

## 基于路径损耗的无线传感器网络分布式拓扑控制算法\*

郝晓辰<sup>+</sup>, 窦晶晶, 刘彬

(燕山大学 电气工程学院 自动化仪表系, 河北 秦皇岛 066004)

### Path-Loss Based Distributed Topology Control Algorithm for Wireless Sensor Networks

HAO Xiao-Chen<sup>+</sup>, DOU Jing-Jing, LIU Bin

(Department of Automatic Instrument, Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

+ Corresponding author: E-mail: haoxiaochen@sohu.com

**Hao XC, Dou JJ, Liu B. Path-Loss based distributed topology control algorithm for wireless sensor networks.**

*Journal of Software*, 2009,20(12):3213-3222. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3414.htm>

**Abstract:** After an analysis and comparison of three most commonly used link-measuring standards in wireless sensor networks at present, it is concluded that there exists the lowest threshold of received signal strength (RSS) to satisfy a certain packet reception rate (PRR). Before taking RSS as the condition to construct topology, all nodes need to use the uniform transmitting power. Thus, the path-loss is determined as the condition of topology construction, and a path-loss based distributed topology control algorithm (PLBD) is designed. This algorithm does not only guarantee PRR, but also maintain the least loss links for correspondence between nodes. The simulation results have indicates that the topology constructed by PLBD algorithm keeps the network connective, and it has more advantages like low correspondence time-delay, good robustness and relatively balanced energy consumption.

**Key words:** wireless sensor network; link-measuring standard; topology control; received signal strength (RSS); path-loss

**摘要:** 对无线传感器网络中目前最常用的3种链路度量标准进行分析和比较得出,在满足一定收包率要求时,节点的接收信号强度存在一个最小阈值.考虑接收信号强度作为拓扑构建条件时需节点具备相同发射功率的不足,提出将路径损耗大小作为拓扑构建的条件,设计了一种分布式拓扑控制算法——PLBD.该算法在保证收包率的同时,还使各节点之间的通信保留最小损耗链路.仿真结果表明,PLBD 算法构建的拓扑不仅能够保证网络连通性,还具有通信时延低,健壮性好,能量消耗相对均衡的特点.

**关键词:** 无线传感器网络;链路度量标准;拓扑控制;接收信号强度;路径损耗

中图分类号: TP393 文献标识码: A

无线传感器网络(WSN)是由大量传感器节点以自组织方式构成的无线通信网络,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息并发布给观察者<sup>[1]</sup>.随着电子技术的发展,体积小、价格低的无线传感器网络应用前景越来越广阔.

WSN中任意两个传感器节点间的信息传送都基于网络拓扑,拓扑即网络中各节点对之间的链路结构.拓扑

\* Received 2008-03-08; Accepted 2008-07-02

控制的任务就是要为每个节点选择适当且合理的邻居节点进行通信,从而保证在全局网络连通的条件下降低节点的传输功率,有效延长网络生命周期.另外,链路数量的减少也能使上层路由协议的实现更加高效,并且极大地降低了MAC层的冲突和竞争<sup>[2,3]</sup>.如果没有良好的拓扑控制,网络中所有节点都会以最大传输功率进行工作,不仅快速地耗费节点的有限能量,还会减弱网络空间重用能力,增大端到端的延迟,降低网络的健壮性和容错性等.

由于能量受限是约束网络生命周期最主要的因素,绝大多数的研究者对如何尽可能地减小节点发射功率进行了研究并提出了一系列的拓扑控制算法和机制,以达到节省能量的目的.Rodoplu等人<sup>[4]</sup>基于转播区域和闭包概念提出分布式的拓扑控制方案R&M,通过衡量转播代价,以低功率实现了网络连通.Narayanaswamy等人<sup>[5]</sup>结合功率控制与路由协议对所有节点采用了相同发射功率,在保证网络连通的前提下将功率总和最小化.Kubisch等人<sup>[6]</sup>提出了基于节点度进行功率控制的LMA和LMN算法,设定节点度的上限和下限,令每个节点动态地调整自己的发射功率,以使节点度数落在上限和下限之间.Li和Hou<sup>[7]</sup>提出的本地最小生成树算法构建的网络拓扑可以保证网络连通,且有效避免了MAC层的冲突和竞争.

诚然,当前的这些算法构建的网络拓扑都能够较好地满足连通、节点度受限、链路对称等良好性能,但它们均建立在已知各节点精确位置信息的假设前提下,且认为所有节点分布在同一Euclidean平面内.对于WSN来说,其往往包含大量体积较小的传感器节点,为各节点均配备精确的定位装置还存在困难且不够经济,而目前的节点定位算法通常避免不了估计误差.对基于位置的拓扑控制算法而言,很小的位置误差也可能影响最终网络的连通性和节点度受限等特性;当定位的精确程度较高时,算法复杂度会增大,开销也随之增加<sup>[8]</sup>.考虑到节点位置信息的不可靠性,微软亚洲研究院的Wattenhofer和Zollinger<sup>[9]</sup>将“链路质量”这一名词引入无线通信网络的拓扑控制技术中,提出了简单且实用的拓扑控制算法XTC,不需节点位置信息且对三维空间的网络也能适用.但XTC并没有给出链路质量的确切阐述,仅以距离为代表进行了定性判断,指出相距较近节点间的链路质量优于相距较远节点间的链路.由于距离并不能确切地评价链路质量,Dyer等人<sup>[12]</sup>以阴影衰落模型对接收信号强度进行了估计.实验结果表明,在标准偏差较大的情况下,链路质量与距离间的相关性很小.

