;节点上的能耗就是除通信能耗之外的其它能耗。因为无线传感器网络的能耗主要是由通信能耗和空闲能耗构成的,所以节点上的能耗可以理解为空闲能耗。

3 拓扑控制问题的定义及复杂性分析

要分析拓扑控制问题的复杂性,必须对拓扑控制问题给出明确的定义。因为无线传感器网络是应用相关的,不同的应用场景对拓扑控制的要求也不尽相同,所以不太可能给出一个通用的定义。而且实际的拓扑控制问题要考虑的因素极多,这些因素之间又有着错综复杂的联系,所以还必须做大量的简化。因为保证连通性和能量高效是无线传感器网络设计中的两个普适原则,所以这部分首先在理想情况下定义这样的拓扑控制问题:在不破坏网络连通性的前提下,创建消耗能量最少的网络拓扑。然后证明这个简化的拓扑控制问题是 NP-难的。最后在此基础上,进一步非形式化地讨论实际的拓扑控制问题的计算复杂性。

3.1 问题定义

源节点采集的所有数据构成网络的输入。用一个输入函数 $i:V_s \rightarrow N$ 来表示,其中 N 是自然数集。 $i(u)$ 表示源节点 u 产生数据的速率,单位为比特/秒。类似地,目的节点收集到的所有数据构成网络的输出,用一个输出函数 $o:V_d \rightarrow N$ 来表示。 $o(v)$ 表示目的节点 v 收集数据的速率。

设 $S = \{WORKING, SLEEPING\}$, 其中, $WORKING$ 代表工作模式, $SLEEPING$ 代表睡眠模式。设 $\Psi = (\psi^r, \psi^t)$, 其中, ψ^r 是 $V \rightarrow S$ 的函数, ψ^t 是 $E \rightarrow N$ 的函数。 Ψ 作用在网络 G 上所得的网络拓扑表示为 $\Psi[G]$, 节点 u 属于 $V_{\Psi[G]}$ 当且仅当 u 属于 V_G , 边 (u, v) 属于 $E_{\Psi[G]}$ 当且仅当 $\psi^r(u) = WORKING$ 并且 $\psi^t(v) = WORKING$ 。

定义 1(拓扑控制) 称 $\Psi = (\psi^r, \psi^t)$ 为 G 上的一个拓扑控制, 当且仅当

(1) 如果一个源节点在 G 中是与目的节点连通的, 那么它在 $\Psi[G]$ 中与目的节点也是连通的;

(2) 对于 $\Psi[G]$ 中的任意一个节点, 接收速率与发送速率的总和不超过它的带宽;

(3) 对于任意一个 $SOURCE$ 类型的节点, 发送速率不超过接收速率和采集速率的总和;

(4) 对于任意一个 $RELAYING$ 类型的节点, 发送速率不超过接收速率;

(5) 对于任意的边 $e, e \in E_G \wedge e \notin E_{\Psi[G]}$, 该边上的数据传输速率 $\psi^t(e)$ 为零。

定义 2(无损拓扑控制) 设 Ψ 为 G 上的一个拓扑控制, 给定一个网络输入 i , 称 Ψ 为无损拓扑控制当且仅当在 $\Psi[G]$ 中, 所有目的节点收集数据的总速率达到最大。

定义 3(简化的静态拓扑控制问题) 给定网络 G 和它的一个输入 i , 寻找一个无损拓扑控制 $\Psi_{\min}$, 使得 $\Psi_{\min}[G]$ 的功耗最小。称这个问题为简化的静态拓扑控制问题, 简称 RSTC(Reduced Static Topology Control)问题。

实际的网络是经常发生变化的, 因此静态拓扑控制问题

不足以描述实际的拓扑控制问题。一个动态网络可以表示为 $G(t) = (V(t), E(t))$, $V(t)$ 中的节点是一个四元组 $(L(t), C(t), B(t), T(t))$, $E(t)$ 中的边是一个有序对 $(u(t), v(t))$, 其中 t 是时间参数, 其它符号与上文的含义相同, 只不过在动态网络中这些量都是时变的。可以采用同样的办法定义动态网络的拓扑控制 $\Psi(t)$ 。

