

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.08.021

一种高效的无线传感器网络目标覆盖算法

吴锋

信阳农林学院 信息工程学院, 河南 信阳 464000

摘要: 针对无线传感网络寿命的最大化问题, 该文提出一种高效的无线传感器网络目标覆盖算法, 进一步提高能量高效覆盖率, 延长网络生存周期。该算法基于贪婪算法选择包含覆盖目标最多并且具有最高能量的传感器来寻找能量高效覆盖集, 从而最大化传感器网络的寿命, 跟踪传感器正在监控的目标数量以及剩余能量寻找信源到信宿的能量优化路径, 为感测数据提供可扩展的连通性。实验表明, 与通信加权贪婪覆盖(CWGC)算法和优化连接覆盖集启发式(OCCH)算法相比, 该文算法在平均网络寿命、覆盖时间和平均能耗方面均优于现有方法的性能, 能量优化路径和能量高效覆盖集可以明显增加网络寿命。

关键词: 无线传感网络; 目标覆盖; 最大化网络寿命; 覆盖集

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2022)08-0195-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



An Efficient Target Coverage Algorithm for Wireless Sensor Networks

WU Feng

School of Information Engineering, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang Henan 464000, China

Abstract: Aiming at the problem of maximizing the lifetime of wireless sensor networks, this paper presents an efficient target coverage algorithm for wireless sensor networks to improve the energy efficient coverage and prolong the lifetime of the network. This algorithm is based on the greedy algorithm to select the sensor that has the most coverage targets and the highest energy to find an energy-efficient coverage set, thereby maximizing the life of the sensor network, and tracking the number of targets being monitored by the sensor and the residual energy to find the energy-optimized path from the source to the sink to provide extensible connectivity for the sensing data. Experiments show that compared with CWGC algorithm and OCCH algorithm, the proposed algorithm outperforms existing methods in terms of average network life, coverage time, and average energy consumption. Energy optimized paths and energy efficient

收稿日期: 2021-09-22

基金项目: 河南省科技攻关项目(172102210450).

作者简介: 吴锋, 硕士, 副教授, 主要从事计算机及物联网技术研究.

coverage sets can significantly increase the lifetime of network.

Key words: wireless sensor networks; target coverage; maximize network lifetime; coverage set

无线传感器网络(Wireless sensor networks, WSN)是由传感器节点组成的分布式传感网络^[1-2],在安全监控、事件跟踪和目标检测等与监控相关的应用中起着至关重要的作用^[3].传感器包括通信、电源、传感3个单元.通信单元承担着通过空间传输和接收信息,电源单元负责向通信和传感单元有效地供电,感测单元感测预期信息.传感器网络的运行需要高效的算法来进行拓扑管理、多通道访问、本地化、连接和覆盖.由于WSN节点电池容量有限,如何有效地利用节点能量成为WSN研究的热点之一.传感器节点通常需要以延长网络寿命的方式进行编程^[4-5],通常采用间歇的休眠方式保存节点能量^[6].将整个区域划分为多个覆盖集,每个覆盖集监视所有目标,在保证能检测目标节点的前提下,仅一个传感器节点覆盖区域处于活动模式,其余传感器节点可以处于休眠模式^[7],从而节省能量.

连通性用来解决从源传感器到汇聚节点传递感知数据的问题.如果网络中每对节点间至少有一条路径,则称传感器网络是连接的.在单跳网络中传感器直接与中心节点/基站通信,如果传感器不能直接到达汇聚节点,则需要多跳中继,传感器可以作为中继转发数据^[8].连通性受到拓扑修改、节点丢失等的影响.网络连通性是无线传感器网络必不可少的重要服务质量,在网络的整个生命周期中,传感器应该在彼此的传输半径内^[9].

在保证网络节点覆盖率和连通性的同时延长网络寿命是WSN需要解决的主要问题,学者们已经对延长网络寿命进行了研究.针对目标覆盖,各种优化算法用以提升WSN的性能,如优先级、部分覆盖的优化.文献[10]提出基于优先级的具有可调整感知范围的目标覆盖方法,该算法选择最合适的感应范围和传感器方向满足所有目标的覆盖质量要求,并最大化网络寿命.文献[11]提出一种基于学习自动机来实现睡眠调度方法的新算法,用来解决连续监视感兴趣区域的部分覆盖问题.文献[12]提出基于贪婪的部分覆盖算法使用选定节点的邻居节点来保留选定节点的连通性,同时使用节点之间的重叠来达到所需的覆盖率,具有较高的能源效率.但是,现有的WSN目标覆盖算法忽略了寻找最小可能跳数路径,并优化路径损耗的问题,导致能力覆盖率和网络生存周期具有进一步提升的空间.

在研究了现有WSN目标覆盖算法的基础上,为了进一步提高能量高效覆盖率,延长网络生存周期,本文提出一种高效的无线传感器网络目标覆盖算法来解决WSN的寿命优化问题.该算法首先为每个传感器找到距汇聚节点的最小跳跃距离,随后所有目标覆盖传感器都将各自具有目标身份的信息发送到汇聚节点,请求寻找从传感器覆盖目标到汇聚节点使用最小能量的最小跳跃路径.当所有请求都到达汇聚节点时,开始生成目标覆盖传感器的覆盖集.汇聚节点选择一组不为空的覆盖集,获得应答数据包的传感器开始搜索到汇聚节点的最小可能跳数路径(Minimum Possible Hop Count Path, MPHCP),最后通过跟踪传感器正在监控的目标数量和剩余能量寻找从覆盖集到接收器的能量优化路径,为感测数据提供可扩展的连通性.实验结果显示,与其他算法相比,本文算法的目标覆盖平均网络寿命延长,同时消耗的平均能量更少.

