

基于网络效率的线性无线传感器网络优化部署算法

刘安丰 聂红伟 吴贤佑 肖志东 陈志刚

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘要 基于多跳的无线传感器网络,靠近 sink 的传感器节点因需要转发更多的数据,其能量消耗较多,从而在 sink 周围形成“能量空洞”。采用更符合实际的单位部署成本的网络寿命,即网络效率作为优化目标。在仅已知网络规模和节点感知半径 r 的情况下,如何通过有效的节点部署来避免“能量空洞”并使网络效率最大,是一个极具挑战性的研究课题。提出了一种高效节点部署算法,求解出了最优工作节点数、最佳中继节点部署方案、最优节点传输距离。理论分析与模拟实验结果表明,算法不仅能够避免“能量空洞”,而且相对于已有均匀与非均匀算法都能有效提高网络效率,因此该算法对构建低成本无线传感网络应用系统具有重要意义。

关键词 无线传感器网络,能量空洞避免,网络效率,多目标优化,节点部署

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Optimization Deployment Algorithm for Network Efficiency of Linear Wireless Sensor Networks

LIU An-feng NIE Hong-wei WU Xian-you XIAO Zhi-dong CHEN Zhi-gang

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract In a multi-hop wireless sensor network (WSN), the sensors closest to the sink tend to deplete their energy faster than other sensors, which is known as an energy hole around the sink. This paper employed the unit deployment cost of the network life, network efficiency, which is more reasonable and is our optimization goal. It is a challenging research that how to avoid energy hole and maximize network efficiency by effective node deployment when we just know the scale of the network and the sense radius of the node. This paper gave an algorithm of effective node deployment and worked out the best number of work node, the best deployment approach of relay node, the optimal node transmission distance. The algorithm not only be able to avoid energy hole, and also effectively improve network efficiency, compared with the uniform deployment algorithm and the non-uniform deployment algorithm. Therefore, the algorithm is of great significance for the application of constructing low-cost wireless sensor networks.

Keywords Wireless sensor networks, Avoid energy hole, Network efficiency, Multi-objective optimization problem, Sensor placement

1 引言

线性网络广泛地应用在交通线、石油、天然气、水管道等领域。需要监测区域的边界线,如战场前沿、国境线、疫区边界线。而在平面以及层次无线传感器网络中,数据收集所形成的路由路径也可以认为是一种线性网络,因此高效的线性网络部署算法具有广泛的应用。

有关研究表明,由于 sink 附近的节点需要中继远方节点的数据,因而其能量消耗比其它节点要高,从而 sink 附近的节点加快死亡,导致远方节点数据不能传送到 sink,这种现象叫做“能量空洞”现象^[1-3]。有关研究指出,能量空洞形成后,网络中剩余的能量高达 90%^[4]。因此,如何充分利用网络能量,延长网络寿命,提高网络的能量利用率,具有重要的应用

前景与实际价值。

本文研究的是基于节点的部署来避免能量空洞。研究的基础是基于:文献[5,6]研究了在一个线性网络中,由于近 sink 的节点需要传输所有远方节点的数据,故传送的数据量多,因此让近 sink 的节点间的距离较小,这样发送单位数据所消耗的能量小。而远离 sink 的节点承担的数据量少,故部署节点时,其间距较大,这样发送单位数据所消耗的能量大。总体上来看就能够让所有节点在一次数据收集过程中消耗的能量相等,最终使所用的节点几乎同时死亡,这样就能提高节点的利用率。文献[6]还着重研究了能量利用效率的节点部署策略,它认为传感器网络最重要的目标就是在有限的成本下得到最大的网络寿命,因此定义优化的目标为单位成本所产生的网络寿命。第 n 个节点依不同的概率将数据发给前面

到稿日期:2008-12-15 返修日期:2009-03-05 本文受教育部创新团队(IRT0661),国家自然科学基金(60773012);基于网络演算理论的无线 Mesh 网络性能分析研究,中国博士后科学基金(20060400886),湖南省科技计划资助。

刘安丰(1971—),男,博士后,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、面向服务计算;聂红伟(1985—),男,硕士研究生,主要研究方向为传感器网络;吴贤佑(1985—),男,硕士研究生,主要研究方向为传感器网络;肖志东(1985—),男,硕士研究生,主要研究方向为传感器网络;陈志刚(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为分布式处理与网络计算。

