第 13 卷 第 6 期 2013 年 2 月
1671—1815(2013)06-1661-05

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 13 No. 6 Feb. 2013
© 2013 Sci. Tech. Engrg.

一种适合长距离带状无线传感器网络的路由协议

刘国梅 金秋春 史军勇
(郑州航空工业管理学院计算机科学与应用系,郑州 450015)

摘 要 针对长距离带状无线传感器网络的能耗不均、易出现"热区"等问题,提出一种适合长距离带状无线传感器网络拓扑结构的能量高效的路由协议 ERPLDB。ERPLDB 协议通过网络能耗模型中的能量消耗公式计算出各个簇的网络节点平均能耗,并使各个簇内的网络节点平均能耗近似相等来进行非均匀分簇,使越靠近 Sink 节点的簇规模越小,从而有更多的能量转发远程簇传输过来的数据,尽量减少"热区"问题的出现。仿真结果表明,ERPLDB 协议能均衡长距离带状网络的能量消耗、有效延长网络的生命周期。

关键词 无线传感器网络 长距离带状网络 路由协议 ERPLDB
中图法分类号 TP393.03; **文献标志码** A

在以往的无线传感器网络路由协议研究中,人们提出了多种路由协议,如 Flooding[1]、SPIN[2]、DD[3]、LEACH[4]、TEEN[5]、SPEED[6]等。但在特定的应用环境中,如长距离的街道、带状的峡谷、长带状河流、跨江大桥、高速公路、井下巷道等环境,无线传感器网络需要布置成狭长的带状结构。而传统的无线传感器网络路由协议对于这种特殊的长带状网络都有自己的局限性。当网络呈长带状分布时,信息流一般向一侧流向 Sink 节点,这样数据流就会呈"棒槌"状,越靠近 Sink 节点数据量越大,能量消耗越多,从而造成的"热区"问题更为严重[7]。

基于此,本文研究的无线传感器网络拓扑结构为长距离带状,设计出一种适合长距离带状网络拓扑结构的能量高效的路由协议(An Energy-efficient Routing Protocol for Long Distance Band-type network,简称 ERPLDB),协议中通过使各个簇内的平均能量消耗近似相等进行非均匀分簇,使越靠近 Sink 节点的簇规模越小,来解决"热区"问题,平衡整个网络的负载,延长网络的生命周期。

2012 年 9 月 28 日收到 河南省科技厅科技攻关项目(122102210444)、河南省教育厅自然科学研究计划项目(2011A520043)资助
第一作者简介:刘国梅(1978—),女,硕士,讲师,研究方向:无线传感器网络. E-mail: guomei2002109@126.com。

1 网络与能耗模型

1.1 基本的网络模型

本文的研究基于以下网络模型:

1)传感器网络由 n 个普通传感器节点和 1 个 Sink 节点组成,其中普通节点具有相同的计算、通信能力和初始能量,而 Sink 节点的能量和计算能力是没有限制的。

2)普通节点随机部署在一个 $L \times m$ (其中 L 远远大于 m)的矩形区域内,Sink 节点位于矩形区域的一端。网络部署完毕后,所有节点都是静止不动的。

3)传感器节点具有全网唯一的 ID 号,同时链路是对称的,若已知对方发射功率,节点可以根据接收信号的强度计算出发送者到自己的近似距离。

4)传感器节点的数据融合比例系数为 β,即 $k_{trans} = k_{rec}/\beta$,其中 k_{rec}、k_{trans} 分别表示传感器节点接收到的数据包长度和融合后形成的数据包长度。

1.2 能量消耗模型

本文采用无线传感器网络中具有代表性的第

一顺序无线电模型[8](first order radio model)。发送数据时的能量消耗为:

$$E_{\text{trans}}(k,d) = \begin{cases} kE_{\text{elec}} + k\varepsilon_{fx}d^2, & d < d_0 \\ kE_{\text{elec}} + k\varepsilon_{\text{amp}}d^4, & d \geqslant d_0 \end{cases}$$