1 准备工作

1.1 能耗模型

收发器消耗的能量用于在传感器处发送和接收数据、发射机电子设备的能量使用、放大过程中的能量耗散和在感知目标时的能量使用.本文使用 $e_{tx}(b, d)$, $e_{rx}(b)$ 和 $e_{sx}(b)$ 来表示两个距离为 d 的传感器间链路发送、接收和感测 b 位数据所消耗的能量.

$$e_{tx}(b, d) = e_{cl}b + e_{am}bd^\eta \quad (1)$$

$$e_{rx}(b) = e_{el}b \quad (2)$$

$$e_{sx}(b) = e_sb \quad (3)$$

其中, e_{el} 表示发射机电子设备消耗的能量, e_{am} 表示运行发射器每位消耗的能量, η 表示路径损耗指数, 取值范围在 2 ~ 6 之间, 取决于环境的衰落条件. e_s 是感测 1 比特数据所消耗的能量, 发送、接收和感测数据的 b 比特能量需求可以表示为:

$$e_i(b, d) = e_{tx}(b, d) + e_{rx}(b) + e_{sx}(b) \quad (4)$$

发送、接收和感测 b 位数据后的剩余能量可以表示为:

$$e_r(b) = e_i - e_i(b, d) \quad (5)$$

其中, e_i 表示传感器的初始能量.

1.2 覆盖集定义

设传感区域为 $a \times a$ 的正方形, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 为在区域内服从泊松点过程的传感器集合, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 是在传感区域内服从泊松点过程的 n 个目标的集合. 当 $t_i \in T \forall i, 1 \leq i \leq N$ 时, 如果至少存在一个传感器 $s_j, 1 \leq j \leq N$ 使得 $d(t_i, s_j) \leq r$, 则称 T 中每个目标被 S 中的至少一个传感器 s_j 覆盖,

如果 $s_j \in C_k$, 则称 T 被 C_k 覆盖, 其中 r 为传感器的感测范围, C_k 为覆盖集. 设 $\lambda = \frac{N}{a^2}$ 是该区域满足上述

条件所需传感器的密度, $p(X=x) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!}$ 为泊松分布的概率分布函数(PDF), $p(x=0) = e^{-\lambda}$, $p(x \geq 1) = 1 - e^{-\frac{N}{a^2}}$, 可以从上面方程中为 $p(x \geq 1) \geq 0.9$ 选择适当的 N 值.

感测区域中的传感器形成网络, 其中如果 $d(s_i, s_j) \leq R, \forall 1 \leq i, j \leq N$, 则两个传感器通过无线链路连接, R 表示传输范围. 本文将传感器集合划分为两个不相交的集合 S_t 和 S_r , S_t 为覆盖至少一个目标的目标传感器集合, S_r 为不覆盖任何目标的目标传感器集合. 设 $C_k \subset S_t \cup S_r \forall k=1, 2, \dots, N$ 是一组传感器, 使 T 被 C_k 覆盖和连接, 则可以用数学公式表示为:

1) 当 $t_i \in T \forall i, 1 \leq i \leq N$ 时, 如果至少存在一个传感器 $j, 1 \leq j \leq N$ 使得 $d(s_i, s_j) \leq r$ 和 $s_j \in C_k$, 则称 T 被 C_k 覆盖.

2) 当 $t_i \in T \forall i, 1 \leq i \leq N$ 时, 如果存在一组传感器 $C_{kj} \subseteq C_k$ 使得 C_k 包含来自 S_t 的仅一个成员和 S_r 的零个或多个成员, 且存在通过这些传感器从汇点到属于 S_t 传感器的路径, 则称 T 由 C 连接.

1.3 模型定义

本文需要解决的问题是在保证 $C_k \forall k=1, 2, \dots, N$ 的传感器数量最优和最小化网络整体能耗的情况下, 最大限度地减少覆盖集的数量, 即寻找可能的最大覆盖数量, 其中每个传感器 $S_i, 1 \leq i \leq N$ 仅属于一个覆盖集 C_k .

本文将寻找可能最大覆盖数量的问题表述为整数线性规划(Integer Linear Program, ILP) 问题. 令 $C = \{C_1, C_2, C_3 \dots C_u\}$ 表示所有可能的覆盖集集合, 每个覆盖集覆盖所有目标.

$$\bar{\omega}_i^k = \begin{cases} 1 & \text{如果 } s_i \in C_k, 1 \leq k \leq u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$\theta_k = \begin{cases} 1 & \text{如果 } C_k \text{ 被选中} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

ILP 的目标为:

$$\text{Maximize } \sum_{1 \leq i \leq n} \sum_{1 \leq k \leq u} (1 - \bar{\omega}_i^k) \theta_k \quad (8)$$

$$\sum_{1 \leq k \leq u} \bar{\omega}_i^k \theta_k \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式(8)的目标函数用来最大化不相交集合的数量,每个集合覆盖所有目标并通过将待激活传感器的数量乘以小的正系数 $\rho(\rho \leq 1)$ 来施加约束,从而最小化每个集合中所使用的传感器数目. ILP 存在 k 个变量和 $(n+k)$ 个约束条件,式(9)规定了传感器至多用于一个覆盖集的条件. 上述 ILP 公式提供了最优解,但对于大型问题实例是不可行的,本文基于多项式时间算法来逼近问题的解.