定义 4(简化的动态拓扑控制问题) 给定一个时变网络 $G(t)$ 和它的一个输入 $i(t)$, 寻找一个无损拓扑控制 $\Psi_{\min}(t)$, 使得在任意的时刻 t , $\Psi_{\min}(t)[G(t)]$ 的功耗最小。称这个问题为简化的动态拓扑控制问题, 简称 RDTC(Reduced Dynamic Topology Control)问题。

3.2 复杂性分析

可以证明 RSTC 问题和 RDTC 问题都是 NP-难的。

定理 1 RSTC 问题是 NP-难问题。

证明: 用 P_0 表示 RSTC 问题。

考虑 P_0 的一个特例 P_1 , 给定的网络 G 和输入 i 满足下面的条件:

(1) 对于网络中任意的节点 $u, P_u^r = P_u^t = P_u^i$ 并且 $P_u^s = 0$;

(2) $\sum_{u \in V_s} i(u) < \min\{B_v \mid v \in V\}$ 。

设 P_2 是这样一个问题: P_2 的输入是一个图 $H, V_H = V_G, E_H = E_G$, H 中所有边的权值都为零, 对于任意的节点 u , 其权值为 P_u^i , 问题 P_2 就是要寻找一棵最小的带权树, 使得 V_s 和 V_d 中的节点都属于这棵树。

对于问题 P_1 , 因为 $P_u^r = P_u^t = P_u^i$, 不管节点是发送还是接收, 其功耗与空闲侦听是一样的, 并且带宽是足够的, 因此可以认为网络的能耗就是空闲侦听的能耗。所以容易知道 P_1 与 P_2 是等价的。

也就是说, 如果能在多项式时间内解决 P_0 , 必然能在多项式时间内解决 P_2 , 因此存在 P_2 到 P_0 的多项式时间规约, 而 P_2 是著名的节点带权的最小 Steiner 树问题, 是已知的 NP-难问题。所以 P_0 是 NP-难的。即 RSTC 问题是 NP-难的。

定理 2 RDTC 问题是 NP-难问题。

因为 RSTC 问题是 RDTC 问题的特例, 所以根据定理 1, 定理 2 是显然的。

3.3 实际的拓扑控制问题

实际的拓扑控制问题可以描述为: 在保证一定的网络连通质量和覆盖质量的前提下, 一般以延长网络的生命期为主要目标, 兼顾通信干扰、网络延迟、负载均衡、简单性、可靠性、可扩展性等其他性能, 形成一个优化的网络拓扑结构。对于不同的应用场景, 拓扑控制研究的侧重点也各不相同。而且, 即使是在特定的应用场景中, 由于方方面面的错综复杂的联系, 也很难判定最优的网络拓扑。例如, 最大限度地延长网络的生存时间是拓扑控制的首要目标, 然而我们却很难形式化地定义网络的生存时间。虽然研究人员已经提出了多种多样的关于网络生存时间的定义, 但是直到目前为止还没有一个公认的定义, 因为它们都不能正确反映实际的网络生存时间。所以, 要对实际的拓扑控制问题给出一个通用的定义是困难的, 甚至是不可能的。上面定义和分析的 RSTC 和 RDTC 问题都是拓扑控制问题在理想情况下的简化。虽然如此, 但因为各种拓扑控制问题都必须保证网络的连通性和能量高效, 所以可以认为 RSTC 问题是各种拓扑控制问题的一个公共的

子问题。因此,从追求拓扑控制的最优解意义上讲,实际的拓扑控制问题不会比 RSTC 问题简单。本文关于 RSTC 问题的 NP-难的结论说明追求拓扑控制的最优解是不现实的,而应该从实际出发,寻找拓扑控制问题的实用解。

4 能量高效的拓扑控制协议的设计原则

在上文工作的基础之上,本文在这里进一步讨论关于拓扑控制协议设计的原则性问题。对于一般的拓扑控制问题(没有诸如均匀分布、人工部署等过强的假设),本文提出能量高效的拓扑控制协议的 3 个必要性设计原则:功率控制与睡眠调度相统一的原则、负载感知原则和与路由机制相结合的原则。

