

基于超图的无线传感器网络分簇算法研究

田文锋, 刘 陈

(南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 系统地分析了著名经典算法 LEACH 算法中簇头的产生和簇的形成过程。提出了一种基于超图模型的分簇算法, 把超图理论引入大规模无线传感器网络中, 使网络控制信息大为减少, 从而延长网络的生命周期。

关键词: 无线传感器; 分簇算法; 能量; 超图模型

中图分类号: TN911

文献标识码: A

Study of hypergraph clustering routing algorithm in wireless sensor networks

TIAN Wen Feng, LIU Chen

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Communication, Nanjing 210003, China)

Abstract: This paper analyses a classic clustering algorithms systematically, with special attention paid to the production of the cluster head and the formation of the cluster. Then the paper presents the hypergraph clustering routing algorithm in wireless sensor networks (HCRA). Using the hypergraph theory to deal with the large-scale wireless sensor networks can effectively decrease the control messages in routing process, so then prolong the life of the networks.

Key words: WSN; clustering routing algorithm; energy; hyper-graph model

无线传感器网络 WSN (Wireless Sensor Network) 是一种新兴的科学技术网络, 是由大量具有特定功能的传感器节点通过自组织的无线通信方式, 相互传递信息, 协同完成特定功能的智能专用网络。随着传感器的微型化, 在设计中大部分节点的能量靠电池提供, 其能量有限, 所以传感器节点的能量限制是整个网络设计的瓶颈, 它直接决定了网络的工作寿命。因此无线传感器网络协议的设计都必须以能源有效性为首要的设计要素。

1 分层路由的分簇算法

对于大规模的无线传感器网络来说, 平面路由方案会因链路处理开销的增加而不适用。解决方法之一便是采用分层路由。在分层路由协议中, 一个经典算法为 LEACH 算法, 该算法很具有典型性, 其后出现的大部分层次型拓扑组织算法都在其基础上发展而来。

1.1 LEACH 算法

LEACH 算法是麻省理工学院的 Chandrakasan 等人为无线传感器网络设计的第一个层次型拓扑组织算法^[1]。LEACH 算法的执行过程是周期性的, 每轮循环分为 2 个阶段, 分别

为簇建立阶段和稳定数据传输阶段。

在簇的建立阶段, 网络内各个传感器节点用随机自治的方法选举簇首。簇首选举没有任何中心节点控制, 或对选举进行协调, 所以 LEACH 算法的簇首选举是独立的、自治的。在进行选举时, 节点产生一个 0~1 之间的随机数, 如果这个数小于 $T(n)$, 则发布自己是簇首的公告消息。在每轮循环中, 如果节点已经担当过簇首, 则把 $T(n)$ 设置为 0, 这样该节点就不会再次当选为簇首。对于未当选过簇首的节点, 则将以 $T(n)$ 的概率当选, 随着当选过簇首的节点数目的增加, 剩余节点当选为簇首的 $T(n)$ 随之增大, 节点产生小于 $T(n)$ 的随机数的概率也随之增大, 所以节点当选为簇首的概率也增大。当只剩下 1 个节点未当选时, $T(n)=1$, 表示这个节点一定当选。 $T(n)$ 值计算如下:

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

其中, k 是簇首在所有节点中所占的百分比, r 是选

《微型机与应用》2010 年第 2 期

网络与通信

Network and Communication

举轮数, $r \bmod (1/k)$ 代表这一轮循环中当选过簇首的节点个数, G 为该轮循环中未当选为簇首的节点集合。

节点当选为簇首以后, 利用非持续性的载波信号多路访问(CSMA)MAC 协议广播一个通告消息。每个非簇首节点根据通信代价的大小来决定自己归属于哪一个簇, 代价大小根据从每个簇首节点接收到的通告消息的信号强弱来判断, 信号越强, 说明节点间的通信代价越小。在信号强度相当的情况下, 非簇首节点可以随机决定自己选择哪个簇。每个非簇首节点决定其归属于哪个簇之后, 通知所选的簇首节点。然后簇首节点建立一个 TDMA 调度, 并把该调度发送给簇内的节点。在簇内所有节点都收到了具体的调度之后, 簇的建立阶段就结束了。

在稳定阶段内, 节点持续采集监测数据, 在属于自己的时隙内发送数据给簇首, 不发送时节点可以关闭无线电模块以节省能量。簇首把接收到的数据进行融合后发送给汇点, 这样大量减少了通信量。

1.2 LEACH 算法存在的问题^[3]

LEACH 算法随机选取节点作为簇首, 并且簇首是轮换选举的, 这样能量的高消耗就平均分配到网络的所有节点上, 以此来延长网络生命周期。该算法目前主要存在的问题由于算法假定每个节点都能与基站直接通信, 并且每个节点支持不同 MAC 协议的计算能力, 因此该协议不适合在大规模的无线传感器网络中应用, 此外还存在簇头分布不均的缺点。