接收数据时的能量消耗为:

$$E_{\text{rec}}(k,d) = kE_{\text{elec}}$$

其中,k 为发送数据 bit 值;d 为实际通信距离;d_0 为距离阈值,$d_0 \approx \sqrt{\varepsilon_{fx}/\varepsilon_{\text{amp}}}$。当传输距离小于阈值 d_0 时,功率放大损耗采用自由空间模式,否则采用多路径衰减模式;E_{elec} 表示节点电路发送和接收每比特数据的能耗;ε_{fx} 和 ε_{amp} 分别表示放大器在 2 种衰减模型下的能耗系数。

2 路由协议

本路由协议主要通过计算各个簇内的平均能耗,使各个簇内的平均能耗近似相等进行非均匀分簇,使得越靠近 Sink 节点的簇规模越小,从而簇首具有更多的能量转发远程的簇发送过来的数据,达到能量消耗均衡的目的,从而延长整个网络的生命周期。

2.1 簇区域的划分

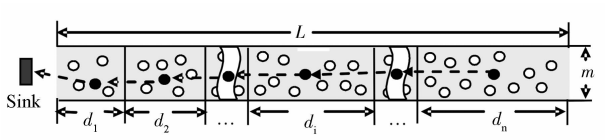

图 1 ERPLDB 协议

如图 1 所示,传感器节点分布在 $L \times m$(其中 L 远远大于 m)的矩形区域内,Sink 节点位于坐标(0,$m/2$)处。整个无线传感器网络的节点部署完毕后,Sink 节点向全网传感器节点广播信息包,网络中的传感器节点依据所接受信号的强弱独立计算到 Sink 节点的近似距离(注:由于 L 远远大于 m,可认为到网络场景矩形区域中 Sink 节点所在的这条边的距离为到 Sink 节点的近似距离),从 Sink 节点端开始,对传感器网络进行区域划分。

定义 1 d_i 表示第 i 个簇的长度,距离 sink 节点最近的簇的长度为 d_1,最远的簇的长度为 d_n(这里为了减少能量消耗,要求 $d_i < d_0$)。

簇长度为 d_i 的簇在收集一轮数据的平均能量消耗主要分为以下两种情况:

(1)离 Sink 节点最远处的簇,即 $i = n$:

该簇内节点的能耗包括以下三部分:簇成员节点向簇首发送数据的能耗;簇首节点接收数据的能耗;簇首节点将融合后的数据转发给下一处节点的能耗。因此,根据能量消耗模型,最远处簇一次收集并传输 k bit 数据的总平均能耗为:

$$\overline{E_n} = k(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{fx}d_n^2) + kE_{\text{elec}} + \frac{k}{\beta}(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{fx}d_n^2) \tag{1}$$

(2)非最远处簇,即 $1 \leqslant i < n$(最近处为 1)时:

该类簇的簇首节点除了负责本簇内成员节点数据的接收和发送之外,还要负责转发更远处簇发送过来的数据,因此,该类簇内节点的能量消耗除了包括上面所说的距离 Sink 节点最远处簇的簇内节点的所有能量消耗外,还包括簇首接收和转发更远处簇的数据的能耗。因此非最远处簇的簇内节点一次数据收集并传输的总平均能耗为:

$$\overline{E_i} = k(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{fx}d_i^2) + kE_{\text{elec}} + \frac{k}{\beta}(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{fx}d_i^2) + \frac{k\sum_{j=i+1}^{n} d_j}{\beta d_i}(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{fx}d_i^2);\ (i = 1, 2, \cdots, n-1) \tag{2}$$

要实现各簇节点能量的均衡消耗,即距离 Sink 节点近的簇和距离 Sink 节点远的簇的能量消耗均衡,应该使 $\overline{E_1} = \overline{E_2} = \cdots = \overline{E_{n-1}} = \overline{E_n} = E$。

