# 改进 PEGASIS 的分层链树路由协议<sup>®</sup>

The Hierarchical Chain-Tree Routing Protocol of Improved PEGASIS

王 波 蒋 卫 孙 燚 (重庆大学 计算机学院 重庆 400044)

摘 要: 无线传感器网络节点能量严重受限,减少能量消耗是路由算法首先要考虑的因素。在 PEGASIS 协议的 基础上,提出了分层链树的路由算法。根据传感器节点与 SINK 的距离,把整个网络划分为以 SINK 为 圆心的环状层次区域,然后构造从外层节点经由内层节点到 SINK 的链状路由树,数据沿着链树并通 过数据融合后传递到 SINK。模拟实验表明,算法在生存时间、能耗均衡等方面的性能较 PEGASIS 有 明显的提高。

关键词: 无线传感器网络 路由协议 分层链树 PEGASIS 协议

1 引言

由于无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)中的节点体积微小,通常携带能量十 分有限的电池,而且更换补充能量较为困难,因此 WSN 首要的设计目标是高效使用传感器节点的能量, 在完成应用要求任务的前提下,尽可能地延长整个网 络系统的生存期。传感器节点中消耗能量的模块有传 感器模块、处理器模块和无线通信模块等,其中无线 通信消耗了大部分的能量<sup>[1]</sup>。研究表明,传感器节点 使用无线方式传输 1bit 到 100m 远所消耗的能量可 供处理器模块执行 3000 条指令<sup>[2]</sup>。由此可见,路由 协议是影响传感器网络能耗的一个非常重要的因素。 此外传感器节点采集的原始数据的数据量非常大,相 邻节点的信息具有很大的冗余性,所以应当尽可能在 本地进行计算和数据融合,获得有效信息,以减少信 息的发送量。

# 2 研究现状

从节点参与通信的方式,可以将无线传感器网络路由协议分为平面路由协议和分簇(Clustering)路由协议。平面型路由协议的代表有 DD(Directed Diffusion)、SPIN(Sensor Protocols for Informa-tion via Negotiation)等协议。由于无线传感器网络

中节点数量庞大,平面路由协议会造成网络开销较 大,不利于网络扩展。分簇路由协议的代表有 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)、 PEGASIS(Power-Efficient Gathering in Sensor Information)协议,这种路由协议的特点是将传感节 点分成不同的簇,簇内成员节点将收集的数据信息都 交给簇首(Cluster head),簇首通过数据融合减少传 输信息量,最后把处理后的数据传送给汇聚节点 (Sink,也有文献称为基站 BS)。相比平面路由协议, 分簇路由协议更能有效地控制拓扑,网络可扩展性更 优,能量消耗更节省。

PEGASIS<sup>[3]</sup>协议是在LEACH协议基础上发展而来 的基于链(Chain)的路由协议。其主要思想是采用贪婪 算法(Greedy Algorithm)把所有节点构造成一条链, 每一个节点都通过其邻居节点进行数据的收发和融 合,并且在该链中只有一个节点作为链首节点与汇聚 点进行通信。虽然 PEGASIS 减小了 LEACH 在簇重构 过程中所产生的开销,并且通过数据融合降低了收发 过程的次数,从而降低了能量的消耗,但还存在以下 几个方面的问题<sup>[4]</sup>:

① 数据从链的远端传输到链首节点会引起过多的延迟,这对于很多对时延敏感的应用场合来说是不能接受的;

98 研究开发 Research and Development

① 收稿时间:2009-03-26

② 每个节点需要维护位置信息(相当于传统网络中的拓扑信息)而带来额外的开销;

③ 当网络中有孤立节点(在设定区域外且到网络 任中任何节点的距离都比到 Sink 的距离远的节点)存 在时,该节点每次数据传输都会消耗很大的能量,而 成为整条链的瓶颈节点;

④ 选择链首节点时,没有考虑节点的剩余能量和 地理位置,特别是当链首节点位于距离 Sink 较远的时候,数据从距离 Sink 较近的区域又沿着链传到较远的 链首,就会带来无谓的能量消耗。