2 基于超图的分簇算法

现有通信网络多是基于图论理论实现有效路由。但对于节点数目众多、高连通度复杂结构的无线传感器网络, 构建生成树则需要大量的控制消息, 并且由于传感器节点的失效以及无线链路的低可靠性, 已构建的生成树需要实时维护, 以保证树图的连通。大量的构建和维护生成树信息都将过多地占用网络带宽和节点能量, 这与使用生成树结构以提高网络性能相违背。而采用超图理论将大规模、高连通度的传感器网络拓扑结构抽象为超图模型, 可以有效解决这一问题。

定义: 设 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是一个有限集合, $\varepsilon = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 是 V 的一个子集集合, 即 $e_i \subseteq V$, 称 $H = (V, \varepsilon)$ 是在 V 上的一个超图。如果 $\forall i \in \{1, 2, \dots, m\}$, 和 $\bigcup_{i=1}^m e_i = V$, 就可以称 ε 是在 V 上的一个超图^[4]。 V 的元素成为超图的顶点, ε 的元素成为超边。用超图 $H(X, \varepsilon)$ 来抽象表示一个层次型的传感器网络, 如图 1 所示^[5]。其中节点集 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 对应于每个传感器节点, $\varepsilon = \{E_1, E_2, \dots, E_n, e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 为超边的集合, 图中有 2 个顶点的超边 e 称为连接超边, 超边 E 为传感器网络的簇, 称为主干超边。这样传感器网络中层次型的路由问题就转化为在超图中寻找满足一定约束条件的超树问题。

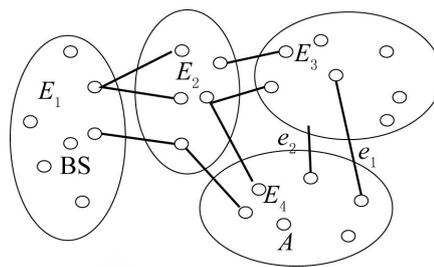


图 1 无线传感器网络的超图模型

根据已有的网格划分算法网络簇结构可以分为两类^[6]: (1)相邻网格有公共网关节点, 即 $E_i \cap E_j \neq \Phi, i \neq j$; (2)相邻网格无重叠, 通过网关节点进行通信, 即 $E_i \cap E_j = \Phi, i \neq j$ 。当且仅当其对应的二分图 $G < H >$ 是树, 超图 H 为超树。由此可知, 一个连通超图 H 依方式(1)划分网格的生成超树 T 并不总是存在。但基于方式(2)网络的连通超图 H 必存在生成超树 T 。

把全域划分为 λ 个小正方形区域 (λ 可以通过计算全网最小耗能给出优化值), 用标定法在各小正方形的中心标定 1 个坐标点, 如图 2 所示。然后根据传感器节点距离各坐标点的远近, 把这些传感器节点归入相应的簇域。为了各簇域间的通信不相互干扰, 可采用 CDMA 技术。根据节点分布等地理位置信息事先划分好簇域, 并分配好时隙来减少像 LEACH 算法中每轮都要分簇的能量损耗, 此后全网不再有建簇的损耗及向其他节点广播分配时隙的消息的额外开销了。

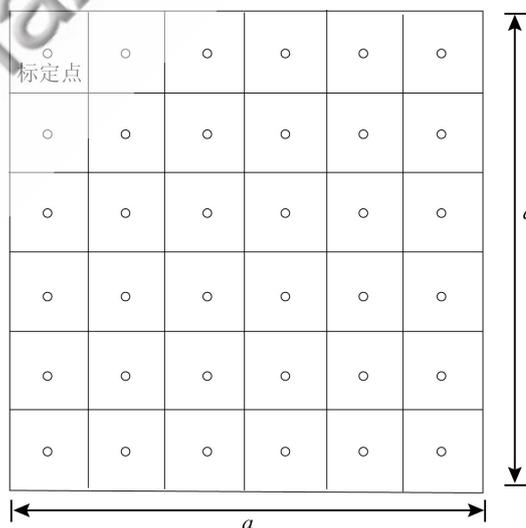


图 2 划分簇域图示

划好簇域后, 在每一簇中任选一节点记为 A , 将其权值与所有邻居比较, 如果自己的权值最大, A 将成为簇头节点, 并广播, 否则将权值较大的节点标记为 A 。这样循环就选出在邻居中权值最大的节点做簇头。将 BS 看作一个簇头节点。分簇完成后, 将每一个簇看作一个超边 E , 在超边 E 内部每一个成员节点将自己的簇头视

网络与通信

Network and Communication

为路由,在成员节点采集到信息后,直接交给簇头节点,由簇头节点做进一步的数据融合并转发。非簇首向簇首发送数据采用组播技术,同一个超边内的节点加入同一个多播组,它们具有相同的组地址,不同超边内的节点属于不同的多播组。非簇首节点以所加入的组地址为目的地址发送数据,这样,它们发送的数据只能被同超边内的簇首接收,这是因为分属不同超边的节点具有不同的组地址。非簇首节点在向本超边内的簇首发送数据时,把各超边化为不同的多播组,这样不仅使各超边间非簇首成员不相互干扰,而且易于实现。现代网络中的组播技术已发展得相当成熟。

当簇头节点的能量低于一定的阈值后,簇头节点给BS发送请求,BS收到请求后判断当前网络的运行状态,根据当前的情况以安全方式发起在各超边内新一轮簇头轮换,从而平衡全网的能量消耗,延长网络的寿命。