1.4 模型假设

汇聚节点的位置对网络性能有很大影响,因此位置非常重要. 无线传感器网络中汇聚节点的优化定位存在参数多、路由算法不同、涉及大量传感器节点、传感器节点不同能力等诸多挑战. 因为会影响诸如能量消耗、延迟、吞吐量和网络连接等性能指标,汇聚节点定位需要精确地选择汇聚节点的位置. 调整汇聚节点的位置可以提高 WSN 的可靠性,因为汇聚节点最理想的初始位置可能会由于网络的变化而变得无效. 本文汇聚节点位于目标节点附近,将 WSN 限制为网状拓扑,如图 1 所示. 图 1 中黑色圆点表示传感器网络节点. 对系统模型进行如下假设:

- 1) 所有传感器节点都是静止的,并且位于具有相同大小单元的二维正方形网格中.
- 2) 所有传感器节点具有相同的初始能量.
- 3) 范围是固定的,等于网格中两个相邻节点之间的距离,即一跳是一个网格单元边长.
- 4) 传感器节点通过沿最短路径的多跳将数据中继到汇聚节点.
- 5) 汇聚节点只能位于网格中的特定位置.

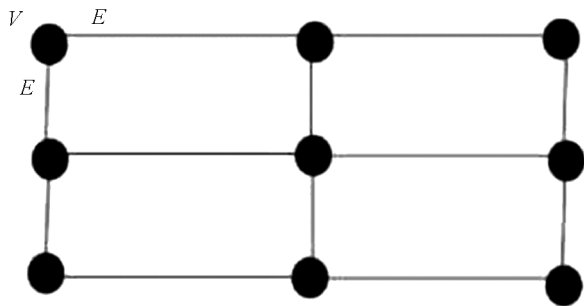


图 1 具有网状拓扑的 WSN

传感器网络可以由点和边组成的图 $G(V, E)$ 来表示,其中 V 是传感器节点的顶点, E 边缘充当两个相邻节点间的单跳连接. 如果传感器节点通过一跳连接到汇聚节点,那么数据以简单的方式进行转发,否则将通过多跳进行数据转发.

2 高效的无线传感器网络目标覆盖算法

本文提出的算法首先为每个传感器找到距汇聚节点的最小跳跃距离,随后所有目标覆盖传感器都将各自具有目标身份的信息发送到汇聚节点,请求寻找从传感器覆盖目标到汇聚节点使用最小能量的最小跳跃路径. 当所有请求都到达汇聚节点,开始生成目标覆盖传感器的覆盖集. 汇聚节点选择一组不为空的覆盖集,获得应答数据包的传感器开始搜索到汇聚节点的最小可能跳数路径(Minimum Possible Hop Count Path, MPHCP),汇聚节点按照用于侦听的相同路径向这些传感器发送许可数据包,选定的发送器在获得许可数据包后开始感测. 在重新计算能量后,通过先前找到的最节能路径将生成的数据发送到汇聚节点,一旦这组覆盖集的寿命结束,汇聚节点就为另一组传感器做同样的工作,当完成了所有这样的覆盖集后,汇聚节点就终止感测过程,具体流程如图 2 所示.

2.1 为每个传感器寻找距汇聚节点的最小跳跃距离

汇聚节点生成一个 0 跳的跳包,并在其周围的传输范围 R_c 中转发该数据包. 假设汇聚节点位于感测区域的中间(图 3),所有传感器都用 1 跳和初始能量进行初始化,获得跳包的传感器存储跳数和能量的值. 如果跳数小于所存储的跳数值,更新跳数. 传感器在等待一段时间后广播相同的内容,每个传感器中的能量也会根据能耗模型进行更新. 每个相邻节点处的剩余能量也与跳数信息一起被广播到相邻节点,以便传感器具有关于其最小距离和来自汇聚节点最小能量的信息. 在将跳数转发到下一个传感器之前,传感器会将其递增 1,这有助于下一个传感器知道从汇聚节点到自身的确切跳数及路由,因为数据包还包含其所经过的传感器 ID. 传感器具有关于自身能量、邻居能量、传感器 ID 和跳数的信息,每个传感器重复此广播和

更新过程，直到覆盖整个网络。

传感器存储有关传感器的信息，传感器已向它们发送了具有最小跳数的数据包、每个邻居节点的剩余能量及自身的剩余能量。用于存储关于跳包信息的表包含以下字段：跳数、传感器身份和剩余能量。如果某个节点剩余能量相比其他节点严重不足时，不能作为中继节点使用。

跳距的目标是将最小跳数和剩余能量传递给每个传感器，因此必须确保在可能的范围内具有较低跳计数值的传感器必须开始参考数据包，以避免冗余传输并延长使用寿命。等待时间应该是传感器可用跳数的函数，引入等待时间的曲线可以防止跳包碰撞。具体表达为：

$$D_i = \varphi_i e^{-\varphi_i t} \quad (10)$$

$$\varphi_i = f(\lambda, hc_i), 1 \leq i \leq N \quad (11)$$

其中， φ_i 是等待时间指数分布的速率参数， λ 为传感器密度， hc_i 为跳数。 D_i 是第 i 个传感器的等待时间， t 是均匀随机变量。为了避免跳包的冲突，必须保证在 $4\pi r^2$ 范围内一次仅一个传输，即 $\varphi_i \propto \frac{4\lambda\pi r^2}{N}$ ， r 为区域半径。此外， φ_i 跳

数的依赖性可以表示为 $\varphi_i \propto \frac{1}{h_i}$ ，其中 h_i 是具有第 i 个传感器的跳数值。

φ_i 的最终表达式可由 $\varphi_i = \frac{4\lambda\pi r^2}{Nh_i}$ 给出。第 i 个

传感器的等待时间由以下公式给出：

$$D_i = \frac{4\lambda\pi r^2}{Nh_i} e^{-\frac{4\lambda\pi r^2}{Nh_i} t} \quad (12)$$

该算法在线性时间内运行，算法中没有循环，除了传感器的等待时间外，几乎每个传感器都需要恒定的时间来执行数据包转发。传感器的等待时间由式(12)求得，虽然是指数型，但随着时间 t 的增加迅速收敛。

2.2 发送请求寻找从自身到汇聚节点的可能最短路径

该过程由覆盖至少一个目标的所有传感器启动，随后搜索其邻居的列表发送包含其身份及所覆盖目标身份的请求数据包，跳包转发生成最初从汇点到所有传感器的多跳路径池。为了找到最短路径，传感器总是将请求数据包转发到从中获得最小跳数数据包和高剩余能量的同一传感器，所有收到请求数据包的传感器都会向发送方传感器发送确认。如果传感器未收到确认，会将数据包重新发送到另一个传感器，该传感器是其列表中下一个最远的传感器。

由于本节只有一个循环在所有传感器上运行，因此本节算法以线性时间运行，不需要任何额外的传输来探索从传感器到接收器的最小跳跃路径。通过这种方法，可以保证算法运行时除数据感知和信息发送外的能耗最小。

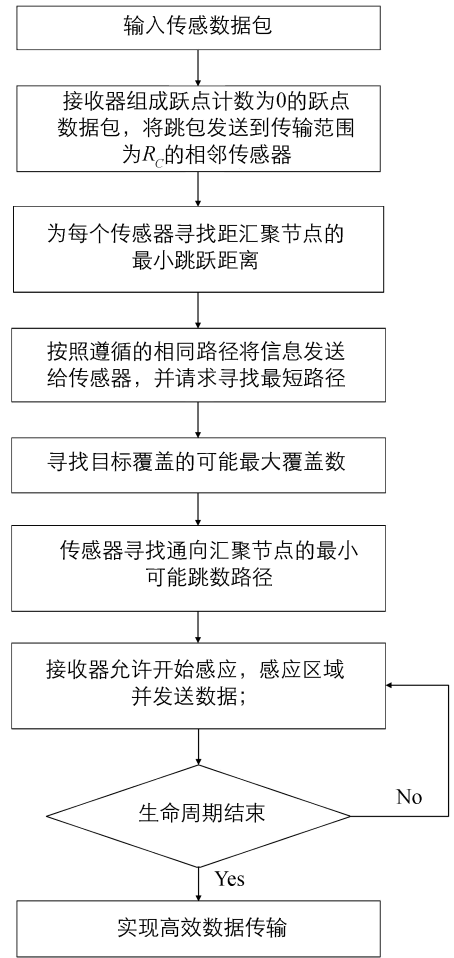


图 2 本文算法流程图

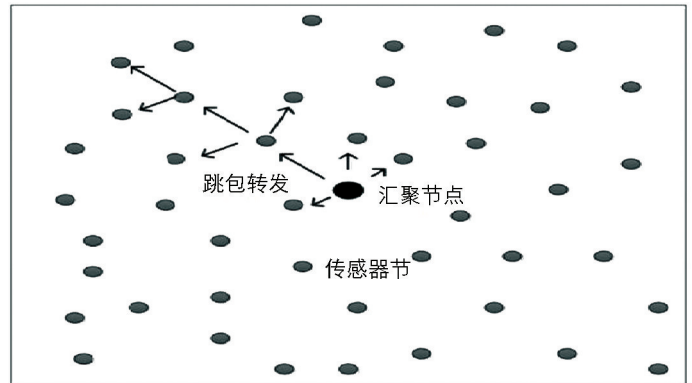


图 3 跳包转发

2.3 寻找目标覆盖的可能最大覆盖数量

本文基于多项式时间算法来逼近问题的解. 一旦生成覆盖集, 就从 s_i 中移除属于该覆盖集的相应传感器, 并且再次按照式(8)和式(9)来求解问题, 重复这个过程可迭代地生成所有可能数量的覆盖集. 本文采用贪婪的方法寻找最小成本覆盖集作为上述问题的解决方案, 为此选择包含覆盖目标最多并且具有最高能量的传感器. 该算法从左到右遍历传感器覆盖目标的邻接表, 如果两个传感器具有相同数量的覆盖目标, 则选择那个具有较大能量值的传感器. 将已取走的传感器删除, 重复该过程到没有需要删除的传感器为止.

2.4 寻找最小可能跳数路径

在生成第一个覆盖集后汇聚节点向传感器发送应答数据包允许感测. 按照覆盖集的生成顺序选择允许的传感器组, 应答数据包包含数据包要遵循的路径、接收传感器的标识、覆盖集编号和开始感测的时间, 应答包遵循的路径与底层传感器请求包的路径保持相同. 通过这种机制, 可以节省大量的时间和能量, 并且应答包在尽可能短的时间内到达目的地.

所有收到请求应答包的传感器都会启动 MPHCP 算法. 在该算法下, 传感器找到从自身到汇聚节点的最小可能跳数路径, 位于覆盖集中的传感器不需要找到这样的路径. 传感器使用 MPHCP 算法获取应答包的相同路径, 此路径是从汇聚节点到传感器的最小可能路径. 之所以说“最小可能”, 是因为需要找到从底层传感器到汇聚节点的最短路径, 但是路径的任何部分都不应与另一条路径共用, 任何传感器只能参与一条路径. 一旦一组传感器找到 MPHCP, 汇聚节点启动另一组覆盖集开始查找其 MPHCP. 在此算法中, 已经属于另一条路径的传感器不计入路径查找中.

2.5 优化路径损耗

为了优化路径的能量消耗, 传感器从多跳路径池中选择路径, 该多跳路径池由跳包从汇聚节点转发到所有传感器. 本文选择具有优化能耗最小跳数的路径进行数据传输. 参与数据包传输、接收和检测目标的路径的所有传感器所消耗的能量 e_p 表示为:

$$e_p = [e_{tx}(b, d) + e_{rx}(b) + e_{sx}(b)] \times h \quad (13)$$

其中, 路径 p 由 h 个跳数组成, h 个跳数连接 p 中的 1 个传感器. 最小化路径 p 中的跳数意味着最小化路径能量 e_p , 最小化 e_p 可设置为优化准则, 并表示为:

$$\text{Mine}_p = [e_{tx}(b, d) + e_{rx}(b) + e_{sx}(b)] \times \text{Max}(\delta) \quad (14)$$

其中, δ 是每跳的平均进度, $\text{Max}(\delta)$ 表示最大单跳距离, 并且 e_q 表示在移除一个或多个跃点之后通过新的路由 q 从源传感器向汇聚节点传输数据的能量消耗.

最小化路径中的跳数, 使得在移除路径中的一个或多个跳数(具有较少跳数的新路由)之后, 通过新路由 q 从源传感器向汇聚节点传输数据所产生的能量消耗小于现有路由 p 的能耗. 本文通过最大化朝向汇聚节点的单跳进度来最小化跳数. 路径中的平均单跳距离 $E(s)$ 和平均跳数 $E(c)$ 由以下公式给出:

$$E(s) = \frac{\lambda \pi r^2}{\lambda \pi r^2 + 1} r_{\max} \quad (15)$$

$$E(c) = \frac{a}{\sqrt{2} r_{\max}} \left(1 + \frac{1}{\lambda \pi r^2} \right) \quad (16)$$

其中, a 是正方形传感区域的边长, $\lambda = \frac{N}{a^2}$ 是传感器的密度, $r_{\max}$ 是传感器的最大传输范围.

根据本文提出的能量模型, 传感器在发射、接收和感知目标时消耗能量, 传输过程中消耗的能量是发送方传感器和接收方传感器之间距离的幂. 在两个相邻传感器之间传输 b 比特数据, 每跳的平均能量消耗 $E(e_i(b, d))$ 可以表示为:

$$E(e_i(b, d)) = \left[2e_{el} + e_{am} \left(\frac{\lambda \pi r^2}{\lambda \pi r^2 + 1} r_{max} \right)^\eta + e_s \right] b$$

(17)

因此，参与包传输、接收和检测目标的路径中所有传感器消耗的平均能量 $E(e_p)$ 可以表示为：

$$E(e_p) = E(e_i(b, d)) \times E(c)$$

(18)

3 通信开销分析

在本文所提出的算法中，当汇聚节点生成一个跳包时，汇聚节点只发送一次信标，其计数值为 0，并且在跳距算法的初始化阶段将其转发到周围的传输范围，从而循环关于其跳计数值 1 和初始能量的信息。在发送请求阶段，不需要发送额外的协调消息。在发送请求阶段，每个传感器节点将请求数据包转发到获得最小跳数数据包的同一传感器，并为 ACK 发送一次信标进行确认。应答包遵循的路径与传感器请求包的路径保持相同，这将节省时间和能量，并且使应答包在尽可能短的时间内到达目的地。由于发送或接收单个数据包而消耗的能量几乎与传感器之间传递的指令数量相同，当考虑实际的传感器网络时，由于竞争而导致的重传将能量消耗提高到很高的水平，甚至发送消息。因此，在本文提出的协议中传输消息数量非常少，这对于最小化能量消耗和延长系统寿命是可取的。与减少通信开销所节省的能量相比，复杂计算所消耗的任何额外能量都可以忽略不计。

4 实验结果与分析

本文在 MATLAB 中开发的模拟器中生成了模拟场景，模拟器由传感器部署模块、拓扑生成模块等不同模块组成，模拟了一个由 400 个传感器节点按照泊松点过程随机分布的网络，每个传感器的感应范围为 10 m，传输范围为 50 m。每次模拟运行 20 次，取平均值来计算结果，每个目标生成 1 kb 的恒定数据流量。本文算法的仿真参数如表 1 所示。将实验结果与文献[13]中提到的优化连接覆盖集启发式（Optimized Connected Coverage Heuristic, OCCH）算法和文献[14]中提到的通信加权贪婪覆盖（Communication Weighted Greedy Cover, CWGC）算法进行分析和比较，OCCH 和 CWGC 算法以能够覆盖所有目标的贪婪方式选择源，生成到信宿的最短路由路径，并更新通信开销避免选择具有低剩余能量的节点，因此选择这两个算法与本文算法进行比较分析。

表 1 实验参数

参数	取值	参数	取值
区域大小	(0, 0)~(200, 200)	e_s	10 nJ · bit ⁻¹
传感器数量(N)	400	e_{rx}	20 nJ · bit ⁻¹
路径损耗指数	2	e_{tx}	150 nJ · bit ⁻¹
e_{el}	50 nJ · bit ⁻¹	e_i	20 nJ · bit ⁻¹
e_{am}	100 pJ · (bit · m ²) ⁻¹	数据包大小	512 bits

图 4 给出了在边长为 200 m,250 m 和 300 m 的网络区域中部署 30 个目标、传感器从 50~400 个变化时，本文算法的平均能耗。在本实验中，平均能耗包括为满足覆盖性和连接性要求而花费的能量。

由图 4 可以看出，在边长为 200 m 的网络区域中部署 200~225 个传感器的能耗最小，边长为 250 m 的网络区域中部署 325~350 个传感器的能耗最小，在边长为 300 m 的网络区域中部署 375~400 个传感器的能耗最小。因此，实现最小能耗的传感器数量随着边长增加而增加，这是因为平均单跳距离随着网络面积增加而增加，传输的能量需求是任意两个相邻传感器之间距离因子的幂。

图 5 给出了期望路径能量相对于跳数的分析结果。期望路径能量定义为所有参与传输、接收和感知路径的传感器节点所消耗的能量。该模拟使用 30 个随机部署的目标，传感器数量从 50~300 个变化。由图 5

可以看出,在较少的跳数下路径节点消耗的能量要高得多。当跳跃从 10 增加到 20 时,路径能量增加。这是因为每跳距离随着跳数增加而减小,需要更多的多跳传输,从而消耗了更多的能量。对于 5~10 个跳数,路径能量保持最小。因此,应该首先考虑 5~10 跳范围内的替代节能路由。

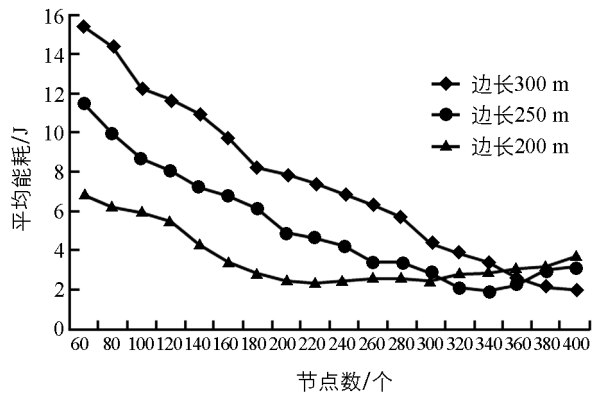


图 4 不同边长网络区域节点数的优化分析

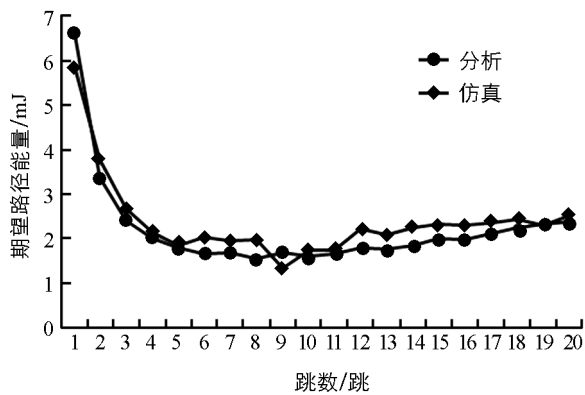


图 5 预期路径能量与跳跃数

覆盖时间定义为生成所有可能的覆盖集所需的时间。图 6 给出了节点数不同时各算法的覆盖时间,覆盖时间表示为生成所有可能的覆盖集所需的时间。

由图 6 可以看出,覆盖时间随着节点密度增加而增加,这是因为当节点密度增加时,重复执行相同操作所消耗的时间增加。本文算法的性能比 OCCH 和 CWGC 好,这是因为本文算法首先为每个传感器找到距汇聚节点的最小跳跃距离,然后请求寻找从传感器覆盖目标到汇聚节点使用最小能量的最小跳跃路径,最后获得应答数据包的传感器开始搜索到汇聚节点的最小可能跳数路径。通过这种机制,可以节省大量的时间和能量。

图 7 给出了节点数不同时各算法的平均能量消耗。平均能耗是网络中所有传感器总能耗与传感器数量的比率,包含传感器在满足覆盖性和连通性要求时所消耗的能量。由图 7 可以看出,平均能耗随着传感器数量的增加而下降,这是因为任何两个传感器之间的平均距离随传感器数量的增加而减小,所消耗的能量也随之减少。本文算法的平均能量消耗低于 OCCH 和 CWGC,这是因为本文算法除了采用最小跳跃距离、最小跳跃路径和最小可能跳数路径这种机制进行数据传输外,另外采用贪婪的方法寻找最小成本覆盖集,包含覆盖目标最多并且具有最高能量的传感器,节省了大量能量。

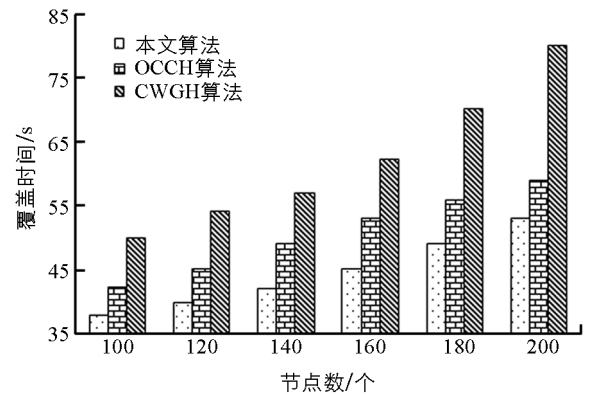


图 6 节点数不同时各算法的覆盖时间

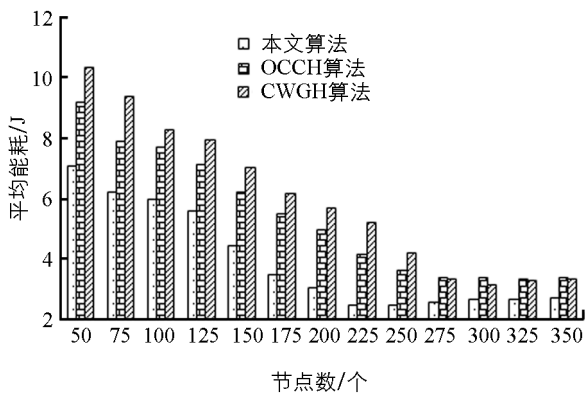


图 7 节点数不同时各算法的平均能耗

网络生存周期是指一个目标不能被任何传感器节点监控或任何传感器节点不能再将数据转发到接收器的持续时间。图 8 给出了在由 300 个传感器和 30 个目标组成的 WSN 环境下,本文算法与 OCCH 算法和 CWGC 算法的网络寿命随区域面积的变化情况。

由图 8 可以看出,通信距离随着面积的增加而增加,导致传感节点的密度降低.由于节点密度降低,网络可靠性降低,导致吞吐量降低和通信开销增加,使得各算法对区域变化敏感.本文算法在网络生命周期方面比其他两个算法高出 20%~30%.

图 9 给出了在由 300 个传感器和面积为 $200 \times 200 \text{ m}^2$ 组成的 WSN 环境下,本文算法与 OCCH 算法和 CWGC 算法的网络寿命随目标数量的变化情况.由图 9 可以看出,网络寿命随着目标数量的增加而缩短,这是因为随着网络中放置目标数量增加,需要更多的传感器处于活动状态,并且由于数据量的增加,通信量负载也会加重.本文算法在不同目标数量的网络生存周期比 OCCH 和 CWGC 高出近 20%.

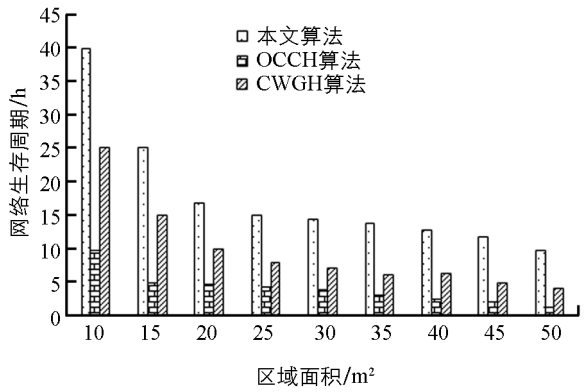


图 8 面积不同时各算法的网络生存周期

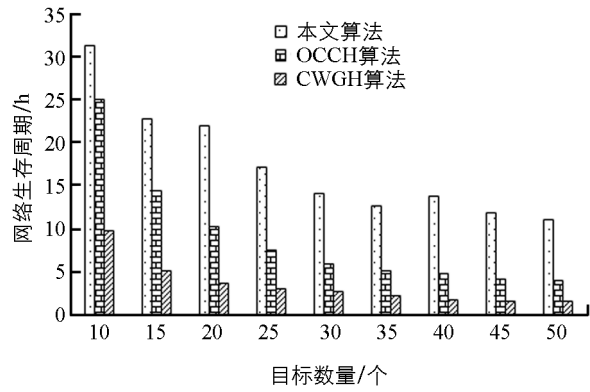


图 9 目标数不同时各算法的网络生存周期

图 10 给出了在固定面积和目标的情况下,本文算法与 OCCH 算法和 CWGC 算法的网络寿命随传感器数量的变化情况.由图 10 可以看出,网络寿命随节点密度增加而减少,OCCH 算法和 CWGC 算法的网络寿命较短.本文提出的算法 DCCA 比在不同节点数的网络生存周期 OCCH 和 CWGC 高出近 50%.

图 9 和图 10 中本文算法性能都优于 OCCH 和 CWGC 算法.这是因为本文算法在发送请求阶段,每个传感器节点将请求数据包转发到获得最小跳数数据包的同一传感器,并为 ACK 发送一次信标进行确认.应答包遵循的路径与传感器请求包的路径保持相同,并且应答包在尽可能短的时间内到达目的地,减少了冗余,节省了通信开销.而 OCCH 和 CWGC 使用公共节点通过增加关键节点的通信权重来中继数据,增加了通信开销.

图 11 给出了 3 种算法在区域 $200 \times 200 \text{ m}^2$ 网络字段中部署的节点数量的最小网络寿命,数据由 20 个模拟生成.由图 11 可以看出,最小网络生存周期随着节点数量增加而增加.与 OCCH 和 CWGC 算法相比,本文算法的最小网络生存周期优于所对比的方法.当节点比较多时,本文算法的可扩展性优于 OCCH 和 CWGC 算法.这是因为算法的性能与网络拓扑结构有关,增加节点数量会削弱这种影响.

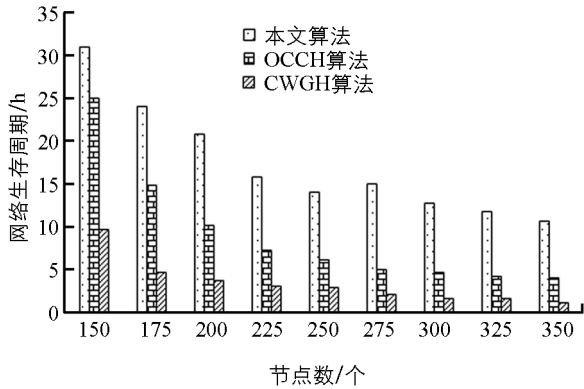


图 10 节点数不同时各算法的网络生存周期

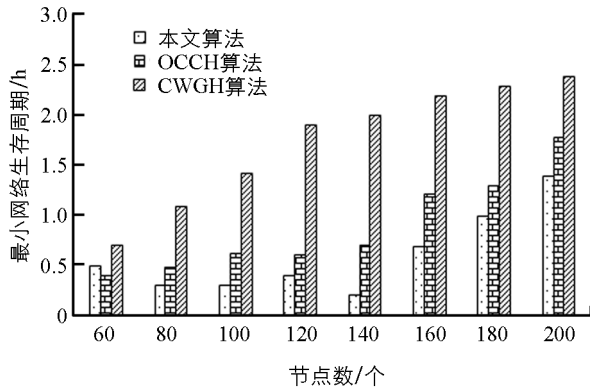


图 11 节点数不同时各算法的最小网络生存周期

5 结论

为了延长网络寿命和降低 WSN 的平均能耗,本文提出一种高效的无线传感器网络目标覆盖算法.该算法通过生成不相交的覆盖集来延长覆盖的持续时间,通过提供多个覆盖集来使传感器消耗的能量相当,达到最大化使用寿命的目的,并跟踪传感器正在监控的目标数量及剩余能量寻找从信源到信宿的最小能量路径为感测数据提供扩展的连接性.实验表明,在节点数为 200 时,本文方法的覆盖时间为 63 s, OCCH 算法为 60 s, CWGC 算法为 80 s;本文方法的平均能耗为 3 J, OCCH 算法为 5.5 J, CWGC 算法为 6.3 J;本文方法的网络生存周期为 22 h, OCCH 算法为 10 h, CWGC 算法为 4 h. 由此,说明本文方法性能优于 OCCH 算法和 CWGC 算法.另外,不同面积和不同目标的实验结果也表明了本文方法的优越性.未来的工作是评估分布式环境中的目标覆盖,并将其用于其他类型的覆盖问题,例如区域覆盖或 k -覆盖问题.

参考文献:

- [1] ELSAYED W, ELHOSENY M, SABBEH S, et al. Self-Maintenance Model for Wireless Sensor Networks [J]. Computers & Electrical Engineering, 2018, 70: 799-812.
- [2] FU X W, YAO H Q, YANG Y S. Modeling and Analyzing Cascading Dynamics of the Clustered Wireless Sensor Network [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 186: 1-10.
- [3] 陈惠娟, 赵雪青. 无线自组织网络信息流传输安全性评估仿真 [J]. 计算机仿真, 2018, 35(4): 357-361.
- [4] AHMED Y E E, ADJALLAH K H, STOCK R, et al. NDSC Based Methods for Maximizing the Lifespan of Randomly Deployed Wireless Sensor Networks for Infrastructures Monitoring [J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 115: 17-25.
- [5] MOHAJERZADEH A H, JAHEDINIA H, IZADI-GHODOUSI Z, et al. Efficient Target Tracking in Directional Sensor Networks with Selective Target Area's Coverage [J]. Telecommunication Systems, 2018, 68(1): 47-65.
- [6] HARIZAN S, KUILA P. Coverage and Connectivity Aware Energy Efficient Scheduling in Target Based Wireless Sensor Networks: an Improved Genetic Algorithm Based Approach [J]. Wireless Networks, 2019, 25(4): 1995-2011.
- [7] VERMA S, CHANAK P. Energy Efficient Non-Disjoint Set Based Target Coverage Scheme for Wireless Sensor Networks [C] // 2018 International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET). Kottayam: IEEE, 2018: 1-6.
- [8] 何文才, 李娜, 刘培鹤, 等. 一种 WSN 小数据分发安全方案的研究与设计 [J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(2): 150-155.
- [9] 朱江, 雷云, 王雁. 认知无线传感器网络中基于稳定性的能效路由协议 [J]. 计算机科学, 2018, 45(11): 97-102.
- [10] RAZALI M N, SALLEH S, MOHAMADI H. Solving Priority-Based Target Coverage Problem in Directional Sensor Networks with Adjustable Sensing Ranges [J]. Wireless Personal Communications, 2017, 95(2): 847-872.
- [11] MOSTAFAEI H, MONTIERI A, PERSICO V, et al. A Sleep Scheduling Approach Based on Learning Automata for WSN Partialcoverage [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017, 80: 67-78.
- [12] MOSTAFAEI H, OBADAT M S. A Greedy Overlap-Based Algorithm for Partial Coverage of Heterogeneous WSNS [C] // GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference. Singapore: IEEE, 2017.
- [13] QIN D Y, MA J Y, ZHANG Y, et al. Study on Connected Target Coverage Algorithm for Wireless Sensor Network [J]. IEEE Access, 2018, 6: 69415-69425.
- [14] ROSELIN J, LATHA P, BENITTA S. Maximizing the Wireless Sensor Networks Lifetime through Energy Efficient Connected Coverage [J]. Ad Hoc Networks, 2017, 62: 1-10.