4.1 功率控制与睡眠调度相统一的原则

本文在这里采用与 Xing 等人同样的观察^[16]来解释功率控制与睡眠调度相统一的必要性。现考虑一个只有 3 个节点的网络,如图 1(a)所示,其中 u 是源节点, u 以速率 R 产生数据, w 是接力节点, v 是目的节点,这里假设目的节点的能量也是有限的, u, w 和 v 的带宽均为 B ,任意两个节点都可以直接通信。当必要的信息给出之后,就可以根据本文定义的能耗模型计算网络的功耗。为了叙述简洁起见,没有举出具体的数值。现在考虑在这个网络上分别使用功率控制和睡眠调度技术。 u 到 v 有两条路可走:(1) u 产生的数据通过 w 接力到达 v ;(2) u 直接将数据发送到 v 。功率控制着眼于降低网络的通信能耗,因为接力通信往往比直接通信节能,所以功率控制所生成的网络拓扑往往是 $u \rightarrow w \rightarrow v$,如图 1(b)所示。因为 $u \rightarrow w \rightarrow v$ 比 $u \rightarrow v$ 节省更多的通信能耗,所以从降低网络通信能耗的意义上讲,这个拓扑是能量高效的。睡眠调度着眼于降低网络的空闲能耗,既然 w 的睡眠不会破坏网络的连通性, w 就应该进入更节能的睡眠状态,所以睡眠调度所生成的网络拓扑往往是 $u \rightarrow v$,如图 1(c)所示。因为 $u \rightarrow v$ 比 $u \rightarrow w \rightarrow v$ 节省更多的空闲能耗,所以从降低网络空闲能耗的意义上讲,这个拓扑是能量高效的。于是就得到一个相互矛盾的结果,到底哪个拓扑是能量高效的呢?因此,要创建能量高效的网络拓扑,必须综合考虑网络的通信能耗和空闲能耗。也就是说,要把功率控制与睡眠调度统一起来。

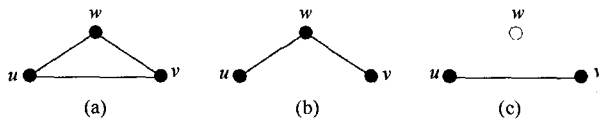


图 1 功率控制与睡眠调度的矛盾

4.2 负载感知原则

从本文提出的能耗模型和对最小能耗拓扑控制问题的定义中可以看出,使网络的功耗达到最小的无损拓扑控制 $\Psi_{\min}$ 与网络负载密切相关。对于图 1 所示的网络实例,究竟是 $u \rightarrow w \rightarrow v$ 能量高效还是 $u \rightarrow v$ 能量高效取决于网络负载 λ ,其中 $\lambda = R/B$ 。事实上,可以根据本文定义的能耗模型将图 1(b)所示的网络拓扑的功耗 $P(b)$ 和图 1(c)所示的网络拓扑的功耗 $P(c)$ 计算出来。

$$P(b) = K_b \lambda + Q_b, P(c) = K_c \lambda + Q_c$$

式中, $K_b = kd^a(u, w) + kd^a(w, v) + P_u^i + P_w^i + P_v^i - P_u^i - 2P_w^i - P_v^i$, $Q_b = P_u^i + P_w^i + P_v^i$, $K_c = kd^a(u, v) + P_u^i + P_v^i - P_u^i - P_v^i$, $Q_c = P_u^i + P_v^i$ 。

设 $\lambda_0 = (Q_b - Q_c) / (K_c - K_b)$, 如图 2 所示, 当 $\lambda = \lambda_0$ 时, $P(b) = P(c)$; 当 $\lambda > \lambda_0$ 时, $P(b) < P(c)$; 当 $\lambda < \lambda_0$ 时, $P(b) > P(c)$ 。所以, 在网络负载 λ 未知的情况下, 无法判定图 1 中的 (b) 和 (c) 究竟哪一种拓扑更节能。因此, 真正能做到能量高效的拓扑控制协议必须能够感知节点的负载(这一点容易做到), 并用来调整网络的拓扑结构。

