

线性 WSNs 能耗均衡的非均匀网络部署方案^{*}汪全涛¹ 李珂¹ 胡斌² 李志文¹

(1.国网陕西省电力公司检修公司 西安 710065; 2.国网陕西省电力公司 西安 710048)

摘要: 针对线性无线传感器网络中存在能量空洞的问题,给出一种线性无线传感器网络能耗均衡的非均匀网络部署方案。该方案证明了除距离 Sink 节点最远的子监测区域之外,剩余子监测区域从远到近使其传感器节点数量呈等比递增时可实现网络能耗均衡,同时需随机部署足够数量的中继传感器节点用于转发数据。经实测数据仿真表明,所提方案能有效地解决能量空洞问题,使得线性无线传感器网络可以实现均衡能耗的目的,且能够大大延长网络的寿命,对于提高实际线性无线传感网络的性能具有重要意义。

关键词: 线性无线传感器网络;非均匀部署;能耗均衡;能量空洞

中图分类号: TN99 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

Non-uniform deployment scheme of energy consumption equilibrium in linear wireless sensor networks

Wang Quantao¹ Li Ke¹ Hu Bin² Li Zhiwen¹

(1.State Grid Shanxi Electric Power Overhauling Company, Xi'an 710065, China;

2.State Grid Shanxi Electric Power Company, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the problem of energy hole in linear wireless sensor networks, a non-uniform deployment scheme of energy consumption equilibrium in linear wireless sensor network is proposed. The scheme proves that in addition to the sub-monitoring area furthest from the Sink node, the remaining sub-monitoring area can achieve network energy consumption balance when the number of sensor nodes in it increases equally from far to near, and a sufficient number of relay sensor nodes need to be randomly deployed to forward data. The simulation results show that the proposed scheme can effectively solve the problem of energy hole, make the linear wireless sensor network can achieve the goal of balanced energy consumption, and greatly extend the life of the network, which is of great significance for improving the performance of the actual linear wireless sensor network.

Keywords: linear wireless sensor networks; non-uniform deployment; energy consumption equilibrium; energy hole

0 引言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)是一种针对特定应用环境进行信息收集的网络,其由大量传感器节点按照自组织网络组成^[1-2]。因为无线传感器网络中传感器节点是自带电池供电,且其通信传输带宽及信息处理能力均是有限的,所以对无线传感器网络提出了高效率与低能耗的使用要求^[3-5]。然而,由于距离无线传感器网络较远的传感器节点需要通过 Sink 节点邻近的传感器节点进行数据中继传输,所以 Sink 节点邻近的传感器节点能耗要比网络中其他传感器节点的能耗大,这也就导致了 Sink 节点邻近的传感器节点将会更快失效,减少了整个无

线传感器网络的网络寿命,行业内把这种现象称之为“能量空洞”^[6-7]。尽管能量空洞会造成网络无法工作,但此时网络中其他节点却依然有接近 90% 的总能量剩余^[8]。如果监测区域仍需要无线传感器网络继续实施监测,则需要重新部署新的无线传感器网络,但这无疑将会成倍地增加成本代价。所以有效克服能量空洞的关键技术已经成为业界研究的热点^[9-10]。能量空洞问题极可能会导致传统传感器节点部署方案无法满足工程中无线传感器网络的实际要求,当前国内外学者和专家针对这一热难点问题进行了较多研究^[11-13]。文献[14]提出了一种基于矢量的无线传感器网络能量均衡部署方案,可以较为有效地降低无线传感网络系统的建设成本。文献[15]提出了一种基于蚁群优化的无

线传感器网络建设方案,可以很好地解决无线传感器网络中的能量空洞问题,同时可以有效延长无线传感器网络的寿命。文献[16]提出了一种非均匀情况下的无线传感器网络布置方案,并且给出了传感器节点最优通信传输半径的解决方案。这些方案从一定程度上给出了各种无线传感器网络能量空洞的解决方法,而且通过分析可知这些方案均具有一定的可行性。