由(2)式可得:

$$\overline{E_1} = k(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{fx}d_1^2) + kE_{\text{elec}} + \frac{k}{\beta}(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{fx}d_1^2) + \frac{k(L - d_1)}{\beta d_1}(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{fx}d_1^2) \tag{3}$$

如果给出式(3)中的 $\overline{E_1} = E$、k、E_{elec}、ε_{fx}、β、L 等常数,则式(3)就是关于 d_1 的一元三次方程,又 d_1 为正的实数,可以通过计算机程序编程,利用枚举法或牛顿迭代法求出 d_1 的值。

由式(2)可得:

$$\overline{E_2} = k(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{fx}d_2^2) + kE_{\text{elec}} + \frac{k}{\beta}(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{fx}d_2^2) +$$

$$\frac{k(L-d_1-d_2)}{\beta d_2}(E_{elec}+\varepsilon_{fx}d_2^2) \tag{4}$$

令 $\overline{E_2}=\overline{E_1}=E$,并且 d_1 已经求出,则(4)式为关于 d_2 的一元三次方程,又 d_2 为正的实数,同样可以通过计算机程序编程,利用枚举法或牛顿迭代法求出 d_2 的值。

依次类推,可以求出 d_3、d_4、…、d_i、…、d_n 的值,直到 $\sum_{i=1}^{n} d_i > L$。

现在讨论一下 E 值应该怎么给出,在给出 E 值的时候,为了降低整个网络能耗,要保证 $d_i < d_0$ $(i=1,2,\cdots,n)$。

由式(1)可求出 d_n,令 $d_n < d_0$,即:

$$d_n=\sqrt{\frac{\beta E-k(2\beta+1)}{k(\beta+1)\varepsilon_{fx}}} < d_0 \tag{5}$$

由式(5)可以求出 E 的最大值 E_0。将求出的 E_0 带入式(2)中可知,$d_i < d_0(i=1,2,\cdots,n)$。所以在给出 E 值的时候只要小于 E_0 即可,为了节省网络能量,最好等于 E_0。

d_1、d_2、…、d_i、…、d_n 的值求出以后,按照图 1 所示对无线传感器网络进行区域划分。

2.2　簇的形成及簇首的产生

网络区域划分后,每个小区域内的节点成为一个簇,网络中的节点根据自己到 Sink 节点的距离加入相应的簇。为方便描述,可以为每个簇赋予一个簇标识,本文按照距离 Sink 节点由近到远的顺序依次将各个簇标识记为 $c_1,c_2,\cdots,c_i,\cdots,c_n$,其相应的簇首分别为 $ch_1,ch_2,\cdots,ch_i,\cdots,ch_n$。由于划分簇时是基于各个簇平均能量消耗相等的思想进行的,所以以这样的方式形成的簇能使各个簇能量消耗均衡,减少“热区”问题的出现,延长整个网络的生命周期。

下面再讨论一下簇首的产生方法,本文中限定每个簇中有且只有一个簇首。当簇刚形成后,由于每个节点的初始能量相同,故选取节点在簇中的相对位置作为选取簇首的依据。簇刚形成后,每个节点向 Sink 节点报告自己的坐标位置,Sink 节点选取距离每个簇的中心线距离最近的节点作为本簇的簇首,如果有多个节点满足,则随机挑选一个作为簇首。簇首确定后,Sink 节点向所有传感器节点广播簇首信息,每个非簇首节点收到信息后确定自己的簇首,各个簇首节点则根据接收的信息确定自己的上一跳和下一跳的簇首节点,从而形成一条从距离 Sink 节点最远处到 Sink 节点的簇首链,最终形成的簇首链为:

$ch_n \rightarrow ch_{n-1} \rightarrow \cdots \rightarrow ch_i \rightarrow \cdots \rightarrow ch_1 \rightarrow sink$。

监测数据传输的过程中,每个簇中的非簇首节点将监测到的数据通过单跳的方式传给簇首,簇首接收到数据进行融合后,沿着事先建立好的簇首链以多跳的方式将数据转发给 Sink 节点。

2.3　簇首的更换

在以后的网络运行过程中,通过异步更换簇首的方法均衡网络节点的能量消耗,从而延长整个网络的生命周期。在网络运行过程中,簇首在自己的能量低于一定阈值时向簇内节点广播 ch_change 消息,簇内节点收到 ch_change 消息后将自己的位置和当前能量等信息报告给簇首,簇首根据这些信息,采用模拟退火算法从中选择一个能量和地理位置最优的节点作为新簇首,并把新簇首消息广播出去,新簇首替代了原簇首,原簇首链相应地得到动态调整,然后继续进行监测数据的传输,从而达到均衡能量消耗的目的。

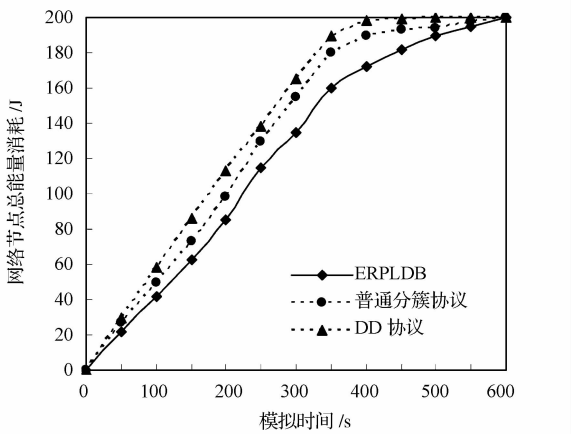

图 2　网络节点总能量消耗与时间的关系

3　仿真及结果分析

本文采用 matlab 软件对网络进行仿真,并在网络生存周期和网络总能耗两个方面对 ERPLDB、DD

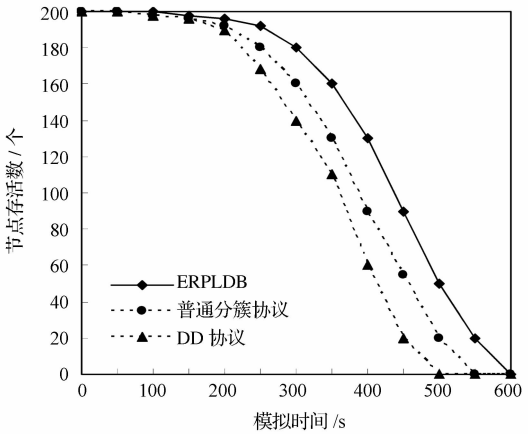

图 3 节点存活数与时间的关系

协议和以普通均匀分簇的思想设计的普通分簇协议进行比较。本文设置的网络场景为 600 m×20 m 的矩形,节点数量 n 为 200 个。Sink 节点的坐标为(0,10),数据包大小为 2000 bit,节点初始能量为 1 J,$\beta = 1\ 000$, $E_{elec} = 50$ nJ/bit, $\varepsilon_{fx} = 10$ pJ/(bit·m^2), $\varepsilon_{amp} = 0.001\ 3$ pJ/(bit·m^4)。节点能量为零时表示该节点死亡。并且为了简化起见,网络中全部节点死亡才认为网络生命周期的结束。

实验仿真结果如图 2、图 3 所示,图中的横坐标是仿真时间(单位为秒),图 2 的纵坐标是 200 个节点的总的能量消耗。我们可以清楚地看到,大部分时间段里,总的能量消耗:ERPLDB < 普通分簇协议 < DD 协议。图 3 为节点存活数随着时间的变化情况,可以看到,ERPLDB 的节点存活率要好于普通分簇协议和 DD 协议,这 200 个传感器节点,如果使用 DD 协议发送数据,则时间持续 499 秒后,所有的网络节点全部死亡;使用普通分簇协议发送数据,则时间持续 561 秒后,所有的网络节点全部死亡;而如果采用 ERPLDB 协议,则网络持续到 602 秒后,网络中的节点才全部死亡。

表 1 3 种协议的网络能耗比较

协议	第一个节点死亡时间/s	所有节点的死亡时间/s	500 s 时网络能耗/J
ERPLDB	98	599	274
普通分簇协议	71	542	288
DD 协议	64	493	300

为了验证 ERPLDB 协议在相对狭窄的长距离带状网中更适应,本文的其他实验条件不变,将网络实验场景设置为 900 m×20 m 的矩形,实验节点数增加到 300 个。3 种协议仿真测试结果比较如表 1 所示,可以看出,ERPLDB 协议在节约网络耗能方面更优于其他 2 种协议。

表 2 不同场景下 3 种网络的生命周期比较

场景设置	网络节点个数	所有节点的死亡时间/s		
		ERPLDB	普通分簇协议	DD 协议
1 200 m×20 m	400	597	532	489
1 500 m×20 m	500	591	525	481
1 800 m×20 m	600	583	513	467
2 100 m×20 m	700	574	495	448

继续增加网络场景的狭窄性和节点个数,测试结果如表 2 所示。测试结果表明,网络场景越狭窄,ERPLDB 协议的优越性越突出,ERPLDB 协议能够很好地均衡长距离带状网络的能量消耗,提高网络的生命周期;同时也表明 ERPLDB 协议的性能改进是稳定的,且具有较好的网络可扩展性。

4 结束语

针对无线传感器网络带状拓扑结构的特殊性,本文提出了一种适合长距离带状网络结构的能量高效的路由协议 ERPLDB,协议中通过使各个簇内的平均能量消耗近似相等进行非均匀分簇,因此相对于其他协议,ERPLDB 更能改善由“热区”效应而带来的能量消耗不均衡的问题。另外协议通过异步更换簇首的策略减少簇首选择的能量开销,更能节省网络的能量消耗,延长网络的生命周期。最后通过 matlab 软件进行了仿真,同时与 DD 协议和以普通均匀分簇思想设计的普通分簇协议进行比较,ERPLDB 在网络生存周期和网络总能耗两个方面,有非常明显的提高,并且网络场景越狭长,优越性越明显,验证了本协议的有效性。

参 考 文 献

1 Hedetniemi S, Liestman A. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks. Networks, 1998; 18(4):319—349

2 Kulik J, Heinzelman W, Balakrishnan H. Negotiation based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. Wireless Networks,2002;8(2—3),169—185

3 Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, *et al*. Directed diffusion for wireless sensor networking. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003;11(1):2—16.

4 Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks. Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, Hawaii, 2000:3005—3014

5 Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium, San Francisco, California, USA, 2001:2009—2015

6 He T, Stankovic J A, Lu C, *et al*. SPEED: A Stateless Protocol for Real-time Communication in Sensor network. Proceedings of the 23th International Conference on Distributed Computing Systems, Rhode Island, 2003: 46—55

7 李成法,陈贵海,叶 懋,等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议. 计算机学报, 2007;30(1): 27—36

8 Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002; 1 (4): 660—670

An Routing Protocol for Long Distance Band-type Wireless Sensor Network

LIU Guo-mei, JIN Qiu-chun, SHI Jun-yong

(Department of Computer Science and Application, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, P. R. China)

[**Abstract**] To solve the problems of uneven energy consumption, prone to "hot zone" etc. in long distance band-type wireless sensor network, an energy-efficient routing protocol for long distance band-type network (ERPLDB) is presented. In ERPLDB, average energy consumption of each cluster in the network is calculated according to the energy consumption formula of the network energy consumption model. And the network is uneven clustered by equaling average energy consumption of each cluster. Then closer to the sink node, smaller the scale of the cluster. So the cluster closer to the sink node can save more energy to forward data coming from the more distance cluster. And the "hot zone" problem is solved effectively. Simulation results show that ERPLDB can balance the long distance band-type network energy consumption, and effectively extend the life of network.

[**Key words**] wireless sensor network long distance band-type network routing protocol ERPLDB