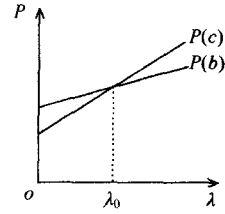


图 2 功耗随负载变化

提出负载感知原则的另一个理由是拓扑控制协议可以通过负载感知获得来自上层的反馈。无线传感器网络各层协议的设计都必须考虑节能问题, 例如在应用层, 数据融合就是一种十分有效的节能技术。事实上, 要最大限度地做到能量高效必须综合考虑网络的各层协议, 但是由于层次结构的限制很难做到这一点。虽然跨层(Cross-layer)设计的思想已经被研究人员所接受, 但是还不至于将拓扑控制与数据融合混为一谈, 因为那样必然会导致拙劣的软件结构, 是得不偿失的做法。这也是本文在定义最小能耗拓扑控制问题时不考虑数据融合的原因。事实上, 网络中的数据流往往受上层协议的控制, 拓扑控制协议完全可以通过对数据流的感知(即本文所谓的负载感知)获得来自上层的反馈。这样既不会破坏协议栈的层次结构, 又能做到对上层协议的自适, 从而做到真正意义上的能量高效。

4.3 与路由机制相结合的原则

从拓扑控制的研究现状看来, 拓扑控制在协议栈(称为“协议栈”是习惯的说法, 事实上, 无线传感器网络的协议栈已不再是严格意义的栈结构)中的位置尚未达成共识。拓扑控制可以放在 MAC 层, 可以放在网络层, 也可以放在 MAC 层之上、网络层之下。本文认为拓扑控制要真正做到能量高效, 必须放在网络层, 并且与路由机制相结合。从本文提出的能耗模型和最小能耗拓扑控制问题的定义中可以看出, 拓扑控制与路由密不可分。事实上, 本文定义的最小能耗无损拓扑控制不仅仅是功率控制和睡眠调度, 同时也包含了路由的选择。拓扑控制应该与路由机制相结合的理由可以概括为以下几点:(1)拓扑控制一般要保证网络的连通性, 而下层协议不能(或不能高效地)做到这一点;(2)拓扑控制需要必要的拓扑知识, 而路由协议能够感知网络的拓扑, 例如路由表就存储了网络的拓扑信息, 将拓扑控制放在低层必须花费额外的代价来探测网络的拓扑;(3)路由影响拓扑控制的有效性, 将拓扑控制放在低层会使路由协议失去根据数据流优化网络拓扑的机会。

拓扑控制应该属于网络层这一设计原则已被 Kawadia 等人指出^[5]。COMPOW^[4], CLUSTERPOW^[5] 和 MINPOW^[5] 就是功率控制与路由机制相结合的范例, 这几个拓扑控制协议也是到目前为止为数不多的真正实现了的拓扑控制协议。

结束语 针对当前无线传感器网络拓扑控制研究中存在的问题, 本文对拓扑控制进行了基础性研究。在理想情况下, 给出了以最小化能耗为目标的拓扑控制问题的严格定义, 包

括 RSTC (Reduced Static Topology Control) 问题和 RDTC (Reduced Dynamic Topology Control) 问题, 并且证明了 RSTC 问题和 RDTC 问题都是 NP-难的, 同时非形式化地讨论了更实际的拓扑控制问题的计算复杂性; 在此基础上, 本文进一步讨论了关于拓扑控制协议设计的原则性问题, 提出了设计能量高效的拓扑控制协议的 3 个必要性原则, 即功率控制与睡眠调度相统一的原则、负载感知原则和与路由机制相结合的原则。根据这 3 个原则设计能量高效的拓扑控制协议是我们正在进行的工作。希望本文的研究成果有助于探索更好的拓扑控制协议。