考虑实用性为前提,链路质量度量标准的选择尤为重要.本文对目前最常用的3种度量标准进行了比较,通过研究接收信号强度与收包率之间的关系,验证了满足包在一定概率条件下被正确接收存在最小接收信号强度阈值的结论,确定了由接收信号强度得到的路径损耗作为链路质量度量标准,并在此基础上提出了一种基于路径损耗的分布式拓扑控制算法PLBD(path-loss based distributed topology control algorithm),保证一定收包率的前提下,使各节点均建立起到达所有邻居节点的最小路径损耗链路.考虑XTC算法同样面向实用,分别从平均节点度、本地通信路径平均跳数、本地路径平均能耗和节点发射功率方差4项性能指标上对两者进行仿真比较,验证PLBD算法的效用.

## 1 链路度量标准的比较与确定

### 1.1 常用标准及其比较

要判断链路质量的优劣,首先需确定一个合理的度量标准,目前最常用的链路质量度量标准大致有3种:

(1) 收包率PRR(packet reception rate)<sup>[11]</sup>:定义为一段时间内接收器成功收到的数据包个数占发送器已发送包个数的比例.

(2) 链路质量指示LQI(link quality indicator):在IEEE 802.15.4中<sup>[12]</sup>定义为“接收器的能量探测(energy detection,简称ED)、信噪比的估计值,或是两者的综合”.无线射频芯片CC 2420<sup>[13]</sup>通过对接收到的每个包前8位的误码率采样得到[50,100]间的相关值,再线性变换为[0,255]间的数值,从而能够直接实现LQI的测量.

(3) 接收信号强度指示RSSI(received signal strength indicator):反映通信链路上的信噪比,也就是平均接收信号功率的估计.常用无线射频芯片CC 1000,CC 2420及RF 230等均能直接测得RSSI,但表现形式各有不同.

从一般意义上讲,收包率是3种标准中最明确反映链路质量的指标,但一般不能直接通过节点硬件实时测得.Stanford大学的Sprinivasan和Levis<sup>[14]</sup>比较了CC 2420芯片的PRR分别随RSSI和LQI的变化情况,得出RSSI对

PRR的影响更为稳定,且在环境条件基本不变的情况下,一对节点通信所得到的RSSI具有良好的对称性的结论.基于以上分析,我们对PRR与RSSI之间的关系进行了理论上的推导,过程如下:

假设 $P_i$ 为Bernoulli随机变量,数据包成功接收时 $P_i=1$ ,反之接收失败 $P_i=0$ ,则对于 $r$ 次数据传输来说,收包率PRR为 $(1/r)\sum_{i=1}^r P_i$ .如果 $P_i$ 是独立且一致分布的随机变量,按照弱大数定律PRR,可由成功接收一个数据包的概率 $E[P_i]$ 进行估计<sup>[15]</sup>.采用反向不归零机制编码,1Baud=1bit的情况下,成功接收一个数据包的概率 $p$ 为

$$p = (1 - P_e)^{st} (1 - P_e)^{8(f-t)} = (1 - P_e)^{8f} \quad (1)$$

其中, $f$ 是数据帧(包括前导码、网络有效载荷和循环冗余码校验)的大小, $t$ 为前导码的大小,两者均以字节为单位. $P_e$ 表示比特误差率,由调制机制决定.对于频移键控机制, $P_e=(1/2)\exp(-\alpha/2)$ ,其中, $\alpha=E_b/N_0$ , $E_b$ 代表接收信号每比特的能量, $N_0$ 是单边噪声功率谱密度.由于无线元件的信噪比 $\gamma$ 为接收信号强度值 $r_{ss}$ 和固有噪声电平 $P_n$ 之差,且 $\gamma=(E_b/N_0)(R/B_N)$ , $R$ 是数据传输速率(bit/s), $B_N$ 为噪声带宽,因此可以确定

$$p = (1 - (1/2)\exp(-(r_{ss} - P_n) \cdot B_N / 2R))^{8f} \quad (2)$$

显然,收包率与接收信号强度值之间是一一对应的.随着 $r_{ss}$ 值的增大,收包率 $p$ 呈指数上升趋势,且当某一接收信号强度阈值 $r_{ss_{th}}$ 即满足条件 $r_{ss} \geq r_{ss_{th}}$ 时,收包率能够达到所期望的要求 $p \geq p_{expect}$ ,其中, $r_{ss_{th}}$ 可以表示为

$$r_{ss_{th}} = P_n - (2R/B_N) \ln 2(1 - p_{expect}^{1/8f}) \quad (3)$$

## 1.2 链路度量标准的确定

按照前文分析,RSSI能够较好地反映收包率的变化.Dyer等人提出“增强的RSSI表示链路质量也增强”的观点,直接以 $r_{ss}$ 作为链路度量标准对拓扑控制算法XTC进行了改进,但是没有考虑到随发送端节点的信号发射功率变化, $r_{ss}$ 同样发生变化.

以 $P_{loss}$ 表示信号在传输路径上的损耗,一般情况下,发射功率 $P_t$ 与 $r_{ss}$ 之间的关系可以描述为

$$r_{ss} = k \cdot P_t - P_{loss} \quad (4)$$

不同射频芯片对于接收信号强度 $r_{ss}$ 的表现形式也不相同,故式(4)中存在系数 $k$ ,可表示为

$$k = (r_{ss_{max}} - r_{ss_{min}}) / (P_{t_{max}} - P_{t_{min}})$$

采用Crossbow公司的IRIS节点为平台,我们进行了节点间的无线通信实验:固定两节点间的距离不变,调整节点发射功率依次为-17.0dBm,-12.0dBm,-9.0dBm,-7.0dBm,-4.0dBm,-3.0dBm,-2.0dBm,0.0dBm,2.3dBm和3.2dBm,对应每次发射功率,分别统计多次接收信号强度值,得到两者关系曲线如图1所示.由图易知,接收信号强度随发射功率呈近似线形增长的变化趋势.对于异构和层次型的传感器网络,节点可能承担不同任务,各节点的发射信号功率不仅不相同,还可能相差悬殊;即使对于节点硬件组成完全一致的同构非层次型网络,也会因传感器内部的微小差异而导致发射功率不同.因此,对于功率可调的拓扑控制而言,直接以 $r_{ss}$ 用于衡量链路质量没有意义.

为了验证路径损耗的恒稳性,采用曲线拟合的方法,利用所测接收信号强度的相关数据反求得 $P_{loss}$ 随节点发射功率的变化曲线,如图2所示.

对比图1和图2易得,采用路径损耗 $P_{loss}$ 作为度量链路质量的标准比接收信号强度 $r_{ss}$ 更具优势,主要体现在以下几个方面:

- (1) 路径损耗不要求节点必须具有相同的发射功率,比接收信号强度适合应用的网络范围更广;
- (2) 在监测区域固定且不考虑节点运动的前提下,路径损耗保持在一个相对确定的范围内,波动范围不大;
- (3) 一对节点进行通信,由于环境不变,双向的路径损耗会具有较好的对称性;
- (4) 根据路径损耗和实测得的接收信号强度,能够反求出满足一定收包率时的最小发射功率,从而为功率可调的拓扑控制提供基础.

综上所述,我们确定路径损耗 $P_{loss}$ 作为链路质量的度量标准,其同样可以反映收包率的情况以保证通信的可靠性,既克服了接收信号强度所存在的需要相同发射功率基准的问题,还使双向链路的建立更加有效.在此基础上,提出了一种基于路径损耗的分布式拓扑控制算法PLBD,下一节中将具体进行描述.

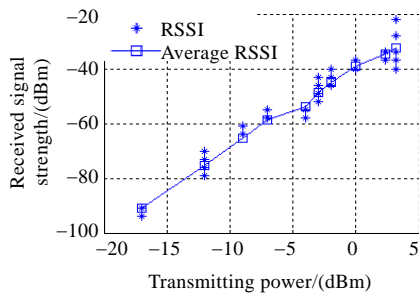


Fig.1 Relationship between received signal strength and transmitting power

图 1 接收信号强度与发射功率的关系

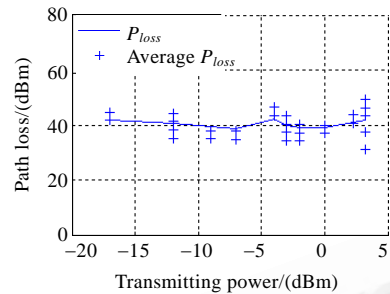


Fig.2 Relationship between path loss and transmitting power

图 2 路径损耗与发射功率的关系

## 2 PLBD 拓扑控制算法

### 2.1 预备工作

分布式 PLBD 拓扑控制算法从实用角度出发进行考虑,不需要网络中所有节点具有一致的最大发射功率,也不要求节点覆盖范围是规则圆域,对分布在二维平面和三维空间的网络均能适用.算法的实现需要几个前提条件:(1) 网络的各个传感器节点都具有一定的数据存储和计算能力,且已知自身的发射功率;(2) 节点每接收到一条信息都可以直接测得信号强度值  $rss$ ;(3) 在节点不发生移动且环境没有发生改变的情况下,节点之间的通信能够满足双向性.为了方便后续的网络模型和算法描述,这里提前给出一些定义.

**定义 1(邻居和邻居集合).** WSN中,如果节点 $u$ 以最大功率 $P_{\max}(u)$ 发送信息能够被节点 $v$ 正确接收,则称 $v$ 为 $u$ 的一个邻居;节点 $u$ 的所有邻居组成其邻居集合 $N(u)$ ,即 $N(u)=\{v|P_u(v)\leq P_{\max}(u)\}$ .

**定义 2(公共邻居).** 若节点 $w$ 同时满足条件 $w\in N(u)$ 和 $w\in N(v)$ ,则称 $w$ 为节点 $u$ 和 $v$ 的公共邻居.

**定义 3(连通).** 对于任意两个节点 $u$ 和 $v$ ,如果存在通信路径 $P=(v_0=u, v_1, \dots, v_{n-1}, v_n=v)$ ,则称 $u$ 和 $v$ 是连通的.若网络 $G(V, E)$ 中的所有节点都能保证两两之间连通,那么 $G$ 也是连通的.

一般情况下,WSN模型可以抽象为图 $G(V, E)$ .其中, $V$ 为网络的节点集合,链路集合 $E=\{(u, v)|v\in N(u)\}$ .如果未进行拓扑控制,节点将以自身的最大功率发送信息,即任意节点 $u$ 与其邻居集合 $N(u)$ 中的所有节点直接通信. PLBD 算法的设计思想就是选择合适的节点担任转发任务,以保证各条通信路径的损耗最小.节点的发射功率仅需要维持能够到达最远的单跳邻居节点即可,节省了不必要消耗的能量,能量利用效率大大提高.