线性无线传感器网络^[17]的应用场景主要有河流、隧道、管道、公路及电力线路等方面,主要用于监测环境变量或者线路参数。但是由于线性无线传感器网络的监测区域均是狭长型的,所以相比于大面积类型的无线传感器网络,线性无线传感器网络的传感器节点部署方案具有其自身的特殊性。而且往往单个传感器节点的有效通信距离很小,因此线性无线传感器网络所监测的区域可近似地看作是直线型的。本文根据线性无线传感器网络的特点,给出一种线性无线传感器网络能耗均衡的非均匀网络部署方案(non-uniform deployment scheme of energy consumption equilibrium in linear wireless sensor networks, NUDECE)。该方案针对网络中不同的监测区域,以 Sink 节点为中心点且采用限制传感器节点数量的方式,使得传感器节点的数量从远到近按照等比数列递增,同时在网络中随机部署一定数量的中继传感器节点用于转发所收集的数据。实测数据仿真结果表明,NUDECE 方案不仅可以有效避免能量空洞,而且还能大幅延长网络寿命,能较好地应用在实际的线性无线传感器网络中。

1 网络模型

本文的 NUDECE 方案是在监测区域处于一条直线上的线性无线传感器网络,其网络模型如图 1 所示。模型中标有黑色圆点“●”的代表普通传感器节点或中继传感器节点,整个网络监测区域分成多个不同的子监测区域,且每个子监测区域中的传感器节点数不一样,距离 Sink 节点越近的子监测区域部署的监测传感器节点数量越多;反之,距离 Sink 节点越远的子监测区域部署的监测传感器节点则越少。令图 1 中所有传感器节点的通信半径都是 r ,如果监测区域的范围超出了传感器节点的通信半径,为了实现监测区域的全部覆盖,模型中距离 Sink 节点最远的子监测区域范围需小于 $2r$ 。在实际工程应用中,线性无线传感器网络的监测区域内通常要采用多个 Sink 节点进行中继传输通信,而且要求 Sink 节点处于监测区域的中心位置,所以在模型中仅取网络中某一个方向上的监测区域中传感器节点部署情况来进行研究,其他方向上的监测区域传感器节点部署情况按此类推进行部署^[18]。

2 NUDECE 方案设计

NUDECE 方案的主要思路是将整个线性无线传感器网络监测区域分为多个子监测区域,且在不同的子监测区

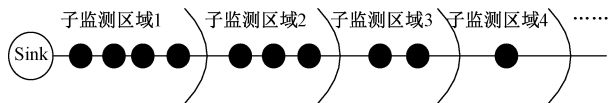


图 1 NUDECE 方案的线性无线传感器网络模型

域中要严格限制传感器节点的数量,整个网络以 Sink 节点为中心,使每个子监测区域的传感器节点数量从远到近按照等比数列递增,同时在网络中随机部署一定数量的中继传感器节点用于转发所收集的数据。假设需采用 Sink 节点进行中继传输的子监测区域总共为 n 个,且要求同一个子监测区域中的传感器节点配置必须是完全一样的。假定 B_i 表示每个子监测区域中的节点数量,且 $1 \leq i \leq n$,且 B_i 只表示子监测区域中普通传感器节点的数量(不包含中继传感器节点的数量)。普通传感器节点主要用于采集所在监测区域的信息,同时也用于发送与接收其他传感器节点传递的信息;而中继传感器节点主要是用于传输普通传感器节点收集到的信息,并不用于采集所在监测区域的任何信息。令 E_i 表示在第 i 个子监测区域中全部传感器节点单位时间内所需的能耗, e_1 表示单个传感器节点发送单位比特数据时所需的能耗, e_2 表示传感器节点接收单位比特数据时所需的能耗。假定网络中全部传感器节点的初始能量都是 δ ,单个传感器节点单次能够发送的数据长度是 v bit。则单位时间内在第 n 个子监测区域中,普通传感器节点的能耗 E_n 计算如式(1)所示:

$$E_n = B_n v e_1 \quad (1)$$

线性无线传感器网络中其他子监测区域的普通传感器节点,一方面要转发来自距离 Sink 节点较远子监测区域采集的数据,另一方面要发送本监测区域所产生的数据。其他子监测区域中单个普通节点的能耗 E_i ,其计算如式(2)所示:

$$E_i = v \left[\sum_{k=i+1}^n B_k (e_1 + e_2) + B_i e_1 \right] \quad (2)$$

式中: $1 \leq i \leq n-1$ 。由于中继传感器节点只有在转发数据时才消耗能量,故中继传感器节点的能耗相对于普通传感器节点较小,可以忽略不计。无线传感器网络中所有传感器节点的能量不可能同一时间用完,如果要想实现网络能量最优化以及网络寿命最大化,通常都是通过采用多对一的通信传输模式来完成^[19-20]。因此,线性无线传感器网络如果想要实现能耗均衡,主要考虑除了最远子监测区域之外剩下的全部子监测区域的能耗均衡问题,使得节点能耗同时达到最大值,实现网络寿命的最大化,但此时距离 Sink 节点最远子监测区域中的传感器节点尚剩余很多能量。NUDECE 方案即是指除距离 Sink 节点最远的子监测区域之外,剩余的子监测区域从远到近,其传感器节点的数量如果是呈等比数列递增即可实现网络能耗均衡。具体的证明方法主要采用演绎法来实现,即证明在除去第 n 个子监测区域外,其余 $(n-1)$ 个子监测区域的传感器节

点数量从远到近依次按照等比系数 q 进行递增,其中第 n 个子监测区域与第 $(n-1)$ 个子监测区域区域的比值为 $1/q-1$ 。

其中线性无线传感器网络的网络寿命数学表示形式如下式(3)所示:

$$\frac{B_i \delta}{E_i} = \frac{B_{i+1} \delta}{E_{i+q}}, 1 \leq i \leq n-2 \tag{3}$$

由以上公式可得到式(4):

$$\frac{B_i}{B_{i+1}} = \frac{\sum_{k=i+1}^n B_k}{\sum_{k=i+2}^n B_k} > 1 \tag{4}$$

将式(4)改写即可得到式(5):

$$\frac{B_i}{B_{i+1}} = \frac{B - \sum_{k=1}^i B_k}{B - \sum_{k=i}^{i+1} B_k} = \frac{B - \sum_{k=1}^{i-1} B_k}{B - \sum_{k=i}^i B_k} =$$

$$\frac{B_{i-1}}{B_i} > 1, 2 \leq i \leq n-2 \tag{5}$$

线性无线传感器网络中内部子监测区域的传感器节点数量如式(6)所示:

$$\sum_{k=j}^{n-1} B_k = \frac{B_{n-1}(q^{n-j}-1)}{q-1}, q > 1, 1 \leq j \leq n-1 \tag{6}$$

线性无线传感器网络距离 Sink 节点最远的子监测区域中其传感器节点数量如式(7)所示:

$$B_{n-1} = (q-1)B_n \tag{7}$$

将式(6)代入式(5)则可得:

$$\sum_{k=j}^{n-1} B_k = B_n(q^{n-j}-1) \tag{8}$$

由此可得:

$$\sum_{k=j}^n B_k = B_n q^{n-j} \tag{9}$$

根据式(4)的右边等式可知:

$$\frac{\sum_{k=i+1}^n B_k}{\sum_{k=i+2}^n B_k} = \frac{B_n q^{n-(i+1)}}{B_n q^{n-(i+2)}} = q = \frac{B_i}{B_{i+1}} \tag{10}$$

由式(10)可以看出式(4)右边等于其左边,由上述证明可知,除了距离 Sink 节点最远的子监测区域之外,剩余子监测区域的传感器节点数量从远到近呈等比递增时即可实现网络能耗均衡。假定线性无线传感器网络部署中的每个传感器节点均设置一个固定的 ID 标识,且所有普通传感器节点的 ID 标识采用的是由远及近的递增排序方法,但中继传感器节点的 ID 标识采用的排序方式不一样,这主要因为中继传感器节点只用于转发数据,所以中继传感器节点的数量没有严格的限制,只要整个监测区域内有足够的中继传感器节点,就可以保证整个网络有效地实现能耗均衡,其中整个监测区域的中继传感器节点都是随机地部署在线性无线传感器网络中的。

3 性能仿真分析

实验所用仿真平台为 NS-228,采用的通信协议是 802.11 DCF,设置的带宽为 1 Mb/s,单个传感器节点的初始能量均是 0.5 J,传感器节点发送数据所需能耗是 0.69 W,传感器节点接收数据所需能耗为 0.51 W,所有传感器节点的通信传输距离均是 50 m(包括普通传感器节点和中继传感器节点),传输的数据包大小均是 1 000 bit,整个网络中包含的传感器节点数量是 81 个(其中不包括中继传感器节点的数量),其中距离 Sink 节点最远子监测区域中的传感器节点数量是 3 个,且等比系数的取值是 3,得到的最终结果都是 50 次实验后的平均值。仿真验证主要比较 NUDECE 方案与随机非均匀节点部署方案以及均匀节点部署方案的性能。其中,随机非均匀节点部署方案是指不限制网络中传感器节点的数量,但需确保在越接近 Sink 节点的子监测区域,部署在其内的传感器节点密度则相对越大,越是远离 Sink 节点的子监测区域,部署在其内的传感器节点密度则相对越小;均匀部署方案是指在整个网络监测区域中,所部署的传感器节点密度都基本保持相同。仿真主要分析比较 3 种方案在网络寿命与网络剩余能量比(网络中的剩余能量与网络的初始总能量的比值则称为网络剩余能量比)方面的性能。

下面给出随着网络监测区域长度增加,NUDECE 部署方案、随机非均匀节点部署方案与均匀节点部署方案的网络寿命比较,如图 2 和表 1 所示。

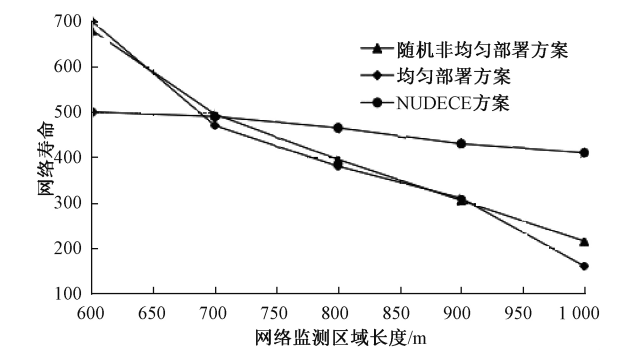


图 2 3 种方案的网络寿命比较

表 1 3 种方案的网络寿命比较

网络监测 区域长度/m	网络寿命/h		
	随机非均匀 部署方案	均匀部署 方案	NUDECE 方案
600	680	700	500
700	495	470	490
800	395	380	465
900	305	310	430
1 000	215	160	410

由图 2 可以看出,NUDECE 方案整体性能比较稳定,在监测区域长度增加的前提下,网络寿命基本保持不变;但是随机非均匀节点部署方案与均匀节点部署方案的网络寿命则发生了较大幅度的下降,这将会极大地限制线性 WSNs 在工程中的实际应用,所以 NUDECE 方案具有更好网络寿命性能。由表 1 可以看出,在网络监测区域长度为 600 m 时,虽然采用 NUDECE 方案的网络寿命只有 500 h,但是随着网络监测区域长度的增加,NUDECE 方案的网络能耗较少。当网络监测区域长度增加到 1 000 m 时,采用 NUDECE 方案的网络寿命仍然有 410 h;而采用随机非均匀节点部署方案与均匀节点部署方案的网络寿命分别只有 215 h 和 160 h。由此可见,采用 NUDECE 方案在网络监测区域长度增加的情况下仍然可以保持较长的网络寿命,因此采用 NUDECE 方案可以有效解决能量空洞问题,使网络寿命不会因能量空洞影响而急速降低。

下面给出随着网络监测区域长度增加,NUDECE 方案、随机非均匀节点部署方案与均匀节点部署方案的网络剩余能量比较,如图 3 和表 2 所示。

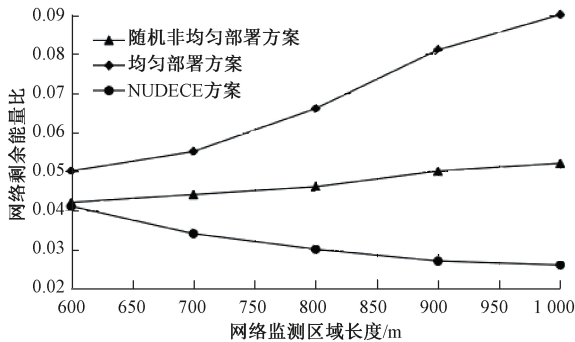


图 3 3 种方案的网络剩余能量比比较

表 2 3 种方案的网络剩余能量比比较

网络监测 区域长度/m	网络剩余能量比		
	随机非均匀 部署方案	均匀部署 方案	NUDECE 方案
600	0.042	0.050	0.041
700	0.044	0.055	0.034
800	0.046	0.066	0.030
900	0.050	0.081	0.027
1 000	0.052	0.090	0.026

由图 3 可知,监测区域的范围在不断增大的过程中,NUDECE 方案的网络剩余能量比趋于 0,这表明 NUDECE 方案的网络可以一直工作到剩余能量趋于耗资殆尽,全部传感器节点都基本处于失效的状态,也即整个网络的能耗均衡。然而随机非均匀节点部署方案与均匀节点部署方案的网络剩余能量比却是不断增大的,这也就说明整个网络中的剩余能量也是增大的,有很大可能是由于能量空洞造

成的,所以 NUDECE 方案具有更好的网络剩余能量比。由表 2 可以看出,在网络监测区域长度为 600 m 时,虽然采用 NUDECE 方案的网络剩余能量比为 0.041,但随着网络监测区域长度的增加,NUDECE 方案的网络剩余能量比稳步降低;而采用随机非均匀节点部署方案与均匀节点部署方案的网络剩余能量比却比较高。当网络监测区域长度增加到 1 000 m 时,采用 NUDECE 方案的网络剩余能量比为 0.026,而采用随机非均匀节点部署方案与均匀节点部署方案的网络剩余能量比分别为 0.052 和 0.090。这说明采用 NUDECE 方案可以充分利用各传感器节点的能量,当几乎所有单个传感器节点的能量耗尽时,网络才无法工作,而当线性无线传感器网络采用随机非均匀节点部署方案或均匀节点部署方案时,当网络无法工作时却仍然有较多的剩余能量未使用,造成了大量能量浪费,即存在能量空洞使网络能耗不均衡,因此采用 NUDECE 方案能够有效避免能量空洞,使整个网络的能耗更加均衡,传感器节点的能量利用率较高。

4 结 论

线性无线传感器网络中的能量空洞问题导致了网络寿命的大幅降低,这一问题严重制约了线性无线传感器网络在工程中的实际应用。为了有效地避免能量空洞,给出了一种 NUDECE 方案。该方案指出除距离 Sink 节点最远的子监测区域外,剩余子监测区域从远到近其传感器节点数量呈等比递增时可实现网络能耗均衡,并给出了具体证明过程。仿真实验分析表明,NUDECE 方案可以实现线性无线传感器网络能耗均衡的目的,且能有效避免能量空洞现象,同时也大大延长了线性无线传感器网络的寿命,可以应用于实际的线性无线传感器网络,具有较大的实际应用价值。下一步主要对线性无线传感器网络数据收集方案进行研究,包括提升数据传输路由安全性和降低数据传输所需能量消耗两方面,进一步提升线性无线传感器网络的性能。

参考文献

[1] 刘志坤,刘忠,夏清涛,等. 基于网格划分的无线传感器网络多重覆盖算法[J]. 火力与指挥控制, 2013, 39(11): 80-83,88.

[2] 戴国勇,苗春雨,毛科技,等. 一种基于中继节点的线性无线传感器网络数据收集 MAC 协议[J]. 传感技术学报, 2014, 27(7): 939-947.

[3] LI Y, YU N, ZHANG W Y, et al. Enhancing the performance of LEACH protocol in wireless sensor networks[C]. 2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops. IEEE, 2011: 223-228.

[4] LI F, LI Y, ZHAO W L, et al. An adaptive coordinated MAC protocol based on dynamic power management for wireless sensor networks [C].

- International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, 2006: 1073-1078.
- [5] HU L, LI Y, CHEN Q B. A new energy-aware routing protocol for wireless sensor networks[C]. 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007: 2444-2447.
- [6] 张人上, 曲开社. 基于双簇头网格调度的 WSNs 能量空洞缓解[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(10): 133-136.
- [7] 杨宛南, 陈志刚, 赵明. 基于不平等簇半径分簇的无线传感器网络能量空洞避免[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 1137-1142.
- [8] 余欢, 刘群. 基于异构的无线传感器网络能量洞缓解研究[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(7): 2261-2266.
- [9] 苏兵, 许文慧. 无线传感器网络自适应路由的能量空洞抑制研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(2): 536-538.
- [10] 吴玉成, 谢璐. 分布式能量高效的 WSN 非均匀分簇路由多跳算法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 196-200.
- [11] 王达山, 黄刘生, 徐宏力, 等. 基于矢量的无线传感器网络能量有效配置算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(4): 626-635.
- [12] 宋超, 刘明, 龚海刚, 等. 基于蚁群优化解决传感器网络中的能量洞问题[J]. 软件学报, 2009, 20(10): 2729-2743.
- [13] 张萃玲, 陈志刚, 刘安丰, 等. 非均匀部署 WSN 的能量空洞避免策略[J]. 计算机工程, 2010, 36(2): 83-86.
- [14] LI Y, ZHU X, LIAO C, et al. Energy efficiency maximization by jointly optimizing the positions and serving range of relay stations in cellular networks[J]. IEEE Transaction Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2551-2560.
- [15] CAO B, GE Y, KIM C W, et al. An experimental study for inter-user interference mitigation in wireless body sensor networks[J]. IEEE Sensor Journal, 2013, 13(10): 3585-3595.
- [16] LI Y, CELEBI H, DANESHMAND M, et al. Energy efficient femtocell networks: challenges and opportunities [J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(6): 99-105.
- [17] 王楠, 孟庆丰. 节点位置固定的线性无线传感器网络节能路由[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(11): 2087-2093.
- [18] 陆客中, 刘应玲. 一种线型无线传感器网络的节点布[J]. 计算机应用, 2007, 27(7): 1566-1568.
- [19] 吴小兵, 陈桂海. 线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题[J]. 计算机学报, 2008, 31(2): 253-261.
- [20] LI Y, LIAO C, WANG Y, et al. Energy-efficiency optimal relay selection in cooperative cellular networks based on double auction[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2015, 14(8): 4093-4104.

作者简介

汪全涛, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能变电站技术、继电保护与自动化。

E-mail: chunhuaw0801@163.com

李珂, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能变电站技术、继电保护与自动化。

E-mail: sheweic0703@163.com