参 考 文 献

- [1] Poduri S, Patten S, Krishnamachari B, et al. A unifying framework for tunable topology control in sensor networks [R]. CRES-05-004. Center for Robotics and Embedded Systems, University of Southern California, 2005; 1-15
 - [2] Kirousis L M, Kranakis E, Krizanc D, et al. Power consumption in packet radio networks [J]. Theoretical Computer Science, 2000, 243(1/2): 289-305
 - [3] Clementi A, Penna P, Silvestri R. On the power assignment problem in radio networks [J]. ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications (MONET), 2004, 9(2): 125-140
 - [4] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas R S, et al. Power control in ad-hoc networks: theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol [C] // Proceedings of European Wireless Conference. Florence, 2002; 156-162
 - [5] Kawadia V. Protocols and architecture for wireless ad hoc networks [D]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2004
 - [6] Kubisch M, Karl H, Wolisz A, et al. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks [C] // Yanikomeroglu H, ed. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). New York: IEEE Press, 2003; 16-20
 - [7] Li L, Halpern J Y, Bahl P, et al. A cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(1): 147-159
 - [8] Li N, Hou J C. Topology control in heterogeneous wireless networks: problems and solutions [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). New York: IEEE Press, 2004; 232-243
 - [9] Santi P. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks [J]. ACM Computing Surveys, 2005, 37(2): 164-194
 - [10] Chen B, Jamieson K, Balakrishnan H, et al. SPAN: An energy efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks [J]. ACM Wireless Networks, 2002, 8(5): 481-494
 - [11] Kumar S, Lai T H, Balogh J. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network [C] // Haas ZJ, ed. Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). New York: ACM Press, 2004; 144-158
 - [12] Xing G L, Wang X R, Zhang Y F, et al. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2005, 1(1): 36-72
 - [13] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing [C] // Rose C, ed. Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). New York: ACM Press, 2001; 70-84
 - [14] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management [R]. DCS-TR-441. Department of Computer Science, Rutgers University, 2001
 - [15] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 660-669
 - [16] Xing G L, Lu C Y, Zhang Y, et al. Minimum power configuration in wireless sensor networks [C] // Kumar PR, Campbell AT, Wattenhofer R, eds. Proceedings of the ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). New York: ACM Press, 2005; 390-401
-
- (上接第 97 页)
- [4] EME Halevi S. Extending EME to Handle Arbitrary-Length Messages With Associated Data [C] // Canteaut A, Viswanathan K, eds. Proc of the 5th International Conference on Cryptology in India (INDOCRYPT 2004). LNCS 3348. Berlin: Springer-Verlag, 2004; 315-327
 - [5] McGrew D A, Fluhrer S R. The Extended Codebook (XCB) Mode of Operation [EB/OL]. <http://eprint.iacr.org/>, 2004/278
 - [6] Wang P, Feng D, Wu W. HCTR: A Variable-Input-Length Enciphering Mode [C] // SKLOIS Conference on Information Security and Cryptology (CISC 2005). LNCS 3822. Berlin: Springer-Verlag, 2005; 175-188
 - [7] Chakraborty D, Sarkar P. HCH: A New Tweakable Enciphering Scheme Using the Hash-Encrypt-Hash Approach [C] // Barua R, Lange T, eds. Progress in Cryptology (INDOCRYPT). LNCS 4329. Berlin: Springer-Verlag, 2006; 287-302
 - [8] Chakraborty D, Sarkar P. A New Mode of Encryption Providing a Tweakable Strong Pseudo-Random Permutation [C] // Robshaw B J M, eds. Fast Software Encryption (FSE'2006). LNCS 4047. Berlin: Springer-Verlag, 2006; 293-309
 - [9] Halevi S. Invertible Universal Hashing and the TET Encryption Mode [C] // Menezes A, eds. Advances in Cryptology (CRYPTO 2007). LNCS 4622. Berlin: Springer-Verlag, 2007; 412-429
 - [10] Sarkar P. Improving upon the TET Mode of Operation [C] // Nam K H, Rhee G, eds. Information Security and Cryptology (ICISC 2007). LNCS 4817. Berlin: Springer-Verlag, 2007; 180-192
 - [11] Lopez M C, Chakraborty D, Henriquez R F. Efficient Implementations of Some Tweakable Enciphering Schemes in Reconfigurable Hardware [C] // Srinathan K, Rangan P C, Yung M, eds. Progress in Cryptology (INDOCRYPT 2007). LNCS 4859. Berlin: Springer-Verlag, 2007; 414-424
 - [12] 伏晓, 等. 网络安全技术管理研究 [J]. 计算机科学, 2009, 36(2): 15-18, 54