

基于簇首轮替的高密度无线网状传感器网络中能耗 均衡休眠调度方案

吴琼¹ 范菁^{1,2} 张翠¹ 郝俊锋¹

(云南民族大学电气信息工程学院 昆明 650031)¹ (昆明理工大学冶金与能源工程学院 昆明 650093)²

摘要 将无线传感器网络和无线网状网络相结合构建了无线网状传感器网络拓扑结构,将部分传感器设为休眠状态可以降低高密度无线网状传感器网络中的能量消耗,并且均衡网络能耗可以解决能量空洞问题。提出了一种基于簇首轮替的无线网状传感器网络能耗均衡的休眠调度方案。通过建立簇首轮替的能耗模型,得到在不同传感器轮流担当簇首的条件下网络能耗均衡时传感器的休眠概率。分析和仿真结果表明,相比较随机调度方案,该方案保证了网络覆盖范围,延长了网络生存时间,均衡了网络的能耗。

关键词 无线网状传感器网络,能耗均衡,簇首轮替,休眠调度

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Balanced-energy Sleep Scheduling Scheme Based on Alternating Cluster-head in High-density Wireless Mesh Sensor Networks

WU Qiong¹ FAN Jing^{1,2} ZHANG Cui¹ HAO Jun-feng¹

(School of Electrical and Information Engineering, Yunnan University of Nationalities, Kunming 650031, China)¹

(School of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)²

Abstract Wireless Mesh Sensor Networks(WMSN) topology structure was constructed by combining Wireless Sensor Networks with Wireless Mesh Networks. Energy consumption in the high-density WMSN could be decreased by putting the partial sensor nodes into sleeping state and the energy holes problem could be solved by balancing the network energy consumption. This paper proposed a balanced-energy sleeping scheduling scheme based on alternating cluster head nodes in WMSN. The sleeping probability of sensor nodes in balanced-energy network was obtained by building cluster head alternating model when different sensor nodes took turns to be cluster head. Analytical and simulation results show that the scheme assures the network coverage, extends the lifetime and balances the energy consumption compared with Randomized Scheduling scheme.

Keywords WMSN, Balanced-energy, Alternating cluster-head, Sleep scheduling scheme

1 引言

无线传感器网络^[1,2] (wireless sensor networks, WSN)是由部署在监测区域内大量传感器节点组成,以协作方式感知、采集和处理网络覆盖范围内特定的信息,以无线多跳自组织方式形成的网络系统。由于可广泛地应用于军事目标跟踪、自然灾害预测、医疗健康监控和恶劣环境勘探等领域,无线传感器网络已经在世界范围内引起了极大的关注。无线网状网络^[3,4] (wireless mesh networks, WMN)是一种与传统无线网络不同的新型无线网络技术,可以看成是 WLAN 和 Ad hoc 的融合,支持网状结构,具有自组网、自修复、多跳级联、节点自我管理、移动宽带、无线定位等优势,是一种大容量、高速率、覆盖范围广的网络。正是由于具有以上优势,WMN 被看

作解决无线接入“最后一公里”瓶颈问题的新方案。无线网状传感器网络^[5] (wireless mesh sensor networks, WMSN)是一种将 WMN 与 WSN 相结合,基于 WMN 原理对传统无线传感器分簇网络结构进行重构后的网络。它融合了 WMN 与 WSN 的优势,有效地解决了 WSN 的传输范围局限、计算存储能力有限和 WMN 的设备价格昂贵、安全隐患等问题。在 WMSN 中传感器节点的电源能量、计算能力和通信能力有限,因此研究相应机制以促进网络能量消耗的有效性、均衡性是延长网络生命的重要保障。

在 WMSN 中,如果传感器由 mesh 路由器直接控制,巨大的通信开销以及复杂、迟缓的网络管理将会使 WMSN 处理缓慢、能耗增加。相关研究者提出了分簇^[6],将近距离的传感器聚在一起形成簇的结构,某个传感器节点被选为簇首管

本文受国家自然科学基金项目(NSFC 60963026),国家民委科研项目(09YN05),云南省教育厅科学研究基金重点项目(09Z0051,08Z0051)资助。

吴琼(1986—),男,硕士,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:wq123_@126.com;范菁(1976—),女,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、无线网状网络;张翠(1985—),女,硕士,主要研究方向为串口通信协议;郝俊锋(1986—),男,硕士,主要研究方向为无线传感器网络。

理簇并且负责簇和 mesh 路由器之间的通信。分簇为数据融合、协同工作、局部控制、能量节省提供了方便的网络结构。

传感器通常利用休眠技术来节省能量,当一个传感器节点置于休眠状态时,就完全处于不工作状态,只需要消耗非常小的能量用来计时唤醒。在 WSN 中,将簇中传感器轮流置为工作和不工作两种状态是延长网络生命周期的有效方法。一些研究者提出将大量的传感器置于簇内并且允许多余的传感器休眠来延长网络生存时间^[7]。在保证簇内传感器节点覆盖率的情况下,簇首如何选择簇成员进入休眠状态是一个关键问题。在随机调度方案^[8] (Randomized Scheduling, RS) 中,传感器被随机地选择进入休眠状态,簇中所有传感器都具有相同的休眠概率,但是边缘节点会消耗更多的能量。基于距离调度方案^[9] (Distance-based Scheduling, DS) 基于传感器与簇首的距离决定休眠概率,降低所有传感器的能量消耗,但是休眠概率和传感器与簇首的距离线性相关,而传输能耗至少和距离的二次方线性相关,传感器的能耗变动系数较大。RS 和 DS 方案会使一部分节点比其它节点消耗更多的能量而过早死亡,形成能量空洞^[10]。能量均衡调度方案^[11] (Balanced-energy Scheduling, BS) 选择休眠概率使得尽量多的节点消耗相同的能量,在保证覆盖范围的情况下延长网络生存时间,但是 BS 方案假设簇首位置几乎不变,由于簇首较簇成员消耗能量大,BS 方案会造成簇首过早死亡,簇无法正常工作。在 WMSN 中,由能量均衡协议 EBCS (energy-balanced cluster selection)^[12] 可以得到均衡的 mesh 路由器控制范围,并且每个 mesh 路由器生成一个簇头列表,指示控制范围内的节点轮流当选为簇首,使得每个 mesh 路由器控制范围内死亡节点的个数较均衡,均衡了网络能量消耗,但是没有考虑传感器的休眠调度,WMSN 能量有进一步的节省空间。在 WMSN 中既考虑了传感器的休眠调度,又实现了网络能耗均衡的应用研究成果尚未见成熟报道。

本文在基于 RS、BS 和 EBCS 的基础上,提出了一种在 WMSN 中基于簇首轮替的能耗均衡休眠调度方案 CHABS (Cluster Head Alternated energy Balanced Scheduling)。在一个 mesh 路由器控制范围内传感器轮流成为簇首,由 mesh 路由器计算并控制簇首不同时簇成员的休眠概率,使整个网络覆盖范围得到保证,网络能耗得到均衡,生命时间得到延长。

2 RS 方案和 BS 方案概述

文献[9]对 RS 方案和 BS 方案进行建模并分析性能。RS 和 BS 都是针对 WSN 中一个簇所设计的方案并且基于以下假设:a)簇内分布有足够多的传感器;b)簇首控制范围是一个静态圆形区域,簇首位于圆心。每个传感器在生存时间内属于一个簇;c)簇内成员单跳可达簇首,不考虑簇首能量消耗;d)传感器的发射功率可以自由调控;e)簇成员和簇首的距离是已知的;f)簇内传感器的分布符合均匀分布;g)所有传感器初始能量相等,每一轮处于工作状态的传感器消耗的能量是:

$$E_{active}(x) = lE_{dec} + l\xi_{fs}x^2 \quad (1)$$

式中, l 是传输数据大小, E_{dec} 为电路发射、接收每比特所需要消耗的能量, x 是传输距离, ξ_{fs} 为衰减参数。

在 RS 方案中,传感器节点被随机地选择。假设簇首控制的静态圆形区域的半径是 R ,休眠的节点占有所有节点的百

分比是 $\beta_s < 1$,则每轮每个传感器进入休眠状态的概率 $p = \beta_s$,因此每轮与簇首的距离为 x 的传感器的能耗期望是:

$$E_{RS}(x) = (1 - \beta_s)E_{active}(x), 0 \leq x \leq R \quad (2)$$

传感器与簇首的距离 x 的概率密度函数是:

$$f(x) = \frac{\partial[\Pr(X \leq x)]}{\partial x} = \frac{\partial[\frac{\pi x^2}{\pi R^2}]}{\partial x} = \frac{2x}{R^2}, 0 \leq x \leq R \quad (3)$$

每轮中传感器的能耗期望能够被计算为:

$$E_{RS} = \int_0^R (1 - \beta_s)E_{active}f(x)dx = (1 - \beta_s)(lE_{dec} + l\xi_{fs}\frac{R^2}{2}) \quad (4)$$

BS 方案能够解决 RS 方案能量消耗不均衡的缺陷,在 BS 方案中,为了使尽量多的传感器节点消耗能量相等,距离簇首 x 的簇成员节点的休眠概率 $p(x)$ 和能耗期望 $E_{BS}(x)$ 满足以下公式:

$$E_{BS}(x) = [1 - p(x)]E_{active}(x) = E_{BS}^*, x_b \leq x \leq R \quad (5)$$

E_{BS}^* 与距离 x 无关, x_b 确保了 $p(x) \geq 0$,令与簇首的距离小于 x_b 的传感器始终保持工作状态,因此就有:

$$p(x) = \begin{cases} 1 - \frac{E_{BS}^*}{E_{active}(x)}, & x_b \leq x \leq R \\ 0, & 0 \leq x < x_b \end{cases} \quad (6)$$

式中, E_{BS}^* 和休眠节点占有所有节点的比例 β_s 有关:

$$\int_0^R p(x)f(x)dx = \int_{x_b}^R (1 - \frac{E_{BS}^*}{E_{active}(x)}) \frac{2x}{R^2} dx = \beta_s \quad (7)$$

由式(7)可以确定 E_{BS}^* 和 β_s 的关系:

$$E_{BS}^* = \frac{R^2(1 - \beta_s) - x_b^2}{2 \int_{x_b}^R \frac{x}{lE_{dec} + l\xi_{fs}x^2} dx} \quad (8)$$

每轮中传感器的平均能耗能够被计算为:

$$E_{BS} = \int_0^{x_b} E_{active}(x) \frac{2x}{R^2} dx + E_{BS}^* \frac{R^2 - x_b^2}{R^2} \quad (9)$$

BS 方案可以很好地均衡网络的能量消耗。BS 和 RS 方案的前提是簇首固定在圆心不变动,并且不考虑簇首消耗的能量。然而在实际网络中,簇首不仅负责与簇成员、基站进行通信,而且还要完成数据融合等相关工作,消耗的能量比簇成员多,这会造成簇首过早死亡,从而使整个网络无法正常工作。

3 WMSN 中簇首轮替的能量均衡休眠调度方案

基于 WSN 中的 BS 和 RS 休眠调度方案,设计 WMSN 中的基于簇首轮替的能耗均衡休眠调度方案 CHABS。直观上,当每轮传感器节点消耗一样的能量时,它们就会同时耗尽能量,并且不会产生由死亡节点造成的能量空洞。WMSN 中在传感器轮流担当簇首的情况下,mesh 路由器计算并控制每个簇成员的休眠概率,使得网络中每轮的能量消耗都近乎相等,达到网络能耗均衡的目的。由 EBCS 协议可以得到均衡的 mesh 路由器控制范围,因此只要一个 mesh 路由器控制范围内的能量消耗得到均衡,WMSN 的能量消耗就得到均衡。CHABS 是针对一个 mesh 路由器控制范围内设计的休眠协议。

CHABS 采用基于以下的前提假设:

a) 为了保证网络覆盖范围的前提下部分传感器能够进入休眠状态,在 mesh 路由器的控制范围内分布有足够多

的传感器节点。

b) mesh 路由器控制范围是一个静态的圆形区域, mesh 路由器位于圆心位置。

c) mesh 路由器控制范围内无线传感器轮流成为簇首, 无线传感器单跳可达簇首, 簇首单跳可达 mesh 路由器, 每个传感器在生存时间内属于一个簇。研究中不考虑 mesh 路由器和簇首的能量消耗。

d) 根据传感器与簇首的距离, 传感器的发射功率可以自由调控。

e) mesh 路由器和所有传感器间的距离是已知的, 并且任何两个传感器节点间的距离是已知的。

f) 在 mesh 路由器控制范围内的传感器节点的分布符合均匀分布。

g) 所有传感器初始能量相等, 每一轮处于工作状态的传感器消耗的能量如式(1)所示。

为了达到均衡网络能耗的目的, 不同传感器担当簇首时, 每个传感器的休眠概率应当如何计算是 CHABS 需要解决的问题。

用 n 表示 mesh 路由器控制范围内传感器的数目, $I=\{1, \dots, n\}$ 表示传感器节点的编号的集合, $i \in I$, a_i 表示编号为 i 的传感器, $a_1, a_2, \dots, a_n$ 轮流成为簇首, a_i 担当簇首时传感器平均休眠概率为 β_i , 簇成员与簇首的距离用 x 表示, x 的概率密度函数为 $f_i(x)$, 簇首与 mesh 路由器的距离为 r , 网络期望能耗是 E_i 。

网络期望能耗可以被计算为:

$$E_i = \int_0^{R+r} (1-\beta_i) E_{active}(x) f_i(x) dx \quad (10)$$

网络期望能耗 E_i 与 x 的概率密度函数 $f_i(x)$ 有关, 假设在圆形的 mesh 路由器控制范围内传感器的分布服从均匀分布, 则 $f_i(x)$ 可由以下过程来求解。

假设 Mesh 路由器的控制范围是半径为 R 的圆, mesh 路由器部署在圆心 O , 位于 O' 的传感器节点当选为簇首, 它与 mesh 路由器的距离 OO' 为 r , 在 mesh 路由器控制区域内传感器节点到簇首的距离小于 x 的面积为 S 。

当 $0 \leq x \leq R-r$ 时, 与簇首的距离小于 x 的分布区域如图 1 中阴影部分所示。

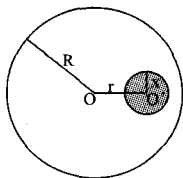


图 1 $0 \leq x \leq R-r$ 时与簇首的距离小于 x 的节点分布区域

阴影部分的面积 $S = \pi x^2$, 此时

$$f_i(x) = \frac{\partial [Pr(X < x)]}{\partial x} = \frac{\partial [\frac{\pi x^2}{\pi R^2}]}{\partial x} = \frac{2x}{R^2} \quad (11)$$

当 $R-r < x \leq R+r$ 时, 与簇首的距离小于 x 的分布情况如图 2 中阴影部分所示, 此时的阴影部分面积较复杂, 为了便于分析, 可将 S 分成两个弓形的面积来求。

在图 2 中, mesh 路由器位于圆心 O , R 是 mesh 路由器的传输距离, 圆 O 是 mesh 路由器的覆盖区域, 距离 mesh 路由器 r 的传感器 a_i 成为簇首, 簇首位于圆 O' , 在 mesh 路由器控

制范围内, 与簇首的距离小于 x 的传感器分布如图 2 中阴影部分所示, 即闭合区域 $ACBC'A$, 圆 O 和圆 O' 相交于 A, B 两点, 连接 AO, BO, AO', BO', OO' , 则 $AO=BO=R, AO'=BO'=x, OO'=r$, 用 ϕ_1 表示 $\angle AOB$, ϕ_2 表示 $\angle AO'B$, 面积 S 等于阴影部分的弓形 ACB 的面积加上弓形 $AC'B$ 的面积, 弓形 $AC'B$ 的面积用 S_1 表示, 弓形 ACB 的面积用 S_2 表示。

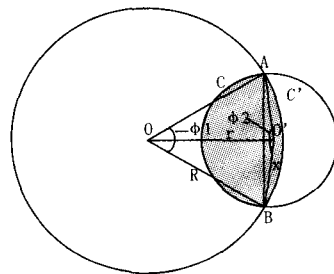


图 2 $R-r < x \leq R+r$ 时与簇首的距离小于 x 的节点分布区域分析图

在圆 O 中, S_1 等于弧形 $AC'B$ 的面积 $S_{AC'B}$ 减去三角形 AOB 的面积 $S_{\triangle AOB}$, 即:

$$S_1 = S_{AC'B} - S_{\triangle AOB} \quad (12)$$

由面积公式可得:

$$S_{AC'B} = \frac{1}{2} \phi_1 R^2 \quad (13)$$

再根据正弦定理, 可以得到 $S_{\triangle AOB}$:

$$S_{\triangle AOB} = \frac{1}{2} R^2 \sin \phi_1 \quad (14)$$

其中 $\phi_1 = 2\angle AOO'$, 由余弦定理可得:

$$\angle AOO' = \arccos\left(\frac{R^2 + r^2 - x^2}{2Rr}\right) \quad (15)$$

所以:

$$\phi_1 = 2\arccos\left(\frac{R^2 + r^2 - x^2}{2Rr}\right) \quad (16)$$

将式(13), 式(14), 式(16)代入式(12)可得:

$$S_1 = R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R^2 + r^2 - x^2}{2Rr}\right) - \frac{R^2 + r^2 - x^2}{4r} \sqrt{4R^2 r^2 - (R^2 + r^2 - x^2)^2} \quad (17)$$

同理可得 S_2 :

$$S_2 = x^2 \cos^{-1}\left(\frac{x^2 + r^2 - R^2}{2xr}\right) - \frac{x^2 + r^2 - R^2}{4r} \sqrt{4x^2 r^2 - (x^2 + r^2 - R^2)^2} \quad (18)$$

由式(17), 式(18)可得:

$$S = R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R^2 + r^2 - x^2}{2Rr}\right) - \frac{R^2 + r^2 - x^2}{4r} \sqrt{4R^2 r^2 - (R^2 + r^2 - x^2)^2} + x^2 \cos^{-1}\left(\frac{x^2 + r^2 - R^2}{2xr}\right) - \frac{x^2 + r^2 - R^2}{4r} \sqrt{4x^2 r^2 - (x^2 + r^2 - R^2)^2} \quad (19)$$

此时就可以得到 x 的概率密度函数:

$$f_i(x) = \frac{\partial [Pr(X < x)]}{\partial x} = \frac{\partial [S]}{\partial x} = \frac{1}{\pi R^2} \left((2x \arccos \frac{x^2 + r^2 - R^2}{2xr}) - \frac{x}{r^2} \sqrt{4x^2 r^2 - (x^2 + r^2 - R^2)^2} + \frac{x \sqrt{4R^2 r^2 - (R^2 + r^2 - x^2)^2}}{r^2} \right) \quad (20)$$

综上所述:

$$f_i(x) = \begin{cases} \frac{2x}{R^2}, & x \leq R-r \\ \frac{1}{\pi R^2} \left((2x \arccos \frac{x^2+r^2-R^2}{2xr}) - \frac{x}{r^2} \sqrt{4x^2r^2 - (x^2+r^2-R^2)^2} + \frac{x \sqrt{4R^2r^2 - (R^2+r^2-x^2)^2}}{r^2} \right), & R-r < x \leq R+r \end{cases} \quad (21)$$

由不等式法则易知,在一个固定的圆形区域中,圆内所有点到圆心的平均距离是最短的。由式(1)可知,传感器的传输能耗与传输距离的2次方成正比。因此,当簇首在圆心时, mesh 路由器控制区域内传感器的平均能量消耗是最小的。假设当簇首在圆心时 mesh 路由器控制区域内进入休眠状态的传感器的比例是 β , 由 RS 方案可知,单个传感器能耗期望是:

$$E_C = \int_0^R (1-\beta_i) E_{active} f_c(x) dx \quad (22)$$

传感器与簇首的距离 x 的概率密度函数是 $f_c(x) = \frac{2x}{R^2}$ 。

当传感器轮流成为簇首时,为了确保每轮消耗的能量都等于最小值,令 $E_i = E_C$, 即:

$$\int_0^{R+r} (1-\beta_i) E_{active}(x) f_i(x) dx = \int_0^R (1-\beta_i) E_{active} f_c(x) dx \quad (23)$$

从而可以解得:

$$\beta_i = 1 - \frac{(1-\beta_i)(IE_{dec} + l_{fs} \frac{R^2}{2})}{\int_0^{R+r} (IE_{dec} + l_{fs} x^2) f_i(x) dx} \quad (24)$$

假设 $j \in I$, 用 $p_{ij}(x)$ 表示传感器 α_i 当选为簇首时传感器 α_j 的休眠概率, 用 $E_{CHABS}^{(i)}(x)$ 表示与簇首 α_i 的距离为 x 的传感器的能量消耗, 为了均衡能量消耗, 传感器的能量消耗应该不随 x 的变换而变化, 即:

$$E_{CHABS}^{(i)}(x) = [1-p_{ij}(x)] E_{active}(x) = E_{CHABS}^{(i)}, \quad x_l \leq x \leq R+r \quad (25)$$

式中, $E_{CHABS}^{(i)}$ 与 x 无关, 由于 $E_{active}(x)$ 是 x 的非递减函数, 下界 x_l 是为了保证 $p_{ij}(x) \geq 0$ 。接近簇首的节点消耗的能量不会和其它节点相等, 但是由式(1)可得它们消耗的能量比其它节点要少, 所以对整个网络能耗均衡的影响不是很大。令与簇首的距离小于 x_l 的传感器始终保持工作状态, 则有:

$$p_{ij}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{E_{CHABS}^{(i)}}{E_{active}(x)}, & x_l \leq x \leq R+r \\ 0, & 0 \leq x < x_l \end{cases} \quad (26)$$

在式(26)中, $E_{CHABS}^{(i)}$ 的值和 β_i 有关:

$$\int_0^{R+r} p_{ij}(x) f_i(x) dx = \int_{x_l}^{R+r} (1 - \frac{E_{CHABS}^{(i)}}{E_{active}(x)}) f_i(x) dx = \beta_i \quad (27)$$

由式(27)可以计算出 $E_{CHABS}^{(i)}$:

$$E_{CHABS}^{(i)} = \frac{\int_{x_l}^{R+r} f_i(x) dx - \beta_i}{\int_{x_l}^{R+r} \frac{f_i(x)}{E_{active}(x)} dx} \quad (28)$$

另一方面, 由于 x_l 保证 $p_{ij}(x) \geq 0$ 并且由式(26)可知, $p_{ij}(x)$ 随着 x 的增加而增加, 假设 $p_{ij}(x)$ 是 x 的连续函数, 则有:

$$p_{ij}(x=x_l) = 1 - \frac{E_{CHABS}^{(i)}}{E_{active}(x_l)} = 0 \quad (29)$$

从而可以求出 x_l :

$$x_l = \sqrt{\frac{E_{CHABS}^{(i)} - lE_{dec}}{l_{fs}}} \quad (30)$$

由式(26), 式(28), 式(30)可以求得 $p_{ij}(x)$:

$$p_{ij}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{\int_{x_l}^{R+r} f_i(x) dx - \beta_i}{(IE_{dec} + l_{fs} x^2) \int_{x_l}^{R+r} \frac{f_i(x)}{E_{active}(x)} dx}, & x_l \leq x \leq R+r \\ 0, & 0 \leq x < x_l \end{cases} \quad (31)$$

在 WMSN 中, mesh 路由器负责计算 $p_{ij}(x)$ 并且控制传感器的休眠。由于在传感器 α_i 担当簇首时, 传感器 α_j 的休眠概率 $p_{ij}(x)$ 计算较为复杂, CHABS 方案不适用于计算能力有限的网络, 比如 WSN 和 Ad-hoc 网络。

4 仿真与结果分析

仿真场景采用 500 个节点随机均匀分布在半径为 40 的圆形 mesh 路由器控制区域, 节点交替轮流成为簇首, 簇成员向簇首发送数据, 休眠传感器的平均比例 $\beta = 0.4$ 。

本文采用 MATLAB 分别对 RS 和 CHABS 方案进行仿真, 并对协议的性能进行了对比分析, 包括网络覆盖范围、存活节点分布和存活节点比例。

4.1 网络覆盖范围

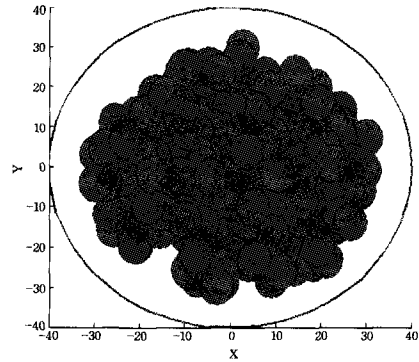


图3 RS方案中有50%节点死亡时存活节点的覆盖范围

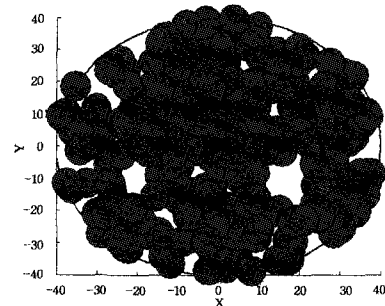


图4 CHABS方案中有50%节点死亡时存活节点的覆盖范围

图3和图4示出 RS 和 CHABS 方案中有 50% 节点死亡时存活节点的覆盖范围。假设传感器的传感半径是 4, 图中

传感器的覆盖范围用半径为 4 的实心圆表示,在图 3 中,RS 方案存活节点集中在靠近圆心的区域,造成只能覆盖与圆心有一定距离的区域,图 4 中,CHABS 方案存活节点分布较均匀,即使有 50% 的节点死亡时仍然可以覆盖几乎整个圆形区域。CHABS 方案的网络覆盖情况优于 RS 方案。

4.2 存活节点分布

图 5 和图 6 分别示出 RS 和 CHABS 方案中有 50% 节点死亡时存活节点的分布。图中圆圈表示存活的节点,实心点表示死亡的节点。在图 5 中,RS 方案中所有存活的传感器在圆形区域的分布靠近圆心,这是因为 RS 方案中纯随机的休眠调度方式使得远离圆心的传感器消耗能量较大,造成只有靠近圆心部分的传感器依然存活。图 6 中,CHABS 方案中存活节点和死亡节点的分布较平均,因此 CHABS 方案中存活的传感器能够比 RS 方案更好地覆盖整个圆形区域。

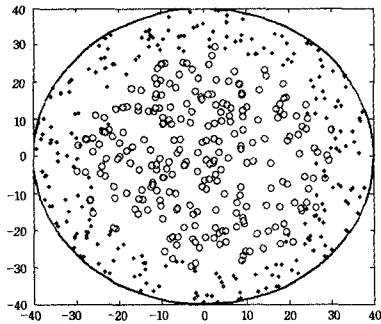


图 5 RS 方案中有 50% 节点死亡时存活节点的分布

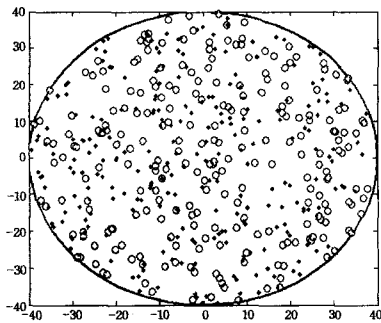


图 6 CHABS 方案中有 50% 节点死亡时存活节点的分布

4.3 存活节点比例

图 7 中 RS 方案在 1923 轮时第一个节点死亡,在 2731 轮时节点全部死亡。本文提出的 CHABS 方案在 2198 轮时第一个节点死亡,在 2500 轮时节点全部死亡。CHABS 方案相比 RS 方案延长了第一个死亡节点的时间,网络中传感器节点几乎同时死亡,网络中的能量消耗更加均衡。

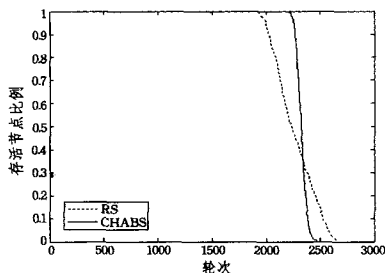


图 7 存活节点比例

结束语 本文提出在高密度 WMSN 中基于簇首轮替的能耗均衡休眠调度方案 CHABS。其通过建立簇首轮替的能耗模型,得到不同传感器担当簇首时传感器的休眠概率,由 mesh 路由器负责计算并调控传感器进入休眠状态,保证了网络覆盖范围,均衡了网络的能量消耗,延长了网络生命周期。通过仿真实验将 CHABS 和 RS 进行对比,验证了 CHABS 方案在保证网络覆盖范围的基础上使得网络的生命周期延长了约 20%,网络的能量消耗得到了均衡。

参考文献

- [1] Younis M, Akkaya K. Strategies and techniques for n-node placement in wireless sensor networks A survey[J]. Ad-hoc Networks, 2008, 6: 621-655
- [2] Tang Jian, Hao Bin, Sen A. Relay node placement in large scale wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2006, 29: 490-501
- [3] Ekram E, Leung K K. 无线 Mesh 网络架构与协议[M]. 易燕, 李强, 刘波, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009
- [4] 方旭明, 等. 下一代无线因特网技术: 无线 Mesh 网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007
- [5] Fan Jing, Yin Shi-tang, Wu Qiong, et al. Study on Refined Deployment of Wireless Mesh Sensor Network[C]//International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Chengtu; IEEE, July 2010: 1-5
- [6] Heinzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2002, 1(4): 660-670
- [7] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Adaptive energy-conserving routing for ad hoc networks[J/OL]. Research Report 527. URL <http://www.isi.edu/johnh/PAPERS/Xu00a.html>, 2000
- [8] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//Proc. of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York; IEEE, June 2002: 1567-1576
- [9] Deng J, Han Y S, Heinzelman W B, et al. Scheduling sleeping nodes in high density cluster-based sensor networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2005, 10(6): 825-835
- [10] 王东方, 齐小刚. 无线传感器网络解决能量空洞问题综述[J]. 计算机科学, 2010, 37(12): 18-21
- [11] Deng J, Han Y S, Heinzelman W B, et al. Balanced-energy Sleep Scheduling Scheme for High Density Cluster-based Sensor Networks[C]//Proc. of the 4th Workshop on Applications and Services in Wireless Networks. Boston; IEEE, 2005, 28: 1631-1642
- [12] Wu Qiong, Fan Jing, Zhang Cui, et al. An Energy Consumption Balance Tactics in Wireless Mesh Sensor Network Based on Topology Controlling[C]//International Conference on Future Information Technology. Changsha; IEEE, Dec. 2010, 1: 370-374