### 2.2 PLBD算法组成

基于路径损耗的拓扑控制算法 PLBD 主要由 3 个阶段构成,分别为邻居发现、信息调整和拓扑建立.

#### 阶段 1. 邻居发现阶段

网络中各个节点依次以自身的最大发射功率 $P_{\max}$ 发射一条包含 $P_{\max}$ 值和节点自身 $id$ 的Hello消息,每个节点都根据接收到的Hello消息建立一个自己的邻居信息列表 $Inl$ ,格式见表 1.其中: $nid$ 为邻居节点序号; $d_{loss}$ 表示邻居间直接通信的路径损耗,由接收到的Hello消息中的 $P_{\max}$ 与实时测得的接收信号强度 $rss$ 相减得到; $m_{loss}$ 临时值设为与 $d_{loss}$ 相等,在算法后续阶段会发生调整,最终记录两节点间通信的最小路径损耗总量; $c\_style$ 代表通信方式,有 $S$ (单跳)和 $M$ (多跳)两种,初始标记均为 $S$ ,意味着邻居之间采用直接方式通信,同样会在后续阶段发生调整.节点 $u$ 接收到任意邻居节点 $v_i$ 的Hello消息后会检查自己的信息列表,添加尚未包含的邻居信息进行更新,程序如图 3 所示.列表中,邻居节点按照接收到Hello消息的时间先后依次添加即可,无须任何形式的排序处理,大大降低了算法复杂性.

#### 阶段 2. 信息调整阶段

**Table 1** Information list of node  $u$ 's neighbors**表 1** 节点  $u$  的邻居信息列表

| $nid_u$ | $D_{loss_u}$ | $m_{loss_u}$ | $c\_style_u$ |
|---------|--------------|--------------|--------------|
|---------|--------------|--------------|--------------|

各节点依次以最大发射功率二次广播一条 Adjust 消息,包含已建立的邻居信息列表  $Inl$ ,这样保证了节点之间通过接收彼此间的 Adjust 消息能够获得所有邻居节点的邻居信息.节点  $u$  接收到其邻居  $v$  的信息列表  $Inl(v)$ ,首先判断  $Inl(u)$  和  $Inl(v)$  中是否存在公共邻居节点  $w$ ,若存在,则  $u$  分别比较  $m_{loss_u}(v)$  与  $m_{loss_u}(w) + m_{loss_v}(w)$  以及  $m_{loss_u}(w)$  与  $m_{loss_u}(v_i) + m_{loss_{v_i}}(w)$  的大小,判断与邻居进行通信的本地最小路径损耗,并且相应修改  $Inl(u)$  中  $m_{loss}$  和  $c\_style$  两列信息.这样,节点  $u$  最终的邻居信息列表中就记录了其与所有邻居节点的最佳通信状态与最小通信路径损耗,程序如图 4 所示.

```

build_information_list():
1: for (each node  $u$ ) do
2:   while (receive Hello from  $v_i$ ) do
3:     if  $v_i$  is not in  $nid_u()$  do
4:       insert a new line into  $Inl(u)$ 
5:        $nid_u = v_i$ 
6:        $m_{loss_u}(v_i) = P_{\max}(u) - rss_u(v_i)$ 
7:        $m_{loss_u}(v_i) = d_{loss_u}(v_i)$ 
8:        $c\_style_u(v_i) = S$ 
9:     end if
10:  end while
11: end for

```

**Fig.3** Procedure about the building of neighbors' information list

图 3 邻居信息列表建立程序

### 阶段 3. 拓扑建立阶段

按照已经调整好的邻居信息列表,各节点与  $c\_style$  栏标记为  $S$  的所有邻居节点建立通信链路.任意节点  $u$  确定自身发射功率至少要保证发送的信息能被  $c\_style=S$  且拥有最大  $m_{loss_u}()$  值的节点正确接收到,即

$$P_u = (m_{loss_u}(v) + rss_{th}) / k \quad (5)$$

其中,  $m_{loss_u}(v) = \max_{c\_style(v_i)=S} \{m_{loss_u}(v_i)\}$ ,  $v_i \in Inl(u)$ ;  $rss_{th}$  可按照式(3)求得.节点依次基于邻居信息列表的构建本

地拓扑,最终全局网络拓扑也就构建了起来.执行过程如图 5 所示.

