

# WSN 中 PMRC 模型能量洞问题的解决策略研究\*

李倩倩<sup>a,b</sup>, 刘方爱<sup>a</sup>, 丁鼎<sup>a</sup>

(a. 山东师范大学信息科学与工程学院; b. 山东省分布式计算机软件新技术重点实验室, 济南 250014)

**摘要:** 针对 PMRC 模型中的能量洞问题, 提出了有效平衡能耗的 DP 策略。该策略引入动态占空比, 根据节点至 sink 的距离分配不同的占空比, 有效地平衡了内层节点的能量消耗, 从而延长了网络的生命周期。通过在 OMNet ++ 平台上的仿真实验表明, DP 策略在能量效率、延时方面较原相同占空比策略有较大改进。

**关键词:** 无线传感器网络; 能量洞问题; 空闲侦听; 占空比; 网络生命周期

**中图分类号:** TP393      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2012)07-2614-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.058

## Research on energy hole based on PMRC in WSN

LI Qian-qian<sup>a,b</sup>, LIU Fang-ai<sup>a</sup>, DING Ding<sup>a</sup>

(a. School of Information Science & Engineering, b. Shandong Provincial Key Laboratory for Novel Distributed Computer Software Technology, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

**Abstract:** In view of the energy hole problem on PMRC, this paper proposed a new strategy named DP strategy which could effectively balance energy consumption. Introducing dynamic duty cycle protocol, DP strategy assigned different duty cycle for nodes at different distances from sink, which made it possible to balance the inner nodes energy consumption and extended the network existent periods without sacrificing end-to-end delay. The results of simulation on OMNet ++ show that compared with the original strategy, DP strategy improves a lot in energy efficiency and network lifetime.

**Key words:** WSN(wireless sensor network); energy hole problem; idle listening; dutycycle; network lifetime

近年来,随着微电子技术和无线通信技术的进步,低成本、低功耗和多功能的微型传感器得到快速发展。这使得大规模的无线传感器被广泛应用于环境监测、军事、医疗健康、家庭智能监控和其他商业领域<sup>[1]</sup>。

在 WSN 中,传感器网络与外界的接口是一个或多个 sink 节点,传感器节点将感应的数据收集起来以多跳的方式传送给 sink。研究发现,离 sink 越近的节点,其能量消耗也越快<sup>[2]</sup>,这种现象被称为在 sink 周围形成的能量洞问题。文献[3]中的实验结果显示,当靠近 sink 的节点能量消耗殆尽时,远离 sink 的节点的剩余能量高达它们初始能量的 93%。

在典型的 WSN 中,节点通常花费很大比例的生命周期去侦听网络而不是通信,因此空闲侦听所消耗的能量不能被忽视。为了减少节点空闲侦听的能量消耗,传感器网络协议设计中通常采用占空比,即节点交替处于活动和休眠状态。存在用占空比的协议,它为所有的节点分配了相同的占空比,靠近 sink 较近的那些节点能量消耗依然比较快,对延长网络的生命周期没能起到改善作用。

为了最大化网络生命周期,将占空比与其他的解决能量洞问题的方案及模型结合是很有意义的。然而,延长网络生命周期会造成网络性能的降低。例如使用占空比,在传输数据包的每一跳会引入额外的安装延迟,许多解决能量洞问题的方案会影响端到端的延时。

本文在 PMRC 模型上提出了一个利用不同占空比的策略,即为距离 sink 距离不同的节点分配不同的占空比来解决能量洞问题,这个策略在不牺牲端到端延迟和吞吐量性能的情况下延长网络生命周期,达到了网络能量消耗的次平衡。

### 1 DP 策略的模型假设

本文采用的网络模型是 PMRC 模型,并在此模型上引入动态层的思想。

#### 1.1 网络模型

为了分析的简化,假设所有的传感器节点在一个距离 sink 半径为  $R$  的环中均匀分布,把网络划分为以 sink 为中心的宽度为  $r$  的同心环, $r$  为节点的最大传输距离,距离 sink 大于  $r$  的节点产生的数据要以多跳的方式传给 sink。每一层又被划分为若干个簇(cluster),每个簇由位于同一层的节点和一个位于相邻内层的簇头(cluster head)组成。如图 1,包括三层,其中阴影部分是位于第二层的一个簇,包括节点 2-8,簇头是位于第一层的节点 1。

对于 PMRC 模型<sup>[4]</sup>来说,网络的生命周期分为许多轮,每一轮包括网络构建阶段和数据传输阶段。网络构建阶段需要经过多次迭代,每一次迭代完成每一层节点的发现和簇的构建。每一次迭代都是由 sink 节点广播一个 CP 控制分组开始,然后开始相应的层的构建。

**收稿日期:** 2011-10-23; **修回日期:** 2011-11-24      **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(90612003);山东省科技发展计划资助项目(2011GGH20123);济南市高校院所自主创新项目(2010040072)

**作者简介:** 李倩倩(1988-),女,山东东营人,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络(624812716@qq.com);刘方爱(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为并行处理、网络优化、电子商务、网格计算;丁鼎(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络。

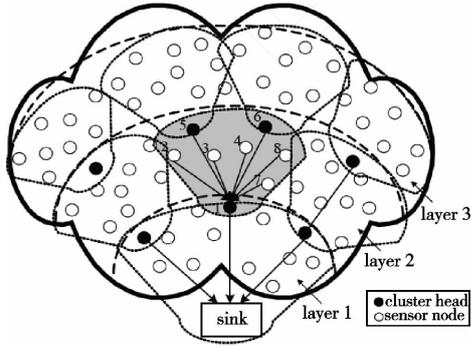


图1 PMRC模型

在PMRC模型中引入了动态层模型后节点在网络重建前后的层编号不同,则这些层编号发生变化的节点引起层边界向sink方向移动及新簇大小的变化。因此在整个网络生命周期期间,相邻层之间的边界会根据需要动态变化。如*i*代表节点的初始层号,采用动态层模型,假设初始拓扑位于第*i*(*i*>1)层的节点在整个生命周期中平均被“推”至2*i*层。

## 1.2 能量模型

所有的传感器节点具有相同的初始能量,且sink的能量不受限制,且传输距离也不受限制,考虑在空闲侦听状态下的能量消耗对网络生命周期的影响,在这种情况下,网络构建阶段,发送和接受控制分组所消耗的能量相对于空闲侦听所消耗的能量就可以忽略不计了。所以传感器节点的能量消耗主要包括三部分,即接受外层数据所消耗的能量、发送本簇数据及转发来自外层数据所消耗的能量、空闲侦听所消耗的能量。

对于第一部分和第二部分计算能量消耗可以参考文献[5]中用到的能量模型,在距离为*r*的范围内发送位的数据所消耗的能量为

$$l(E_{\text{elec}} + \varepsilon r^\alpha) \quad (1)$$

接受*l*位的数据所消耗的能量为  $lE_{\text{elec}}$ 。

对于第三部分计算能量消耗,可根据文献[6],单位时间内节点空闲侦听所消耗的能量用  $e_{\text{idle}}$  表示,该参数取值为  $e_{\text{idle}} = 0.88 \text{ mJ/s}$ 。

## 2 DP策略

### 2.1 引入不同占空比平衡能量消耗

在原相同占空比的策略<sup>[7]</sup>中,PMRC结构的网络从内到外逐层构建的方式,决定了内层节点因为要转发外层节点的数据消耗的能量高于外层节点,所以靠近sink的节点能量消耗速率高于远离sink的节点。当内层节点能量耗尽时,整个网络生命就终止了。为解决靠近sink的节点的能量消耗快的问题,考虑空闲侦听所消耗的能量时,引入了不同的占空比来解决能量洞问题。

利用不同占空比来计算空闲侦听所消耗的能量,可以补偿节点不平衡的能量消耗,因此延长了网络的生命周期。本文方法设计的区别节点的占空比是为了维持网络延迟的性能。

### 2.2 DP策略中不同层中的节点的平均负载量

假设在距离以sink为中心的半径为*R*的范围内均匀分布密度为*ρ*的静态传感器节点,并且分为*m*层,每层的宽度为*r*,*r*也是传感器节点的最大传输距离。随机选择部分传感器节点

负责感应数据,即为源节点,占节点总数的比例为*μ*,每个源节点每隔单位时间产生并发送*λ*位数据。

对于每一个节点,它的能量消耗由  $E_r$ 、 $E_s$ 、 $E_l$  三部分组成,其中  $E_r$ 、 $E_s$  需要根据节点所处的位置来区别其节点的能量消耗,即用  $E_r^i$ 、 $E_s^i$  来表示。

1)  $E_r^i$  来表示第*i*层的每个节点单位时间内接收数据所消耗的平均能量。在PMRC模型中,位于第*i*层的节点需要接受*i*层之外(远离sink的)的所有层的数据,本文使用  $s_i$  代表第*i*层的面积,并利用式(1)可得:

$$E_r^i = \frac{E_{\text{elec}} \rho \mu \lambda \sum_{i+1}^m S_j}{S_i \rho} = \frac{E_{\text{elec}} \pi [(mr)^2 - (ir)^2] \rho \mu \lambda}{\pi [(ir)^2 - ((i-1)r)^2] \rho} = \frac{E_{\text{elec}} (m^2 - i^2) \mu \lambda}{2i - 1} \quad 1 \leq i \leq m \quad (2)$$

2)  $E_s^i$  代表第*i*层的每个节点单位时间内发送数据所消耗的平均能量。第*i*层的节点不仅要发送本簇内的数据,还要转发来自外层的数据,在第*i*层的一个节点需为第*j*层的  $s_j/s_i$  个节点转发数据,*j*>*i*。所以有:

$$E_s^i = \frac{(E_{\text{elec}} + \varepsilon r^\alpha) \rho \mu \lambda \sum_i^m S_j}{S_i \rho} = \frac{(E_{\text{elec}} + \varepsilon r^\alpha) \pi [(mr)^2 - ((i-1)r)^2] \mu \lambda}{\pi [(ir)^2 - ((i-1)r)^2]} = \frac{(E_{\text{elec}} + \varepsilon r^\alpha) [(m^2 - (i-1)^2) \mu \lambda]}{2i - 1} \quad 1 \leq i \leq m \quad (3)$$

3)  $E_l$  单位时间内节点空闲侦听的能量消耗。这部分能量由两部分组成:  $E_{lc}$ , 即网络构建阶段空闲侦听的能量消耗;  $E_{ld}$ , 即数据传输阶段的空闲侦听的能量消耗。

(1)  $E_{lc}^i$  代表第*i*层的节点在整个生命周期中每一轮网络构建由于空闲侦听消耗的平均能量。

网络构建阶段,第*i*层的节点会处理*i*+1次CP分组,前*i*-1次只处理CP后即可sleep,不需参与其他操作;第*i*次是其自身所在层的构建;第*i*+1次是参与第*i*+1层的构建,这两层构建时间包含了发送CP的时间。所以有:

$$E_{lc}^i = \frac{(T_b + T_s) e_{\text{idle}}}{T_c} \quad i = 1 \quad (4-1)$$

$$E_{lc}^i = \frac{(i-1)T_b + 2T_s + (2i-1)T_b + 2T_s}{2T_c} e_{\text{idle}} = \frac{((3i-2)T_b + 4T_s) e_{\text{idle}}}{2T_c} \quad 1 < i < m \quad (4-2)$$

$$E_{lc}^i = \frac{i \times T_b + T_s + 2i \times T_b + T_s}{2T_c} e_{\text{idle}} = \frac{(3i \times T_b + 2T_s) e_{\text{idle}}}{2T_c} \quad i = m \quad (4-3)$$

其中:  $T_b$  代表每一次迭代接收和处理来自sink的CP所需时间;  $T_s$  代表构建一层需要的时间;  $T_c$  为网络每一轮的平均寿命。

(2)  $E_{ld}^i$  代表第*i*层的节点在数据传输阶段的  $E_{ld}$ 。

每一轮的数据收集阶段,所有簇头交替处于active和sleep状态。不同层的节点有不同的占空比,单位时间内,第*i*层的传感器节点处于active状态的时间所占比率称为占空比(用符号  $\gamma_i$  表示)。  $E_{ld}$  由占空比  $\gamma_i$  决定,  $\gamma_i = T_{\text{active}} / (T_{\text{active}} + T_{\text{sleep}})$ , 因此它的空闲侦听的能量消耗为  $E_{ld}^i = \gamma_i e_{\text{idle}}$ 。

用  $E_i$  代表引入不同占空比后的第*i*层的一个节点在单位时间内的能量消耗,有

$$E_i = E_r^i + E_s^i + E_{lc}^i + E_{ld}^i =$$

$$\frac{E_{elec} [m^2 - i^2] \mu \lambda}{2i - 1} + \frac{(E_{elec} + \epsilon r^\alpha) [m^2 - (i - 1)^2] \mu \lambda}{2i - 1} + \frac{(T_b + T_s) e_{idle}}{T_c} + \gamma_i e_{idle} \quad i = 1 \quad (5-1)$$

$$E_i = E_r^i + E_s^i + E_{lc}^i + E_{ld}^i = \frac{E_{elec} [m^2 - i^2] \mu \lambda}{2i - 1} + \frac{(E_{elec} + \epsilon r^\alpha) [m^2 - (i - 1)^2] \mu \lambda}{2i - 1} + \frac{((3i - 2) T_b + 4 T_s) e_{idle}}{2 T_c} + \gamma_i e_{idle} \quad 1 < i < m \quad (5-2)$$

$$E_i = E_r^i + E_s^i + E_{lc}^i + E_{ld}^i = \frac{E_{elec} [m^2 - i^2] \mu \lambda}{2i - 1} + \frac{(E_{elec} + \epsilon r^\alpha) [m^2 - (i - 1)^2] \mu \lambda}{2i - 1} + \frac{(3i \times T_b + 2 T_s) e_{idle}}{2 T_c} + \gamma_i e_{idle} \quad i = m \quad (5-3)$$

通过平衡不同层的节点的能耗可以有效缓解能量消耗不平衡的问题,以缓解能量洞问题,从而延长了网络生命周期。因此定义:

$$E_i = E_{i+1} \quad 1 \leq i < m \quad (6)$$

### 2.3 DP 策略性能研究

分析下一个数据包从最外环  $m$  环发送到 sink 的延迟,来保证这个 DP 策略与原有的相同占空比策略的延迟一样。因为占空比的应用,在两个策略里每一跳的延迟都由占空比的安装延迟和数据传输延迟这两部分组成。为了保证能接收到数据包,一个节点的工作周期  $T_{active}$  是固定的,所以一个节点的占空比由睡眠时间  $T_{sleep}$  决定。所以当节点的占空比为  $\gamma_i$  时,  $T_{setup} = T_{sleep} / 2K$ , 由  $\gamma_i$  得定义可得  $T_{sleep} = T_{active} (1 - \gamma_i)$ , 所以  $T_{setup} = T_{sleep} / 2K = T_{active} (1 - \gamma_i) / 2K\gamma_i$ , 这时  $K$  代表每一个发送者拥有的转发者的平均数目,对于 DP 策略的模型来说,这里  $K = 1$ 。

用  $D_d$  代表 DP 策略中的从  $m$  环传输数据的端到端的延迟,假设 sink 一直是活跃的,所以有:

$$D_d = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{T_{active} (1 - \gamma_i)}{2\gamma_i} + m(E_{elec} + \epsilon r^\alpha) \quad (7)$$

原有的相同占空比策略从  $m$  环传输数据的端到端的延迟为

$$D_d = (m - 1) \frac{T_{active} (1 - \gamma)}{2\gamma} + m(E_{elec} + \epsilon r^\alpha) \quad (8)$$

为了保证 DP 策略的延迟性能,即保证端到端的延迟不变,有:

$$(m - 1) \frac{1 - \gamma}{\gamma} = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{(1 - \gamma_i)}{\gamma_i} \quad (9)$$

通过式(6)(9)很形象地提供了不同环中的节点需要。因为占空比用来补偿每一环中能量消耗的不平衡,越靠近 sink 层的节点,转发和接受数据消耗的平均能量就高,占空比越小,最外层占空比最大。通过式(5)可以计算出 DP 策略中不同层节点的平均能量消耗。DP 策略有效地缓解了能量消耗不平衡的问题,在第 3 章得到了证明。

## 3 仿真分析

为了验证基于 PMRC 模型的 DP 策略的有效性,仿真实验将分别从端到端延迟、能量消耗两个方面与原相同占空比策略相比较。本文设计了无线传感器网络仿真场景,使用

OMNet ++<sup>[8]</sup> 平台上的 Castalia<sup>[9,10]</sup> 仿真器对其进行仿真实验<sup>[11]</sup>。

### 3.1 仿真环境

每个节点都具有相同的初始能量,都为 50 J。节点的最大传输距离,即 PMRC 中每一层的宽度  $r = 20$  m。网络的传输范围为 5,也就是网络一共有五层。每个节点的数据产生速率  $\lambda = 400$  bps,节点分布的密度  $\rho = 5/m^2$ ,参数  $\alpha$  在能量模型中是 2。上述所有参数如表 1 所示。

表 1 仿真场景中的参数

仿真场景中参数	参数值
节点的初始能量	50 J
最大传输范围	20 m
区域环数	4
数据包的长度	150 Byte
节点分布密度	5/m <sup>2</sup>
节点数据产生速率	400 bps
源节点占总节点数的比例	20%
能量模型	
$E_{elec}$	50 nJ/bit
$\alpha$	2
$\epsilon$	10 pJ/bit/m <sup>2</sup>
$e_{idle}$	0.88 mJ/s
$\gamma$	2%

### 3.2 延时状况分析

延时是指单跳平均延时以及占空比安装延时的总和。其中单跳延时为第一个数据分组从源节点发出开始计时,到最后—个数据分组被目的节点接收到的总时间除以分组的数目所得到的平均时间。占空比安装延时为 2.3 节中的  $T_{setup}$ 。协议的延时越低,表明其效率越高。

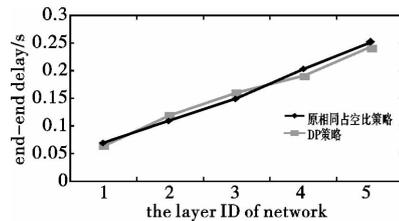


图2 延时状况比较曲线

延时状况的实验数据如图 3 所示,正如 2.3 节所证,DP 与相同占空比策略的延时相近。DP 策略中每层的节点延时并没有因其执行动态占空比策略而增大,故 DP 策略在保证了网络时延的前提下,可以大幅度提高网络的生命周期,这将在下一节实验中进行验证。

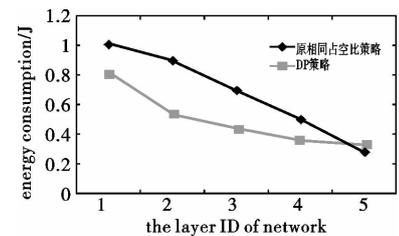


图3 能量消耗状况比较曲线

### 3.3 能量消耗状况分析

本实验是测量随着 PMRC 中节点所在层离 sink 的距离增大,其平均能量消耗变化的曲线图。其中最靠近 sink 的层编号为 1,以此类推,其最外层 ID 为 5。

能量消耗是传感器节点的射频模块所消耗的能量,是根据

无线收发器分别处于发送、接收和睡眠状态所用时间计算出来的。平均能量的计算公式如式(5)所示。

由图3可以看出,当节点处于离sink较近的层时,即层ID为1~4时,改进后DP策略较原相同占空比协议在平均能量消耗方面有着较明显的改善。这是由于最外层能量消耗相对较少,为了平衡能耗,如式(6),内层节点采用动态占空比,减少了不必要的空闲侦听时间,从而接收外层数据所消耗的能量与其相邻外层的能耗相近。

DP策略中,节点在最外层时因其执行动态占空比,平衡能耗,其占空比最大,所以能耗较原相同占空比的能量消耗稍大。

综上所述,DP策略中各层节点的能量消耗在图中表现较为均衡,有效缓解了能量洞问题,从而延长了网络的生命周期。

#### 4 结束语

本文基于PMRC模型研究传感器网络的能量洞问题。首先分析了WSN中的节点由于发送和接收数据的网络流量平均负载,发现其负载随着离sink距离的减小而增大。根据这个分析,提出DP策略,为不同的节点分配不同的占空比。这个策略不仅减少了空闲侦听的能量消耗,而且平衡了整个网络的能量消耗,它对网络生命周期的延长有其重要作用。另外,网络生命周期在没有牺牲端到端延迟的情况下得到了延长。仿真结果验证了DP策略较原策略相比在不同层之间达到了更优的能量平衡。

#### 参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU Wei-lian, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.* A survey on sensor networks[J]. *IEEE Commun Mag*,2002, 147(2):102-114.
- [2] LIU An-feng, WU Xiao-you, CHEN Zhi-gang, *et al.* Research on the energy hole problem based on unequal cluster-radius for wireless sensor networks[J]. *Comput Commun*,2010, 33(3): 302-321.
- [3] WADAA A, OLARIU S, WILSON L, *et al.* Training a wireless sensor network[J]. *Mobile Networks and Applications*,2005, 10(1-2): 151-168.
- [4] LI Qiao-gin, YANG Mei, WANG Hong-yan, *et al.* Minimum overlapping layers and its variant for prolonging network lifetime in PMRC-based wireless sensor networks[C]//Proc of the 6th IEEE Consumer Communications & Network Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009.
- [5] HEINZALMEN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHMAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2002, 1(4):660-670.
- [6] MEDIDI M, ZHOU Y. Extending lifetime with differential duty cycles in wireless sensor networks[C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2007:1033-1037.
- [7] OLARIU S, STOJMENOVIC I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoid energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Communications. Washington DC: IEEE Communication Society, 2006:1-12.
- [8] 石为人, 黄河, 鲜晓东, 等. OMNET++与NS2在无线传感器网络仿真中的比较研究[J]. *计算机科学*,2008, 35(10):53-57.
- [9] Castalia. A simulator for WSN[EB/OL]. (2011-03-30)[2011-04-10]. <http://castalia.npc.nicta.com.au/>.
- [10] PHAM N, PEDIADITAKIS D, BOULIS A. From simulation to real deployments in WSN and back[C]//Proc of World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Piscataway: IEEE Press, 2007:1-6.
- [11] 冯友宏, 关可. 基于OMNET的无线传感器网络算法的改进[J]. *传感技术学报*,2010, 23(6):859-862.