3 算法分析与仿真

大规模无线传感器网络对应超图 $H=(X, \varepsilon)$, 为描述算法复杂度,定义: n 为网络中传感器节点个数 $|X|=n$; b 为超图模型中主干超边个数; L 为网络中无线链路跳数。

由于任意两个主干超边均无公共节点,则主干超边平均度为 $|E^1|=n/b$ 。由于在一个主干超边内簇头节点和簇成员节点拓扑结构为星形,则在一个主干超边内执行超边内报时传送消息的无线链路条数为 $L'=(|E^1|-1)=(n/b-1)$ 。每个连接超边内包含无线链路条数均为 L 条。超边内报由 L_i 发起广播,则时间复杂度和消息复杂度均为 $O(L)$ 。

仿真环境为在 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的监测区域,设置汇集节点位于监测区域中心正上方,即 Sink(100, 300)。设定每个节点初始能量 $Eg(V_i)=20\text{ J}$, 通信半径 $R=43.5\text{ m}$ 。本文对基于超图的分簇算法进行仿真,并与 LEACH 算法进行比较。从以下两个方面评价算法性能:(1)网络生命周期;(2)每轮能量消耗。

网络生命周期一般被定义为从网络开始工作时刻起到第一个网络节点死亡那一刻的时间跨度,如果节点剩余能量降到初始平均能量的 10%, 则视为节点死亡。从图 3 中看出 HCRA 算法较 LEACH 算法来说,大大地延长了网络的生命周期。在相同的条件下,与 LEACH 比较,目前也有很多现成算法把网络的生命周期延长了 1~2 倍,但它们存在着分簇不均匀、不能在全域均匀采集信息,以及不能适合网络动态变化等问题。

比较 HCRA 算法和 LEACH 算法的平均每轮能量消耗,如图 4 所示,随着 N 的增大,HCRA 比 LEACH 节省的能量也增多,一方面是因为节点数目增多了,另一方面也是因为 LEACH 中簇首数目增多,有更多的簇首参与远距离的数据发送的缘故。

为实现在资源有限的无线传感器网络中能量有效

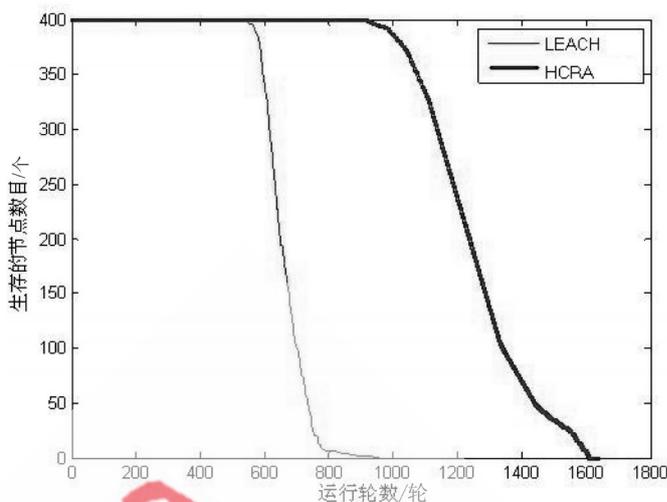


图 3 $\alpha=200, N=400$ 时, HCRA 与 LEACH 的网络生命周期

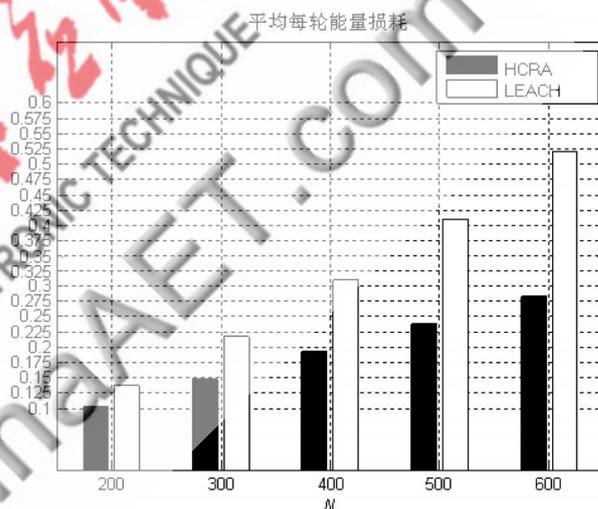


图 4 $\alpha=200, N$ 取 200~600 时

HCRA 和 LEACH 平均每轮能量消耗

的路由协议,本文将超图理论引入无线传感器网络中,将大规模、高连通度的传感器网络拓扑抽象为超图模型,从而有效减少网络控制消息。本文提出了无线传感器网络基于超图模型的分簇算法,通过仿真,可以看出该算法优于传统经典算法 LEACH 算法,能够有效地减少能量消耗,延长网络生存周期。

参考文献

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocols for wireless sensor networks [C]. IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference System Sciences, 2000: 3005-3014.
- [3] 于海斌, 曾鹏. 智能无线传感器网络系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

(下转第 45 页)