为了更加明确地阐述 PLBD 算法,下面以图 6(a) 为例具体说明拓扑构建的过程.各链路旁边的数字表示该链路的损耗.在邻居发现阶段,节点  $u$  能够收到来自邻居  $v_1, v_2, v_3$  和  $v_4$  的 Hello 消息,按照信息的抵达时间先后,依次将其信息添加到自身的信息列表  $Inl(u)$  中.通信方式  $c\_style_u$  一栏初始全部默认为单跳方式  $S$ .同理,其余节点也分别建立自己的信息列表.在信息调整阶段,各节点间通过交换 Adjust 信息进行对自身信息列表的调整,以保证建立的通信路径损耗最小.当节点  $u$  收到  $v_4$  的 Adjust 信息时,按照算法进行判断,由于  $m_{loss_u}(v_2) + m_{loss_{v_4}}(v_2) < m_{loss_u}(v_4)$  (即  $3+4 < 10$ ),可知通过节点  $v_2$  转发信息比  $u$  和  $v_4$  之间直接通信的损耗更小,故  $c\_style_u(v_4)$  由  $S$  转变为  $M$ ,节点  $u$  和  $v_4$  之间不会存在单跳链路,如图 6(b)

```

Adjust_information_list():
1: for (each node  $u$ ) do
2:   while (receive Adjust from  $v_i$ ) do
3:     if (there exists  $w \in nid_u$  and  $w \in nid_{v_i}$ ) do
4:       if ( $m_{loss_u}(w) + m_{loss_{v_i}}(w) < m_{loss_u}(v_i)$ )
5:         update  $Inl(u)$  as follows:
6:          $m_{loss_u}(v_i) = m_{loss_u}(w) + m_{loss_{v_i}}(w)$ 
6:          $c\_style_u(v_i) = M$ 
7:       elseif ( $m_{loss_u}(v_i) + m_{loss_{v_i}}(w) < m_{loss_u}(w)$ )
8:         update  $Inl(u)$  as follows:
9:          $m_{loss_u}(w) = m_{loss_u}(v_i) + m_{loss_{v_i}}(w)$ 
10:         $c\_style_u(w) = M$ 
11:       end elseif
12:     end if
13:   end if
14: end while
15: end for

```

**Fig.4** Procedure about the adjusting of neighbors' information list

图 4 邻居信息列表调整程序

```

Transmitting_power_decide():

```

```

1: for (each node  $u$ ) do
2:   if  $c\_style_u(v_i) = S$ 
3:     build link  $u \rightarrow v_i$ 
4:   end if
5:   find node  $v$  satisfying
6:    $m_{loss_u}(v) = \max_{c\_style(v_i)=S} \{m_{loss_u}(v_i)\}$ 
7:    $P_u = (m_{loss_u}(v) + rss_{th}) / k$ 
8: end for

```

**Fig.5** Determination of nodes' transmitting power

图 5 节点发射功率确定

所示.当 $u$ 收到来自 $v_2$ 的Adjust消息时,用同样的方法进行判断.由于没有节点符合担任 $u$ 和 $v_2$ 之间转发任务的条件,信息列表 $Inl(u)$ 不会发生调整.节点 $v_2$ 判断过程中会对 $v_5$ 的信息进行调整,意味着 $v_2$ 到 $v_5$ 的直接通信链路将被经 $v_4$ 转发的多跳链路所取代,如图6(c)所示.相同的过程执行下去,最终全局网络拓扑就建立起来.

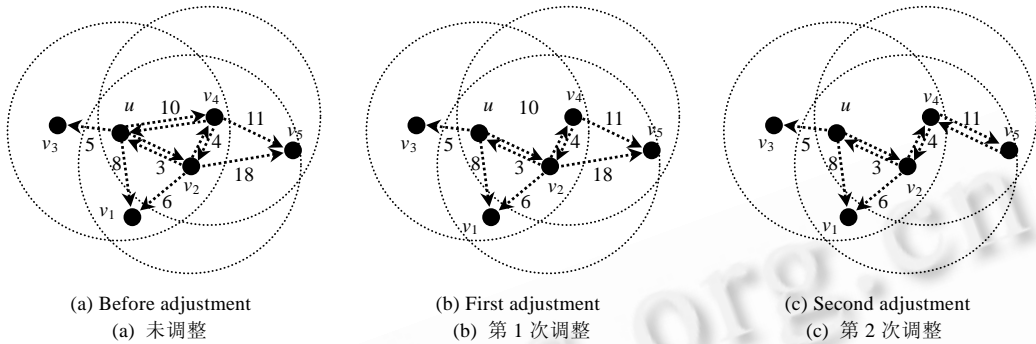


Fig.6 Topology establishment by PLBD algorithm

图6 PLBD 算法拓扑构建

### 3 性能分析与评价

#### 3.1 理论证明

假设所有节点均以自身最大功率进行通信时所构建起的全局拓扑为  $G(V,E)$ ,执行分布式拓扑控制算法 PLBD 后构建起的拓扑表示为  $G'(V,E')$ .

**定理 1.** 如果  $G(V,E)$  是连通的,那么  $G'(V,E')$  也同样保证连通.

证明:考虑任意两节点  $u,v \in V$ ,由于  $G(V,E)$  连通,按照定义 3,  $G(V,E)$  中必然至少存在一条路径  $P=(v_0=u,v_1,\dots,v_{n-1},v_n=v)$ ,其中  $v_i$  和  $v_{i+1}(i=0,1,2,\dots,n-1)$  互为邻居节点.要证明  $G'(V,E')$  中  $u$  和  $v$  也保证连通,只需证明任意互为邻居的节点对  $v_i$  和  $v_{i+1}$  之间存在通信路径.按照 PLBD 算法所述,  $G'(V,E')$  中各个节点均建立起了自己的邻居信息列表,即若两节点  $v_i$  和  $v_{i+1}$  互为邻居,则一定存在于彼此的信息列表中.因为假设前提是节点之间的通信能够满足双向性,所以仅证明  $v_i$  到  $v_{i+1}$  存在通信路径即可.考虑  $v_{i+1} \in Inl(v_i)$ ,分两种情形讨论:

(1)  $c\_style_{v_i}(v_{i+1}) = S$ , 这表示  $v_i$  到  $v_{i+1}$  存在直接的单跳通信路径;

(2)  $c\_style_{v_i}(v_{i+1}) = M$ , 意味着  $v_i$  和  $v_{i+1}$  之间存在一个公共邻居节点  $w_i$ , 满足  $v_i$  经  $w_i$  进行转发到  $v_{i+1}$  比直接传输信息到  $v_{i+1}$  的路径损耗更小.那么继续分情况讨论  $v_i$  和  $w_i$  之间以及  $w_i$  和  $v_{i+1}$  存在通信路径即可.

重复上述步骤,最终可以得到节点  $v_i$  和  $v_{i+1}$  连通的结论.于是,  $u$  和  $v$  保证连通.由节点  $u$  和  $v$  的任意性可知,  $G'(V,E')$  中的每对节点之间都至少存在一条通信路径,因此  $G'(V,E')$  连通.定理得证.  $\square$

**定理 2.** PLBD 拓扑  $G'(V,E')$  中,任意两节点之间都存在损耗最小的通信路径.

证明:设 PLBD 拓扑  $G'(V,E')$  中任意两节点  $u$  和  $v$  之间存在路径  $P=(v_0=u,v_1,\dots,v_{n-1},v_n=v)$ ,其中,  $v_i$  和  $v_{i+1}(i=0,1,2,\dots,n-1)$  两两互为邻居.要证明  $P$  为最小损耗路径,只需证明路径  $P$  中任意直接通信的节点对  $v_i$  和  $v_{i+1}$  间路径损耗最小.采用反证法,假设存在  $v_i$  和  $v_{i+1}$  的公共邻居节点  $w$  满足  $m_{loss_{v_i}}(w) + m_{loss_{v_{i+1}}}(w) < m_{loss_{v_i}}(v_{i+1})$ ,则按照算法 PLBD 的阶段 2,应调整  $c\_style_{v_i}(v_{i+1}) = M$ , 路径  $v_i \rightarrow v_{i+1}$  不会存在于拓扑中,这与  $v_i$  和  $v_{i+1}$  直接通信相矛盾.所以,  $P$  中任意直接通信的节点对  $v_i$  和  $v_{i+1}$  之间路径损耗最小,故  $P$  是  $u$  和  $v$  之间通信损耗最小的路径.定理得证.  $\square$

#### 3.2 性能评价

通过理论分析已经证明了 PLBD 算法构建的拓扑能够保证连通和路径损耗最小的良好特性,这一节将在 Matlab 平台上进行仿真实验,以验证 PLBD 算法的有效性.考虑 XTC 算法与 PLBD 一样,都是从实用角度出发设计的拓扑控制算法,不需要知道节点的地理位置信息,且还满足分布式构建、网络拓扑连通、通信链路对称等

特性,因此将采用 XTC 为比较对象,对 PLBD 算法各项性能进行评价.

首先假设 100 个传感器节点随机分布在  $1000\text{m}\times 1000\text{m}$  的区域内,各节点的最大传输距离为 250m,分别执行 XTC 算法和 PLBD 算法得到的网络拓扑结构分别如图 7(a)和图 7(b)所示.WSN 拓扑控制算法所涉及到的性能指标有很多,如吞吐量、干扰和竞争、网络生命期等,但这些指标还与网络所采用的路由协议和 MAC 协议等有关,不能单纯地从拓扑控制的角度进行衡量.因此,主要选择平均节点度、本地通信路径平均跳数、本地路径平均能耗和节点发射功率方差这 4 项性能指标对 PLBD 算法和 XTC 算法构建的网络拓扑进行性能比较与评价.

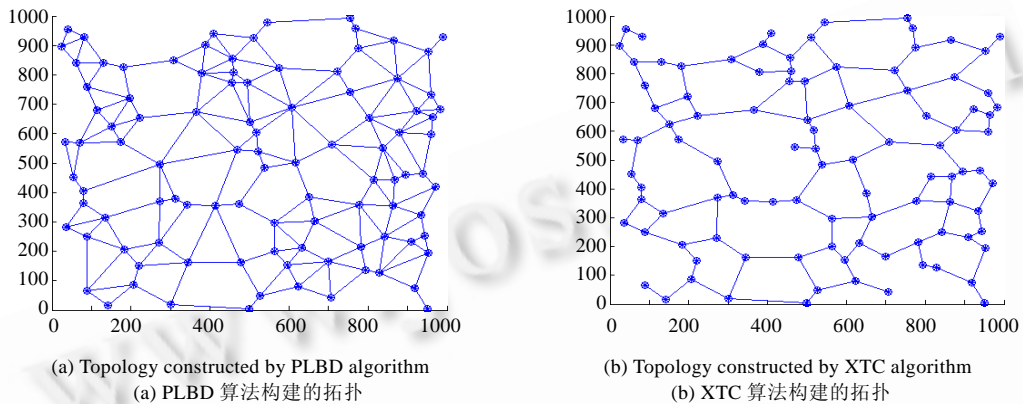


Fig.7 Comparison of topologies' structures

图 7 拓扑结构对比

### 3.2.1 平均节点度对比

无线传感器网络中,节点度即为与节点直接通信的邻居个数.过高的节点度意味着传播信号之间的干扰和冲突严重,包可能需要多次反复重发而消耗大量不必要的能量;当节点度过低时,端到端之间的通信需要更长的传输路径,导致全网的能耗增加.Kleinrock 等人<sup>[16]</sup>理论分析得出,节点度为 6 时静态的无线网络性能最好.对应节点数目相同的传感器网络,分别执行 PLBD 和 XTC 算法进行 200 次仿真实验,统计并计算网络的平均节点度.改变网络中的传感器节点数量,分别取 50,100,150,200,250,300,350 和 400,最终得到平均节点度随网络中节点数目的变化曲线,如图 8 所示.