$(n-1)$ 个节点($n \geq 2$),并使所有节点消耗的能量相等。文献[6]发现,当 n 很少时,得到最佳部署方案是可能的。但随着 n 逐渐增大,计算的复杂性将成几何倍数增加,那么此时求出最优解是不可能的。此时文献[6]提出一种近似的求解方案,即让每一个节点的数据以百分之百的概率传给前一个节点,而通过节点间部署距离不同来做到节点间的能量消耗均衡。该文最后将线性网络中的思想扩展到一个矩形平面网络中。

文献[7]提出了一种基于矢量的中继节点放置算法。该算法在感应源节点位置和中继节点数给定的情况下,通过有效放置中继节点的位置得到整个网络的能量有效配置,但源节点位置是确定的,没有考虑源节点数目与放置位置不定的情况。

但在文献[5-7]中都基于如下的假设:节点的感知范围 r 无穷大,因而在文献[5,7]中,节点的感知距离居然达到了数千千米的情况。显然,实际中传感器节点的感知距离达到数千千米是不现实的。而且在这些研究中,近 sink 区域节点间的距离很小,那么近 sink 的区域的监测节点过多,所采集的数据有太多的冗余,而远离 sink 的节点间相距很大^[5,6],一旦两点间的距离 $>2r$,那么就存在监测空白。所以此类研究虽然具有理论上的指导意义,但其实践指导意义受限。本文针对以上情况,对线性网络按照实际情况进行优化部署研究:在线性的监测区域长度为 L 的网络上,节点的感知距离为 r 的情况下,在保证网络任意点都被监测到的情况下,如何使所需传感器节点的数量最少。本文通过引入单位部署成本的网络寿命——网络效率作为目标优化的目标。经过深入研究提出了一种基于能量效率的高效节点部署算法,在只给出网络规模和节点感知距离 r 的情况下求出了最优部署下工作节点的个数、最佳的中继节点部署和最优的节点传输距离。理论分析与模拟实验结果表明,算法不仅能够做到全网能量消耗均衡,避免“能量空洞”,而且能够最大化网络效率。

2 网络模型与问题描述

2.1 网络模型

2.1.1 网络结构模型及相关定义

考虑一个由 n 个随机部署的传感器节点形成的线性网络,其应用场景为周期性的数据收集。用 s_i 表示第 i 个节点,相应的节点集合为 $S = \{s_1, s_1, \dots, s_n\}$, $|S| = n$ 。假设传感器具有以下性质:

(1)所有节点都是同构的,每个节点都有一个唯一的标识(ID),每一个节点在一个周期内产生 l bit 数据,并且都需要发送到基站 sink。

(2)根据接收者的距离远近,节点可以自由调整其发射功率以节约能量消耗。例如,Berkeley Motes 节点具有 100 个发射功率等级^[8,9],数据传送时不考虑冲突和重传。

(3)节点的初始能量为 E_0 ,能量主要消耗在发送与接收数据,相比于发送与接收数据,感知数据所消耗的能量可以不计^[10],但工作节点的感知距离一定,设为 r 。

(4)网络中的节点按其工作性质可以分为两类:中继节点是只传输数据但不感知数据的传感器节点,即不产生数据只传输数据的节点;工作节点是在网络中既传输数据又感知数据的传感器节点。

网络模型的第 1 项是一般数据收集无线传感器网络的典

型设置^[9]。第 2 项的节点具有不同的发射功率等级,保障节点根据不同的需要而调整发射功率,有利于节省能量,提高网络寿命。第 3 项是对监视区域的实际描述。第 4 项是为了在节点密集的区域减少冗余数据的采集量而将部分节点只中继数据而不再产生数据,既符合实际而又能够节省能量。

下面是本文用到的两个重要定义。

定义 1(网络寿命) 网络中第一个节点死亡的时间^[3]。

定义 2(网络效率) 网络寿命与总节点数的比值,即单位节点所带来的网络寿命。

2.1.2 能量消耗模型

采用典型的能量消耗模型^[1],发送数据的能量消耗见式(1),接收数据的能量消耗见式(2)。

$$\begin{cases} E_{\text{member}} = lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{fs}d^2, & \text{if } d < d_0 \\ E_{\text{member}} = lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{\text{amp}}d^4, & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_R(l) = lE_{\text{elec}} \quad (2)$$

其中, E_{elec} 表示发射电路损耗的能量。若传输距离小于阈值 d_0 ,功率放大损耗采用自由空间模型;当传输距离大于等于阈值 d_0 时,采用多路径衰减模型。 ϵ_{fs} , ϵ_{amp} 分别为这两种模型中功率放大所需的能量。节点接收 l 比特的数据消耗的能量如式(2)所示。以上参数的具体设置取自文献[1],如表 1 所列。

表 1 网络参数

Parameter	Value
Threshold distance (d_0) (m)	87
E_{elec} (nJ/bit)	50
ϵ_{fs} (pJ/bit/m ²)	10
ϵ_{amp} (pJ/bit/m ⁴)	0.0013
E_{dl} (nJ/(bit. signal))	5
Initial energy (J)	0.5

2.2 问题描述

综上所述,本文的线性网络节点部署问题可以描述为:设网络的规模为 L ,节点感知距离为 r ,问题如下:如何确定工作节点的个数 n_w 、中继节点的个数以及如何放置这些节点,使网络达到如下的目标:1)任意两个工作节点间的距离小于 $2r$,第 1 个工作节点离基站的距离和最后 1 个工作节点离边界的距离都小于 r ,以保证网络中任意区域都被监测覆盖;2)所有节点的能量消耗均衡,即避免能量空洞;3)网络效率最高。因为每部署一个节点都需要一定的成本,故节点的个数就代表了成本。因为网络效率定义为单位节点所带来的网络寿命,因此其实际意义为单位部署成本所带来的网络寿命。因此,网络效率最高就是在部署网络时以最少的成本带来最大的网络寿命,这与文献[6]的目标是一致的。

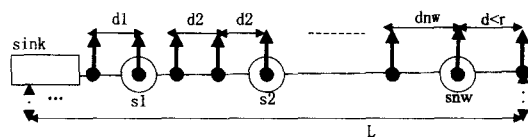


图 1 线性网络节点部署图

图 1 给出了线性网络的一种部署方案。图中实心点表示中继节点,圆圈带实心表示工作节点。这样在部署节点时的原则应该做到近 sink 区域的节点间距离较短,而远离 sink 的区域节点间距离较长,且任意工作节点间的距离 $<2r$ 。

3 线性网络的优化部署算法

3.1 线性网络的优化目标描述与分析

在图 1 的网络模型中, 设 s_i 表示第 i 个工作节点, s_{n_w} 表示第 n_w 个工作节点, 它是离基站最远的工作节点。 d_i 表示第 i 个工作节点的传输距离及第 i 个工作节点和第 $i-1$ 个工作节点之间的中继节点传输距离。因为这些中继节点传输的数据和第 i 个工作节点传输的数据相同, 所以它们传输距离也相同, 都为 d_i 。传输距离表示传输给下一个节点的距离, 下一个节点可能是工作节点, 也可能是中继节点。如图 1, s_1 工作节点与 s_2 工作节点间的中继节点的传输距离为 d_2 , 同时 s_2 传输给下一个节点也为 d_2 。 $m[i]$ 表示第 i 和第 $i-1$ 个工作节点间中继节点的个数 ($i=2, 3, \dots, n_w$), $m[1]$ 表示第一个工作节点与基站间中继节点的个数。为了保证线性网络在感知距离为 r 的情况下覆盖整个网络, 第一个工作节点离基站的距离小于或等于 r , 邻近工作节点间的距离不超过 $2r$, 最后一个工作节点离边界的距离应在 $(0, r)$ 的范围内。所以节点的部署位置就应满足如下的约束条件:

$$\begin{cases} (m[1]+1) \times d_1 \leq r \\ (m[i]+1) \times d_i \leq 2r & i=2, 3, \dots, n_w \\ 0 \leq l - \sum_{i=1}^{n_w} (m[i]+1) d_i \leq r \end{cases} \quad (3)$$

除了节点部署的位置应该满足上式外, 节点的能量消耗还应该均衡, 以使得网络效率最高。下面分析网络节点间的能量消耗情况。首先线性网络中第 i 个工作节点传输的数据量 t_i 可以为

$$t_i = il \quad (4)$$

线性网络中第 i 个工作节点接收的数据量 r_i 可以为

$$r_i = (i-1)l \quad (5)$$

为避免能量空洞, 所有节点在一次数据收集过程中消耗的能量都相等, 最终使所有的节点几乎同时死亡, 以及根据式 (1), (2), (4), (5), 有

$$\begin{cases} E = E_1 = E_2 = \dots = E_{n_w} \\ E_i = t_i E_{\text{elec}} + t_i e_{fs} d_i^2 + r_i E_{\text{elec}}, & \text{if } d_i < d_0 \\ E_i = t_i E_{\text{elec}} + t_i e_{\text{amp}} d_i^4 + r_i E_{\text{elec}}, & \text{if } d_i > d_0 \end{cases} \quad (6)$$

进一步得到

$$\begin{cases} E = E_1 = E_2 = \dots = E_{n_w} \\ E_i = (2n-2i+1)lE_{\text{elec}} + (n-i+1)le_{fs}d_i^2, & \text{if } d_i < d_0 \\ E_i = (2n-2i+1)lE_{\text{elec}} + (n-i+1)le_{\text{amp}}d_i^4, & \text{if } d_i > d_0 \end{cases} \quad (7)$$

由式 (7) 可推导出 d_{n_w} 与 d_i 的关系

$$\begin{cases} d_i = \sqrt{(E_{\text{amp}} d_{n_w}^4 - (2n-2i)E_{\text{elec}}) / ((n-i+1)E_{fs})}, & \text{if } d_i < d_0 \\ d_i = \sqrt[4]{(E_{\text{amp}} d_{n_w}^4 - (2n-2i)E_{\text{elec}}) / ((n-i+1)E_{\text{amp}})}, & \text{if } d_i > d_0 \end{cases} \quad (8)$$

由式 (8) 开根号要大于 0, 所以有

$$d_{n_w} > \sqrt[4]{(2n-2)E_{\text{elec}}/E_{\text{amp}}} \quad (9)$$

根据文献, 网络寿命 Γ_{life} 为

$$\Gamma_{\text{life}} = E_0 / E \quad (10)$$

所以, 网络效率 u 为

$$u = \Gamma_{\text{life}} / (\sum_{i=1}^{n_w} m[i] + 1) \quad (11)$$

节点部署的目的就是要找出最佳工作节点个数 n_w^* 、最佳的节点传输距离 $d^* = \{d_1, d_2, \dots, d_{n_w}\}$ 、最佳的中继节点部署 $\{m[1], m[2], \dots, m[n_w]\}$ 、中继节点总数 $n_r^* = \sum_{i=1}^{n_w} m[i]$, 使网

络利用效率最大。这是一个目标优化问题, 可表述为

$$\{n_w^*, d^*, n_r^*\} = \arg \max_{n_w, d, n_r} u \quad (12)$$

定义 3 (多目标优化问题)^[10] $d^* = \{d_1, d_2, \dots, d_{n_w}\}$ 使得满足 m 个不等式约束

$$g_i(d^*) \leq 0, i=1, 2, \dots, m \quad (13)$$

以及 p 个等式

$$h_i(d^*) = 0, i=1, 2, \dots, p \quad (14)$$

需要优化的向量函数为

$$f(d^*) = [f_1(d^*), f_2(d^*), \dots, f_k(d^*)]^T \quad (15)$$

其中, 向量 $d^* = \{d_1, d_2, \dots, d_{n_w}\}$ 是该向量函数的决定向量。

定理 1 求解最佳节点传输距离 d^* 是一个多目标优化问题。

证明: 采用类比分析法来证明。如果本文的问题与定义 3 类比后是同样的问题, 那么它也是一个多目标优化问题。因为定义中的不等式约束式 (13) 与前面的式 (3) 相对应。等式约束式 (14) 与式 (7) 对应, 由式 (10) 和式 (11) 可知, 向量函数 $u(d^*)$ 是由 $\{m[1], m[2], \dots, m[n_w]\}$ 和 E 决定的。而根据式 (7) 可知, E 是由 d^* 决定的。同样地, 求出了 d^* 就能求出 $\{m[1], m[2], m[n_w]\}$, 所以 $\{m[1], m[2], \dots, m[n_w]\}$ 也是由 d^* 决定的。所以总的说来, 向量函数 $u(d^*)$ 是由 d^* 决定的, 即式 (12) 是由 d^* 决定的。这就证明了定义中的式 (15) 与式 (12) 相对应。因此, 求解最佳的节点传输距离 d^* 是一个多目标优化问题。定理得证。

推理 1 求解最佳的节点传输距离 d^* 是一个 NP 难问题。

证明: 因为根据文献 [12] 可知多目标优化问题 (MOP) 是 NP 难问题, 而定理 1 已证明了求解最佳的节点传输距离 d^* 是一个多目标优化 (MOP) 问题, 所以求解最佳的节点传输距离 d^* 是一个 NP 难问题。

由于 NP 难问题难以用数学公式算出最终结果, 因此本文采用算法来近似求解最大网络效率 u 。

3.2 线性网络部署优化算法

由于精确求解本文的线性网络优化问题是一个比较难的问题, 因此本文提出了一种近似求解算法。算法的思路是, 当工作节点个数 n_w 和最后一个工作节点传输距离 d_{n_w} 已知时, 就能够根据式 (8) 计算出传输距离序列 $\{d_1, d_2, \dots, d_{n_w}\}$, 这样就知道各个节点的传输距离。其中, 第 i 个工作节点按 d_i 来将数据传输给下一个节点。这下一个节点可以是中继节点, 也可以是工作节点。第 i 个工作节点和第 $(i-1)$ 个工作节点间的中继节点按 d_i 来将数据传输给下一个节点。因为这些中继节点和第 i 个工作节点传输的数据一样多, 要使它们消耗的能量一样多, 只需它们传输的距离相同。此时, 我们只是确定节点按多远的距离来传输数据, 各个工作节点间的中继节点数目没求出来, 节点的位置还没确定。

我们是从后往前求中继节点数目的。先求 $m[n_w]$, 再求 $m[n_w-1]$, 一直求下去。最初所有的中继节点数都赋值为 0。现在假设 $m[n_w], m[n_w-1], \dots, m[i+1]$ 已求出来, 接着要计算中继节点数 $m[i]$ ($i=n_w, n_w-1, \dots, 1$) (如图 2 所示)。由于第 i 个工作节点之后的中继节点数目 $m[n_w], m[n_w-1], \dots, m[i+1]$ 已经求出, 并且各个节点的传输距离已求出, 所以第 i 个工作节点之后已确定的传输距离为

$$\text{countDis} = \sum_{j=i+1}^{n_w} d_j (m[j]+1) \quad (16)$$

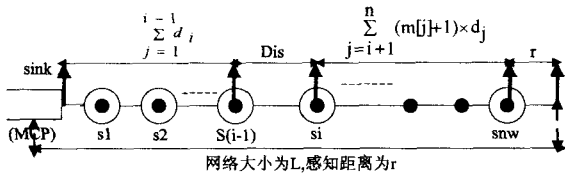


图2 中继节点个数 m_i 计算示意图

在第 i 个工作节点前有 $(i-1)$ 个工作节点, 这 $(i-1)$ 个工作节点至少需要 $reDis$ 长的距离来部署它们, 即

$$reDis = \sum_{j=1}^{i-1} d_j \quad (17)$$

而最后一个工作节点离边界的距离为 r , 这样我们确定的节点数目最少, 则第 i 个工作节点与第 $(i-1)$ 个工作节点间的距离就为

$$Dis = L - \sum_{j=1}^{i-1} d_j - \sum_{j=i+1}^{n_w} d_j \times (m[j]+1) - r \quad (18)$$

如果 $Dis > 2r$, 因为两工作节点间的距离不能超过 $2r$, 故 $m[i] = \lfloor 2r/d_i \rfloor - 1$ (19)

同时, $Dis > 2r$ 还说明了第 $(i-1)$ 和第 $(i-2)$ 之间需要部署中继节点, 所以我们就要接着求 $m[i-1]$ 。

如果 $Dis < 2r$, 则有

$$m[i] = \lceil Dis/d_i \rceil - 1 \quad (20)$$

再检查 $m[i]$ 是否满足

$$(m[i]+1) \times d_i < 2r \quad (21)$$

如果不满足, 则 $m[i] = m[i] - 1$ 。比如 $Dis = 190$, $r = 100$, $d_i = 60$, 按照式(21), $m[i] = \lceil 190/60 \rceil - 1 = 3$, 但是如果再计算 $(3+1) \times 60 = 240 > 200$, 不满足式(18), 那么 $m[i] = m[i] - 1$, 继续求 $m[i-1]$ 。如果满足式(18), 则计算结束, $\{m[1], m[2], \dots, m[n]\}$ 就求出来了。

节点传输距离和中继节点数求出来之后, 就可以部署节点了, 从头开始部署 (如图1所示)。中继节点总数 $n_r = \sum_{i=1}^{n_w} m[i]$, 利用式(7), 式(10)和式(11)求出这种情况下的网络效率 u 。

在前面, 如果已知 d_{n_w} 和 n_w , 一定可以得到一个网络效率 u 。如果是对 n_w 和 d_{n_w} 进行穷举 (因为 n_w 和 d_{n_w} 在某个范围内, 所以穷举是有可能的), 那么必能得到一个最大的网络效率 u^* , 这时 u^* 所对应的就是最佳的工作节点个数 n_w^* 、最佳的中继节点部署 $\{m[1], m[2], \dots, m[n_w]\}$ 、最好的节点传输距离 $d^* = \{d_1, d_2, \dots, d_{n_w}\}$, 中继节点总数就为 $n_r^* = \sum_{i=1}^{n_w} m[i]$ 。这样得到算法1和算法2。

算法1 n_w 和 d_{n_w} 已知, 求网络利用率 u 。初始时 $m[i] = 0 (i=1, 2, \dots, n_w)$ 。

①根据式(7), 求出节点传输序列 $\{d_1, d_2, \dots, d_{n_w}\}$ 。

②如果 $\sum_{i=1}^{n_w} d_i > L$, 转至④; 如果 $\sum_{i=1}^{n_w} d_i < L$, 说明需要部署中继节点, 转至③。

③下面是求中继节点个数 $m[i] (i=n_w, n_w-1, \dots, 1)$ 的过程:

$$Dis = L - \sum_{j=1}^{i-1} d_j - \sum_{j=i+1}^{n_w} d_j (m[j]+1) - r$$

如果 $Dis > 2r$, 则 $m_i = \lfloor 2r/d_i \rfloor - 1, i=i-1$, 转至③; 否则 $m_i = \lceil Dis/d_i \rceil - 1$, 如果 $(m[i]+1) \times d_i > 2r$, $m[i] = m[i] - 1, i=i-1$, 转至③; 如果 $(m[i]+1) \times d_i < 2r$, 转至④;

④如果符合约束条件式(3), 则可以利用式(7), 求出每个节点在一次数据收集过程中的能量消耗 E , 再利用式(10)和式(11)求出这种节点部署下的系统利用率 u ; 如果不符合约束条件式

(3), 则说明给出的工作节点个数 n_w 不足以在满足能量均衡的情况下对整个网络进行覆盖监测, 则 $u=0$, 算法1结束。

算法2 对 n_w 和 d_n 进行遍历, 求最佳的 $\max_{n_w, d_{n_w}, m} u, n_w^*,$

$\{m[1], m[2], \dots, m[n_w]\}, d^* = \{d_1, d_2, \dots, d_{n_w}\}$

n_0 是根据 L 和 r 的大小而设置的一个常量, $\max_{n_w, d_{n_w}, m} u$ 初

值为0;

① n 从1一直递增到 n_0 , 每次递增1, 如果 $n > n_0$, 转至④, 否则转至②;

② d_n 从 $2r$ 一直递减到 $\sqrt{(2n-2)E_{elec}/E_{amp}}$ (见式(8)), 每次递减1, 如果 $d_n < \sqrt{2nE_{elec}/E_{amp}}$, 则转至①, 否则转至③;

③调用算法1, 求出利用率 u 。如果 $u > \max_{n_w, d_{n_w}, m} u$, 则 $\max_{n_w, d_{n_w}, m} u = u, n_w^* = n, d^* = \{d_1, d_2, \dots, d_{n_w}\}, m^* = \{m[1], m[2], \dots, m[n_w]\}$, 转至②。因此, 最后 n_w^*, d^*, m^* 分别为最佳的工作节点数、最佳的节点传输距离、最佳的中继节点部署, $\max_{n_w, d_{n_w}, m} u$ 就是最大利用率。

④算法2结束。

4 模拟实验

实验场景有如下两种。

第一种: 试验场景为 $L=1000\text{m}, r=200\text{m}$ 的线性网络, 旨在比较不同的工作节点数。假设每个周期、每个节点收集1比特数据。传感器节点的能量消耗特征如表1所列。

第二种: 试验场景为 $r=200\text{m}, L$ 从 1500m 到 4000m 范围内变化, 旨在比较3种策略。

1) 节点均匀部署策略: 节点均匀部署在线性网络中, 节点之间的距离、第一个节点离基站的距离和最后一个节点离边界的距离都相等, 以保证覆盖。

2) 非均匀无中继策略^[5]: 节点非均匀地部署在线性网络中, 节点之间无中继节点, 所有节点消耗的能量相等, 并且最后一个节点离边界的距离在 $(0, r)$ 之间, 以保证覆盖。

3) 非均匀有中继策略: 工作节点非均匀地部署在线性网络中。节点之间有中继节点, 所有节点消耗的能量相等并且最后一个节点离边界的距离在 $(0, r)$ 之间, 以保证覆盖。

4.1 第一种试验场景下的结果比较

不同工作节点数指标的比较如表2所列。

表2 不同工作节点数指标比较

工作节点数	3	4	5	6	7
比较指标					
最后一个节点传输距离	124	133	141	149	153
中继节点部署	0, 3, 2	0, 0, 2, 2	0, 0, 0, 2, 1	0, 0, 0, 0, 1, 1	0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1
总节点数	8	8	8	8	8
网络寿命	1399192	1094640	886784	723848	655840
网络效率	174899	136830	110848	90481	81980

图3是在 $L=1000\text{m}, r=200\text{m}$ 的线性网络中放置不同工作节点数时工作节点间的距离情况。从图3中可以发现, 当工作节点数为3时, 最后一个节点的传输距离最小, 网络传输的数据最少 (与工作数相同), 因此它消耗的能量也最小。而总共的节点数是相同的, 所以当工作节点数为3时, 网络效率是最高的, 在图7中也得到了证明。图4是中继节点的部署方案, 例如第2个红点位于坐标轴(2,3)上, 表示第2个工作节点和第1个工作节点间的中继节点数为3。而对应的坐标轴上(3,2)的红点表示第3个工作节点和第2个工作节点间的中继节点数为2。图5表示网络效率最高时的部署方案。

图6表示在不同工作节点下的网络寿命。图7表示在不同工作节点数下的网络效率,图7中工作节点数为1,2的网络效率为0,是因为当工作节点为1或2时,无论怎样部署中继节点和工作节点都不能覆盖整个网络,所以就设其网络效率为0。

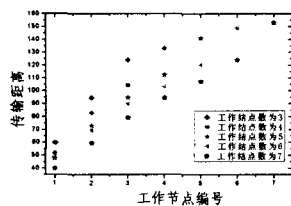


图3 不同工作节点时节点的传输距离

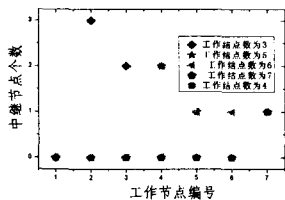


图4 不同工作节点时中继节点部署

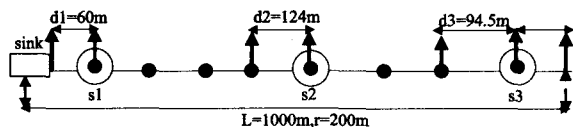


图5 $L=1000m, r=200m$ 时节点最佳部署方案

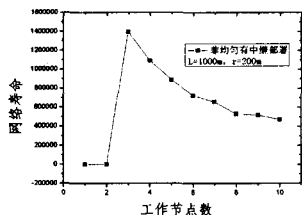


图6 不同工作节点数下的网络寿命

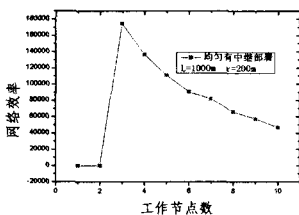


图7 不同工作节点数下的网络效率

4.2 第二种试验场景下的结果比较

通过实验数据得出了图8,图9和图10。从图8可看出,均匀部署和非均匀有中继部署的总节点数差不多,非均匀无中继部署的总节点数稍微少些,但非均匀有中继部署的工作节点数远远小于非均匀无中继节点数。由于在均匀部署的网络中,网络寿命是由第一个节点的寿命决定的。第一个节点由于要承担大量的数据转发,传输距离又与其它节点相同,因此其消耗的能量很大,容易死亡,所以采用均匀部署策略的网络寿命一般较短,网络效率也低,这从图9和图10得到了证明。与非均匀有中继部署策略相比,非均匀无中继部署策略中节点传输距离比较大,尤其是最后两个工作节点的传输距

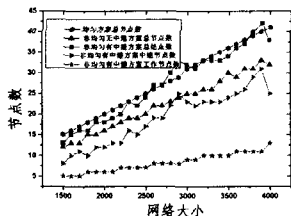


图8 最大网络效率时节点数比较

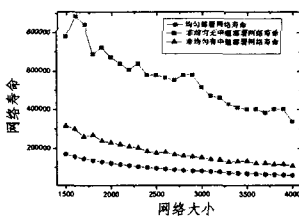


图9 最大网络效率时网络寿命比较

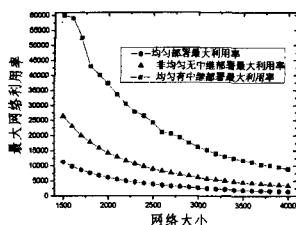


图10 最大网络效率比较

离很大^[18],传输总数据量也较多,所以其消耗的能量也较多,网络寿命较低,网络效率也较低,在图9和图10中得证。由此可见,不考虑节点的感知范围,让所有节点都工作,将产生大量的冗余数据,可能会浪费能量,存在一定的不合理性。

结束语 本文引进了一种新的网络性能测定指标——网络效率,即单位节点部署所带来的网络寿命。这种新的性能指标更加合理。在结合相关论文的基础上,提出了一种新的节点部署方案,在保证覆盖的前提下,在工作节点间增加中继节点并使所有节点消耗的能量相等。这种方案避免了不考虑节点的感知范围而让所有节点都工作,产生了大量冗余数据的问题,同时它减少了节点的传输距离,进一步减少了能量消耗。本文证明了求解最佳传输距离是 NP 难问题,也就说明了用数学公式求解出最大化网络效率是非常难的问题,因此提出了一种算法来求解最大网络效率。算法较好地解决了“能量空洞”现象,而且很好地提高了网络利用率。在本文中,我们主要是做了一维线性网络研究,准备在后面的研究中将一维网络推广到二维平面网络,最后推广到层次网络。

参考文献

- [1] 吴小兵,陈贵海. 无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
- [2] Olariu S, Stojmenovic I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting[C]// Proceedings of IEEE INFOCOM, Barcelona, Spain, 2006: 1-12
- [3] Li J, Mohapatra P. An analytical model for the energy hole problem in many-to-one sensor networks[C]// Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Dallas, TX, 2005: 2721-2725
- [4] 李建中,高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 1-15
- [5] Hossain A, Radhika T, Chakrabarti S, et al. An Approach to Increase the Lifetime of a Linear Array of Wireless Sensor Nodes [J]. Wireless Inf Networks, 2008, 15: 72-81
- [6] Chen Yunxia, Chuah Chen-Nee, Zhao Qing. Network configuration for optimal utilization efficiency of wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422
- [7] 王达山,黄刘生,徐宏力,等. 基于矢量的无线传感网络能量有效配置算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(4): 626-635
- [8] Lian J, Chen L, Naik K, et al. Modeling and enhancing the data capacity of wireless sensor networks[C]// Phoha S, La Porta T F, Griffin C. IEEE Monograph on Sensor Network Operations. IEEE Press, 2004
- [9] Soro S, Heinzelman W. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering[C]// Proceedings of the 5th International Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks. Denver, CO, 2005
- [10] Coello C A. Evolutionary multi-objective optimization and its use in finance[EB/OL]. <http://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/2006.html>, 2006
- [11] 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空洞问题[OL]. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3462.htm>, 2008
- [12] Mouzon G, Yildirim M B. Genetic algorithm to solve a multi-objective scheduling problem[C]// Eichhorn D M, ed. Proc. of the 3rd. Annual GRASP Symp. Wichita: Wichita State University, 2007: 45-46