由于 PEGASIS 协议存在这些问题,从它被提出以 来国内外学者开展了相关研究进行改进。文献[5]提出 了一种新的基于链状网络结构的数据路由算法 EB-PEGASIS。该算法通过已成链的平均距离获得距离 门限,利用距离门限避免长链形成,可以保证形成数据 链上节点发送数据消耗能量基本一致,避免部分节点 因为消耗能量较多而过早死亡。虽然该算法实现网络 寿命的延长,但仍然没有解决 PEGASIS 时延大的问题。 在文献[6]中,作者提出了一种叫做 COSEN 的路由算 法,通过设置参数 CL 限定每条链上节点的个数,在 整个观测区域构造多条短链,并在每条链上固定选取 一节点作为簇头,所有簇头再构成一条链与 SINK 通 信,解决了 PEGASIS 协议中存在时延过大的问题,但 在平衡节点能量消耗,簇头节点的选择等方面需要进 一步的研究。

# 3 分层链树路由协议

基于 PEGASIS 协议存在的上述缺陷,本文提出了 一种分层链树的路由协议(Hierarchical Chain-Tree Routing Protocol, HCTRP)。在分层链树协议中,根 据与 Sink 通信距离的远近,建立信号强度等高线,把 观测区划分为以 Sink 为圆心的环状层次区域,同时对 传感器节点进行标识分级,与 Sink 的通信距离在同一 级别的节点具有相同的 ID 号。算法的过程是首先在距 离 Sink 最近的区域中建立主链,然后从外围节点到内 层节点逐渐建立链树,最后由主链节点轮流担任根节 点与 Sink 通信,数据从外环向内环经过层层数据融 合,最后传到 Sink。

# 3.1 传感器网络模型

考虑一个由 N 个随机部署的传感器节点形成的网络,其应用场景为周期性的数据收集。用 si 表示 i 个

节点,相应的节点集合为 **S**= { **s**<sub>1</sub>, **s**<sub>2</sub>…, **s**<sub>n</sub> },并基于 以下假设:

① 所有节点完全相同,均匀分布在一个正方形区 域内且静止不动,每个节点都可以和 Sink 直接通信;

② 信道是对称的,且无线电信号在各个方向上能量消耗相同;

③ Sink 节点是固定的,在网络区域外并相距较远;

④ 节点间的通信采用广播信道,若已知对方发射 功率,节点可以根据接收信号的强度 RSSI 计算出发送 者到自己的近似距离;

⑤ 无线发射功率可控,即节点可以根据距离来调整发射功率的大小。

#### 3.2 协议描述

3.2.1 节点层次区域划分

在系统初始化初阶,首先由 Sink 向观测区域的 所有节点发送分层(Layer)消息,各节点根据接收到 的 Layer 消息的信号强度,计算出和 Sink 的通信距 离,再与预先设定的分层距离区间值进行比较,确定 自己的层次 ID 号,并向 Sink 发送应答信号。在同一 层次的节点具有相同的 ID 号,ID 号越高表示距离 Sink 越远,这样就建立了以 Sink 为圆心的环形层次 区域,如图 1 所示。具体的分级层数和每一层区域的 节点数可由 Sink 根据实际情况(如节点数量,区域大 小,距离远近以及节点的密度等)修改分层距离等参 数进行设置。



## 图 1 层次区域划分和构造主链

#### 3.2.2 节点链树构造

从区域1中距离 Sink 最远的节点开始,采用贪婪 算法构造整个网络的主链,各节点依次(已经在链上的 节点不再参与后续的成链过程)找到与其最近的节点,

Research and Development 研究开发 99

该节点就作为链上的下一节点,依此最终遍历整个 ID 号为 1 的节点形成主链,如图 1 所示,这个过程与 PEGASIS 的成链过程一样。同时为了消除孤立节点的 影响,当某一节点与区域中的任一节点的通信距离都 大于与 Sink 的距离时,则认为该节点为孤立节点,孤 立节点不参与到链中,而直接与 Sink 进行通信。接着 再从最外层区域(ID 号最高的一层)中节点开始,从本 层或者内层中找到与其最近的节点,作为自己的父节 点加入到链上(已经成为父节点的节点不再接受其他 节点的请求),然后再由新加入到链上的节点继续从本 层或者下级中找到最近的节点重复此过程,最终形成 多条并行的有向链连接到主链上,这样整个网络就构 成了一棵如图 2 所示的有序链树。



图 2 链树构造和数据传输

## 3.2.3 根节点(链首节点)选择

分层链树协议每一轮从主链上选择一个节点作为 根节点与 Sink 通信。由于观测区域距离 Sink 较远, 每轮担任根节的节点将会消耗比普通节点多得多的能 量,此外,主链上的部分节点除了接收相邻节点的数 据外,还要接收与其连接的子链的数据,这样主链上 的节点将会比子链上的节点消耗的能量多。对此,采 取了以下两个解决方法:

① 在划分区域时,距离 Sink 最近的区域 1 将比 其他区域大,所包含的节点更多,这样,平均到每个 节点上的能量消耗就越少;

② 除在首轮随机选择主链上任意一个节点作为 根节点以外,其后由本轮的根节点确定自己的继承人 (下一轮的根节点)。具体过程是当主链上的节点向根节 点传输数据时,都将自己的剩余能量信息附上报告给 根节点,由当前根节点指定剩余能量最多的节点担任 下一轮的根节点,这样,与 Sink 直接通信的高负载就 会平均到主链上的所有节点上。 3.2.4 数据传输

数据传输过程中,首先从每条子链的末梢节点 开始并行向内传输,节点调节到最小发射功率,将 自己的数据传向父节点,其父节点收到数据后与自 己的采集的数据进行融合处理后再发住其父节点, 这样数据从外层节点沿着子链逐次往内层节点前向 传输,直到子链上的数据全部传送到主链节点上, 而后,主链再根据 PEGASIS 采用的数据传输方法, 先由根节点产生 Token,并将 Token 发往主链的任 意一端,由该末端节点开始向其邻居节点传输数据, 同时令牌也交给邻居节点,这样数据经逐次融合后 就传输到根节点上。然后根节点再将 Token 发往主 链另外一端,重复同样的过程。最后根节点将两端 传来的数据经过融合后,传输到 Sink,整个过程如 图 2 所示。

# 3.3 能耗分析

根据如前所述的无线传感网络特点,对 **PEGASIS** 协议和分层链树协议能量模型作如下假设:

 
 ① 网络能量耗费主要在数据发送、数据接收和数 据融合三个方面;

② 成链阶段的能量耗费相对整个数据传送阶段 是很小的,忽略不计。

而在实际中,因接收机不收数据时可关闭接收机, 所以接收机接收不是发给自己的数据的能量耗费可不 计。

在本文中采用目前比较常用的传感器节点工作能 耗模型<sup>[7]</sup>,将一个 k-bit 的信息传送距离 d,无线通 信模块的发送能耗和接收能耗分别为:

$$E_{Tx}(k,d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k,d) = E_{elec}k + \mathcal{E}_{amp}kd^r$$
(1)

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) = E_{elec}k$$
(2)

融合 k-bit 的数据信息所耗费的能量为: Eagg(k,d)= Eagg。

式中:  $E_{elec}$  表示传感器无线发射电路(TE)或无线 接收电路(RE)发送或接收每 bit 的能耗,  $E_{Tx-elec}(k)$ 、  $E_{Tx-amp}(k, d)$ 、 $E_{Rx-elec}(k)$ 分别表示发射电路、发射电 路放大器和接收电路的能耗,  $\varepsilon$  amp 表示发射放大器 将每 bit 传送单位平方米所耗的能量, r 为传播衰减指 数, 2 < r < 5, 取值由周围环境决定,在这里 r 取理想 值 2。

在 PEGASIS 中, n 个节点的无线传感器网络沿着 链传输 k-bit 的数据到链首节点所消耗的能量为:

100 研究开发 Research and Development

$$E = n_{E \, dec} k + \mathcal{E}_{amp} k \sum_{m=1}^{n} [d^{2}_{(m-1,m)}]$$
(3)

式中的  $d_{(i,j)}$ 表示链上两个节点  $n_i$  到  $n_j$  的通信距离。

从末梢节点到链首节点数据融合消耗的能量为:

$$E = n E_{agg} k \tag{4}$$

式中 E<sub>agg</sub>表示节点融合每 bit 数据的能耗。而在 改进的分层链树协议中,设有 m 条子链,则末梢节点 比 PEGASIS 多 m 个,这 m 个末梢节点可以少消耗接 收数据和数据融合的能量为 mE<sub>elec</sub> k+ mE<sub>agg</sub>k,但是 主链上会有 m 个节点除了接收主链上的数据外,还需 要额外消耗接收和融合子链节点的能量也为 mE<sub>elec</sub> k+ mE<sub>agg</sub>k,因此,分层链树协议在所有节点数据传 输到根节点阶段消耗的能量就与 PEGASIS 是相等的。