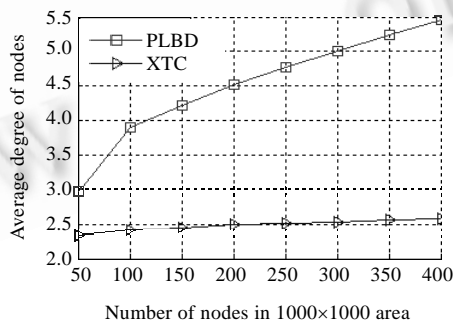


Fig.8 Comparison of average nodes' degree

图 8 平均节点度对比

由图 8 易知,随着网络中节点数量的增加,PLBD 与 XTC 构建拓扑的平均节点度都呈上升趋势,且都小于 6.但是,XTC 在节点密度很大(如 400)时的平均节点度仍然仅为 2.583 0,链路过于稀疏;PLBD 则保留了较为合适的链路数量.

### 3.2.2 本地通信路径平均跳数对比

通信路径上的跳数不仅从一定程度上反映节点间通信的能量消耗,同时还影响着网络中端到端成功通信的时延,跳数较大的通信路径需要更多的节点担任转发任务,耗费过多的能量且会导致信息传输的延迟时间增大.因此,对于分布式的拓扑控制算法来说,本地通信路径平均跳数相对较小的拓扑性能也更好.

网络中的传感器节点数量取为 50,100,150,200,250,300,350 和 400 时分别执行 PLBD 和 XTC 算法进行 200 次统计,得到本地路径的跳数值变化,两算法形成的本地通信路径跳数一般均不大于 6.由图 9 所示的平均跳数曲线对比可得,相同部署条件下,PLBD 构建的拓扑中,本地通信路径平均跳数显然低于 XTC 拓扑.这意味着全局通信路径的数据传输效率更高,极大地降低了网络通信时延.

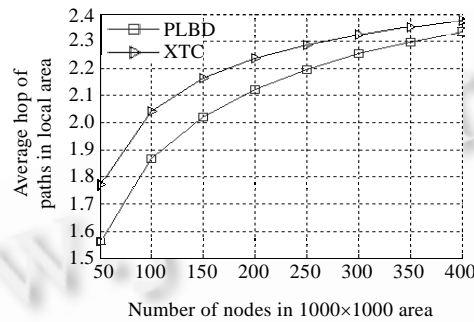


Fig.9 Comparison of local average hops

图 9 本地平均跳数对比

### 3.2.3 本地路径平均能耗对比

考虑到传感器节点依靠能量有限的电池供电,在保证拓扑连通的前提下尽可能减小通信路径上的能量消耗,将有利于提高能量的利用效率,从而延长网络生命期.由于算法执行过程中各节点都建立起了自身的邻居信息列表,其中记录了与所有邻居通信的路径损耗,根据这些信息容易得到本地路径上的平均能量消耗.令网络中的传感器节点数依次取为 50,100,150,200,250,300,350 和 400,对于相同节点数的网络分别执行 PLBD 和 XTC 算法进行 200 次仿真实验,最终统计得到两算法本地路径平均能耗曲线,如图 10 所示.

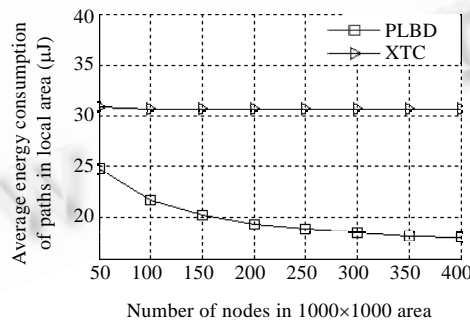


Fig.10 Comparison of local average energy consumption

图 10 本地平均能耗对比

对比两曲线,XTC 拓扑本地路径平均能耗几乎不随网络中的节点数目而改变,而 PLBD 拓扑的本地路径平均能耗不仅大大低于 XTC 拓扑,而且随节点数的增加有所降低.这表明 PLBD 拓扑比 XTC 拓扑更加节约能量,尤其对于节点密度较大的网络来说,PLBD 算法更有利于延长网络生命周期.

### 3.2.4 节点发射功率方差对比

通过第 3.2.3 节的实验,已经能够体现出 PLBD 算法构建的拓扑节能特性更好.但传感器网络中节点分布是随机的,全局拓扑单纯基于节点本地信息构建会导致各节点发射功率相差较大,部分节点可能由于能量消耗速



率过快而成为网络正常工作的“瓶颈”,甚至可能导致部分节点提前“死亡”而使网络产生“分区”现象.所以,仅仅考虑降低节点能耗是不够的,同时还应该注重节点能量消耗的均衡性.

节点发射功率的方差能够表示网络中节点能量消耗均衡程度,方差值越小也就意味着各节点的发射功率越趋于一致,即能量消耗越均衡.分别在节点数为 50,100,150,200, 250,300,350,400 的网络中执行 PLBD 和 XTC 控制算法,测量得到节点发射功率方差随节点个数变化的曲线,如图 11 所示.对比发现,在传感器节点数超过 200 的大规模网络中,两算法构建拓扑的能量消耗相对均衡;而对于中小规模的网络,PLBD 拓扑的能耗均衡性优于 XTC 拓扑.

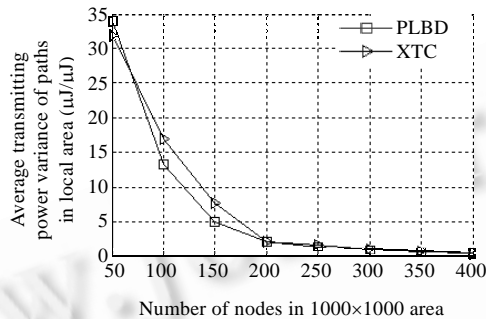


Fig.11 Comparison of variance of nodes' transmitting power

图 11 节点发射功率方差对比

#### 4 结束语

考虑基于节点位置信息的无线传感器网络拓扑控制算法忽略了网络的链路信息,理论推导了数据传输收包率与接收信号强度,路径损耗之间存在的关系,并基于此提出了一个分布式的拓扑控制算法 PLBD,保证了网络的收包率,同时还使各节点均建立起到达所有邻居的最小损耗链路,从而实现网络整体能耗的优化.仿真实验将 PLBD 算法与 XTC 算法进行了比较,结果表明,PLBD 拓扑具有更加健壮、通信效率更高、更加有效节省网络能量和节点能耗均衡程度较好等特点.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行以及所引用文献的作者们表示衷心的感谢.

#### References:

- [1] Sun LM, Li JZ, Chen Y. Wireless Sensor Network. Beijing: Publication of Tsinghua University Press, 2005. 3–21(in Chinese).
- [2] Zhang X, Lu SL, Chen GH, Chen DX, Xie L. Topology control for wireless sensor networks. Journal of Software, 2007,18(4): 943–954 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/943.htm>
- [3] Pan JP, Hou TY, Cai L, Shi Y, Shen SX. Topology control for wireless sensor networks. In: Johnson DB, Joseph AD, Vaidya NH, eds. Proc. of the MobiCom 2003. 2003. 286–299.
- [4] Rodoplu V, Meng TH. Minimum energy mobile wireless networks. Selected Areas in Communications, 1999,17(8):1333–1344.
- [5] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas RS, Kumar PR. Power control in ad-hoc networks: theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol. In: Proc. of the European Wireless Conf. 2002. 156–162. [http://black1.csl.uiuc.edu/~prkumar/ps\\_files/compow\\_ewc\\_2002.pdf](http://black1.csl.uiuc.edu/~prkumar/ps_files/compow_ewc_2002.pdf)
- [6] Kubisch M, Karl H, Wolisz A, Zhong LC, Rabaey J. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks. In: Yanikomeroglu H, ed. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). New York: IEEE Press, 2003. 16–20.
- [7] Li L, Halpern JY, Bahl P, Wang YM, Wattenhofer R. A cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2005,13(1):147–159.

- [8] Lillis, K, Pemmaraju SV. Topology control with limited geometric information. In: Proc. of the 9th Int'l Conf. on Principles of Distributed Systems (OPODIS). 2005. <http://www.springerlink.com/content/qm67v44330837301/fulltext.pdf>
- [9] Wattenhofer R, Zollinger A. XTC: A practical topology control algorithm for ad-hoc networks. In: Panda DK, Duato J, Stunkel C, eds. Proc. of the Int'l Parallel and Distributed Processing Symp. (IPDPS). New Mexico: IEEE Press, 2004. 216–223.
- [10] Matthias D, Jan B, Lothar T. S-XTC: A signal-strength based topology control algorithm. Technical Report, TIK Report 235, ETH Zurich, 2005.
- [11] Olivier V, Pascal F, Maher H. MPEG-2 video services over packet networks: Joint effect on encoding rate and data loss on user-oriented QoS. In: Proc. of the IEEE Workshop on NOSSDAV'98. 1998. 257–264. <http://www.cl.cam.ac.uk/research/srg/nosssdav98/papers/nosssdav98-010.ps.gz>
- [12] IEEE standards 802.15.4. 2003. 53–54.
- [13] CC 2420 product information and data sheet. chipcon. <http://www.chipcon.com/>
- [14] Srinivasan K, Levis P. RSSI is under appreciated. In: Proc. of the 3rd Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets 2006). 2006. 1–5. <http://csl.stanford.edu/~pal/pubs/emnets06.pdf>
- [15] Zuniga M, Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low power wireless links. In: Proc. of the IEEE SECON. Santa Clara: IEEE Communications Society, 2004. 517–526.
- [16] Kleinrock L, Silvester J. Optimum transmission radio for packet radio networks or why six is a magic number. In: Proc. of the IEEE National Telecommunications Conf. 1978, 2–4. <http://www.unik.no/personer/adhocnet/2006/articles/MagicNumber-kleinrock.pdf>

#### 附中文参考文献:

- [1] 孙利民, 李建中, 陈渝. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005. 3–21.
- [2] 张学, 陆桑璐, 陈贵海. 无线传感器网络的拓扑控制. 软件学报, 2007, 18(4): 943–954. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/943.htm>



郝晓辰(1980—),男,河北衡水人,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络拓扑控制,路由算法.



刘彬(1953—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为智能传感器设计,无线传感器网络.



窦晶晶(1985—),女,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络拓扑控制.