接下来看两种协议从链首节点到会聚节点 Sink 消耗的能量比较。在分层链树协议中,链首节点在离 Sink 最近的区域 1 中产生,其与 Sink 的距离不大于 第一层区域的半径 R1,而在 PEGASIS 中,担任链首 节是在整个监测区域中产生,当区域 1 以外的节点被 选择为链首节点时,其与 SINK 的距离: Ri> R1,则 消耗的能量:  $\varepsilon_{ampk} R_i^2 > \varepsilon_{ampk} R_1^2$ 。这样在经过若 干轮后,PEGASIS 协议中链首节点与 Sink 通信所消耗 的能量就会大于分层链协议所消耗的能量。

由于在分层链树算法中数据在子链上是并行传输 的,这样可以有效减小数据传输延迟。此外,在 PEGASIS中,当有节点失效时,则会重构链。在分层 链树协议中,当主链和子链上有节点失效后,整个网 络不会重构链树,而是屏蔽掉失效节点,由该失效节 点的两相邻节点直接进行通信。只有当离 Sink 最近的 区域 1 中的节点全部失效后,才由第二层节点重新构 造主链,继续与 Sink 通信。

# 4 模拟实验及分析

模拟实验采用由 UC Berkley 大学研发的事件驱动的和面向对象的网络仿真工具 NS2,版本号为 NS2.29,场景相关参数设置如表 1。

整个区域划分的层次为5层,第1层节点数为40 个,其余每层15个,所有节点一旦放置就不能再移 动,节点死亡只发生在能量为零时。

模拟运行期间,采用网络生存周期为算法节能的

评价指标。图 3 为两种协议生存时间的比较,分层链 树协议在第一个节点死亡和全部节点死亡的轮次上相 比 PEGASIS 协议都有所延长,且节点的能量消耗更为 均匀,其能耗图形呈阶梯状,这反映了分层链树协议 的层次特性。从图中可以看出,分层链树协议的网络 生存时间比 PEGASIS 协议可提高 15%以上。

表1 仿真参数设置

参数	教值
区域大小	(0,0) (100,100)
节点个数	100
Sink	(50,200)
Eelec	50nJ
8 cmp	10рЈ
East	5nJ
初始能量	0.25J
数据长度	2000bit



图 4 为节点总的能量消耗对比,分层链树协议中 节点能量消耗总和小于 PEGASIS 协议,并且随着时间 的增加,两者的差距逐渐增大。



Research and Development 研究开发 101

# 5 结语

本文在对 PEGASIS 协议进行深入分析的基础上, 指出了其存在的局限性,并针对地提出了一种解决方 法:分层链树算法。该算法通过以到汇聚点 Sink 的通 信距离为标准来划分观测区域,这样使得充当链首的 节点全是分布在离 Sink 最近的区域里,同时采取多条 子链并行前向传输的方法,节省了网络的能耗,平衡 了节点负载,减小了网络时延。实验结果表明,分层 链树算法在生存时间、能耗均衡等方面的性能相较 PEGASIS 协议有明显改进。

#### 参考文献

- 孙利民,李建中,陈渝,朱红松.无线传感器网络.北京: 清华大学出版社, 2005.
- Estrin D. Wireless Sensor Networks Tutorial Part IV:Sensor Network Protocols.Mobicom,Sep.23 – 28, 2002.Westin Peachtree Plaza, Atlanta, Georgia, USA.
- 3 Lindsey S, Raghavendra C, Sivalingam KM. Data Gathering algorithms in sensor networks using energy metrics. IEEE Transactions on Parallel and

Distributed Systems, September 2002, 13(9):350 - 354.

- 4 Ibriq J, Mahgoub I. Cluster-Based routing in wireless sensor networks: Issue and challenge. 2004 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems. Jul. 2004.
- 5 Liu YY, Ji H, Yue GX. An energy efficient PEGASISbased enhanced algorithm in wireless sensor networks. China Communications August, 2006.91 – 97.
- 6 Tabassum N, Ehsanul Q, Mamun K, Urano Y. COSEN: A chain oriented sensor network for efficient data collection.New Generations,ITNG 2006,Third International Conference on 10-12 April 2006, IEEE, 262 – 267.
- 7 Wang A, Heinzelman WB, Sinha A, et al. Energyscalable protocols for battery-operated microsensor networks.Journal of VLSI Signal Processing, 2001, 29(3):223 – 237.

ⓒ 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn