

# 基于概率感知模型的线性无线传感网络可靠性分析<sup>①</sup>



李兆, 贾正锋, 杨海波

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110870)

通信作者: 杨海波, E-mail: yanghb@sut.edu.cn

**摘要:** 线性无线传感网络 (linear wireless sensor network, LWSN) 广泛应用于监测铁路、天然气管道等线性拓扑的关键基础设施, 其可靠性至关重要, 其中覆盖率是衡量可靠性的重要指标. 目前在评估 LWSN 覆盖率的方法大多采用 0/1 圆盘感知模型, 但实际中传感器的监测可靠性随着覆盖半径增加呈概率分布. 因此, 提出了一种基于概率感知模型的可靠性分析方法, 该模型可根据传感器的物理参数计算其有效感知范围, 进而提升了评估的准确性. 为减小系统状态空间的大小, 采用二元决策树构造 LWSN 的系统状态集合. 本文假设节点的故障概率符合 Weibull 分布并针对不同通信半径和感知范围进行仿真实验, 结果表明该方法可以有效地对 LWSN 的可靠性进行评估, 评估准确率相比 0/1 圆盘感知模型更精准.

**关键词:** 线性无线传感网络 (LWSN); 可靠性; 概率感知模型; 二元决策树; Weibull 分布

引用格式: 李兆, 贾正锋, 杨海波. 基于概率感知模型的线性无线传感网络可靠性分析. 计算机系统应用, 2024, 33(9): 183-191. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/9625.html>

## Reliability Analysis of Linear Wireless Sensor Network Based on Probabilistic Sensing Model

LI Zhao, JIA Zheng-Feng, YANG Hai-Bo

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** Linear wireless sensor network (LWSN) is widely used to monitor key infrastructure in linear topology such as railways and natural gas pipelines, whose reliability is very important, and coverage is an important indicator to measure reliability. Currently, most methods for evaluating the LWSN coverage are based on a 0/1 disk sensing model, but in practice, the monitoring reliability of sensors follows a probability distribution with the increase of coverage radius. Therefore, a reliability analysis method based on a probabilistic sensing model is proposed, which can calculate the effective sensing range based on the physical parameters of sensors, thereby improving the accuracy of evaluation. To reduce the size of the system state space, a binary decision tree is used to construct the LWSN system state set. In this study, the failure probability of nodes is assumed to follow a Weibull distribution, and simulation experiments are conducted for different communication radii and sensing ranges. The results show that this method can effectively evaluate the reliability of LWSN, and the evaluation accuracy is more accurate than the 0/1 disk sensing model.

**Key words:** linear wireless sensor network (LWSN); reliability; probabilistic sensing model; binary decision tree; Weibull distribution

① 基金项目: 辽宁省第二批揭榜挂帅 (科技攻关专项)(2022JH1/10800085); 辽宁省自然科学基金 (面上) 项目 (2022-MS-438); 辽宁省教育厅基本科研项目服务地方项目 (LJKFZ20220184)

收稿时间: 2023-12-28; 修改时间: 2024-02-26; 采用时间: 2024-05-06; csa 在线出版时间: 2024-07-26

CNKI 网络首发时间: 2024-07-29

无线传感网络 (wireless sensor network, WSN) 由大量静止或者移动的自组织传感器节点所构成, 其目的是对监测区域中目标的信息进行采集和处理<sup>[1]</sup>并将数据传送给用户, 用户根据收到的数据做出决策<sup>[2]</sup>. 无线传感网络在生活中的很多方面都有着广泛的应用, 如灾害报警、结构监测<sup>[3,4]</sup>等. 线性无线传感网络 (LWSN) 是无线传感网络中具有线性拓扑结构的网络, 其在许多场景下都有着广泛的应用, 如铁路、天然气或石油管道等<sup>[5-10]</sup>. 由于此类基础设施对 LWSN 具有很高的可靠性要求, 因此在设计 LWSN 之初需要一种能够准确评估 LWSN 可靠性的方法, 其中连通性与覆盖率是 LWSN 可靠性研究的重要指标.

目前已有一些学者在 LWSN 可靠性的方面进行研究. Çıbuk 等<sup>[11]</sup>提出了一种防止网络中节点之间通信中断的方法, 如果网络中的节点失效, 则激活其相邻节点、扩大相邻节点的通信范围. 但该文献仅研究单个节点与网络断开连接的情况并没有分析连续多个节点失效的情况. Mo 等<sup>[12]</sup>提出了 MDD (multivalued decision diagram) 算法来评估具有主干节点混合分层结构的 LWSN 连通可靠性, 其方法与传统的枚举方法相比更有效, 但该文献在研究 LWSN 可靠性的过程中没有考虑覆盖率. Mohamed 等<sup>[13]</sup>提出了一种同时研究 LWSN 的连通性与覆盖率的可靠性评估方法, 通过测试不同的 MJF、NSR, 以评估 LWSN 的可靠性, 其思想对于 LWSN 的可靠性评估具有重要意义. 但该文献中节点的故障概率遵循二项分布, 无法准确反映节点随时间变化的寿命特征. Tripathi 等<sup>[14]</sup>介绍了无线传感网络中分析覆盖率的概率感知 probabilistic sensor coverage 模型. 如果节点对目标区域的感知概率低于期望阈值, 则节点对该区域的监测失效. Yang 等<sup>[15]</sup>针对平面结构和集群结构的 LWSN 提出了一种基于 0/1 圆盘感知模型的可靠性分析方法, 该模型中节点感知目标的概率恒定. 如果节点存活, 则节点对监测范围内目标的感知概率为 100%; 如果节点失效, 则节点对监测范围内目标的感知概率为 0. 因此, 节点对区域的监测仅有两种情况, 即全覆盖与未覆盖. 由于该模型忽略了使模型复杂化的细节, 导致对 LWSN 的可靠性评估结果高于实际值.

感知数据是传感网络正常运行过程中极其重要的任务. 传感器节点的感知覆盖通常被假定为在所有方向上均匀分布, 遵循 0/1 圆盘感知模型. 在节点的感知半径内发生的事件被假定以概率 1 被探测到, 而超出

这个影响范围的事件被假定未被探测到. 这种理想化模型已经广泛应用于最近的研究工作中, 以预测目标区域的总体覆盖率. 然而, 这个模型是基于对所有传感器在圆盘形状的区域实现完美覆盖的不现实假设. 实际上, 传感器的感知能力随着覆盖半径增加呈概率分布, 因此本文提出了一种基于概率感知模型的 LWSN 可靠性的分析方法, 并在上述研究的基础上进行了几点改进. 一是为克服系统状态空间过大的问题, 本文采用了非递归的二元决策树构造 LWSN 的系统状态集合. 二是针对传感器的覆盖可靠性随覆盖半径而变化的现象, 本文引入了概率感知模型. 该模型是一种持续性监测过程, 通过传感器与目标之间的距离反映感知概率, 概率值即表示传感器对目标点的置信度. 最后, 通过对不同连通性与覆盖率的 LWSN 进行仿真实验, 该方法对比文献<sup>[15]</sup>能够对 LWSN 的可靠性进行更精准地评估.

## 1 模型分析

### 1.1 相关理论知识

学者通常将 LWSN 定义为由大量同构、等距的传感器组成且拓扑结构为线性的无线传感网络, 其中相邻传感器之间的距离被定义为一个标准距离. 连通性与覆盖率是 LWSN 可靠性的重要指标. 传感器节点的最大跳跃因子 MJF (maximum jump factor), 本文用  $R_c$  表示, 即传感器节点单侧与相邻节点通信的数量. 通信半径越大,  $R_c$  越大. 每个传感器都有固定的感知范围 NSR (node sensing range), 本文用  $R_s$  表示,  $R_s$  越大, 节点的感知范围越大. 网络模型如图 1 所示.

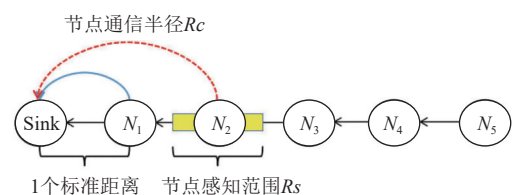


图 1 由等间距传感器组成的 LWSN 模型

例如, 在一个具有 5 个传感器的 LWSN 中, 节点的通信半径  $R_c=1$  且感知范围  $R_s=1$ . 假设 LWSN 中节点都正常工作, 图 2 为基于 0/1 圆盘感知模型下网络的覆盖情况, 工作节点对感知范围内目标的监测概率恒为 100%. 由于传感器对目标的感知概率随距离的增加而降低, 因此传感器可能对覆盖边缘处目标的监测出现不确定性. 如果传感器对某处目标的感知概率低于

规定阈值, 则节点对该区域的监测失效. 假设传感器对覆盖边缘目标的感知概率低于期望阈值, 图3为基于概率感知模型下网络的覆盖情况.

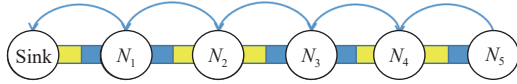


图2 LWSN的理想覆盖情况

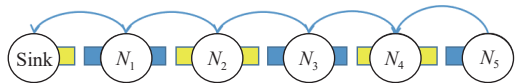


图3 LWSN的实际覆盖情况

连通性与覆盖率密切相关, 如果某些位于LWSN前面的传感器节点连续失效, 即使后面的传感器节点是运行的, 数据仍可能无法顺利地被传送到Sink节点. 本文将处于工作状态并且能够顺利地将数据传送到Sink节点的传感器节点称为工作节点. 如图4所示, 如果 $N_4$ 失效, 即使 $N_5$ 正常运行, 其数据仍然无法传回Sink节点.

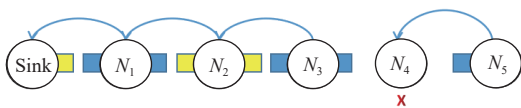


图4 当 $R_c=1$ 时,  $N_4$ 失效网络断开,  $N_5$ 数据丢失

在提高网络可靠性的研究中, 学者可通过如图5扩大传感器的通信半径或如图6扩大传感器的感知范围, 以提高LWSN的可靠性. 因此, 本文需要针对不同 $R_c$ 、 $R_s$ 的LWSN进行可靠性评估.

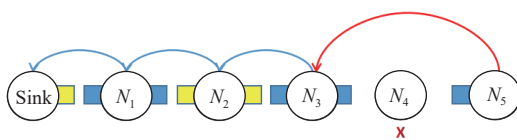


图5 当 $R_c=2$ 、 $R_s=1$ , 传感器 $N_5$ 接入网络

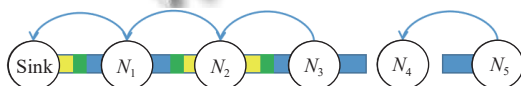


图6 当 $R_c=1$ 、 $R_s=1.5$ , 传感器 $N_3$ 额外监测传感器 $N_4$ 的部分区域

### 1.2 利用决策树分析LWSN的连通性

在一个具有 $n$ 个传感器节点的LWSN中, 本文使用 $\vec{Z}=(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_n)$ 来代表网络的系统状态(system state vector, SSV), 其中传感器节点的状态用 $X_i$ 表示, 它是一个布尔类型的变量如式(1)所示:

$$X_i = \begin{cases} 0, & \text{节点 } N_i \text{ 失效} \\ 1, & \text{节点 } N_i \text{ 工作} \end{cases} \quad (1)$$

一个具有 $n$ 个节点的LWSN存在 $2^n$ 种系统状态, 但研究表明有些系统状态向量是无效的. 例如, 一个具有3个传感器节点的LWSN其系统状态向量集合为 $(0, 0, 0)$ 、 $(0, 0, 1)$ 、 $(0, 1, 0)$ 、 $(0, 1, 1)$ 、 $(1, 0, 0)$ 、 $(1, 0, 1)$ 、 $(1, 1, 0)$ 、 $(1, 1, 1)$ . 假设传感器节点的通信半径 $R_c=2$ , 且工作节点的数量为1, 则存在两种有效情况: $(0, 1, 0)$ 、 $(1, 0, 0)$ , 其中系统状态向量 $(0, 0, 1)$ 无效, 因为网络已经从第1个节点处断开. 因此为减少冗余, 本文采用二元决策树构造系统状态集合. 图7是基于上述情形所绘制的决策树, 其叶子节点的值是网络中运行节点的数量, 路径上的权值为节点的状态, 每条路径代表着LWSN的一种系统状态. 通过对该决策树进行深度遍历, 可获取LWSN的系统状态集合.

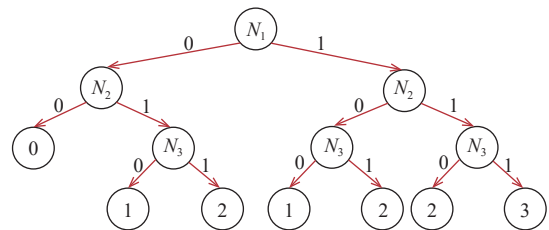


图7 建立 $R_c=2$ 的决策树

### 1.3 引入概率感知模型分析覆盖率

根据不同的设计需要, 即使在线性无线传感网络中存在一些故障的节点也不会影响网络的整体功能. 本文定义网络覆盖参数, 假设LWSN的总范围为 $l$ , 所有节点监测的感知范围为 $c$ , 则网络覆盖参数为 $\gamma = \frac{c}{l}$ , 本文将覆盖率大于 $\gamma$ 的系统状态向量集合称为符合要求的系统状态向量集合 $f(\gamma)$ .

假设 $N_1$ 位于LWSN的头部,  $N_n$ 位于尾端. 由于LWSN中节点按照线性排列, 其监测范围可看作一条直线. 在一个具有 $n$ 个节点的LWSN中, 节点对目标的感知概率随距离呈指数变化如式(2)所示:

$$Cov(p, N_i) = \begin{cases} 0, & d(p, N_i) > R_s \\ e^{-\omega d(p, N_i)^\alpha}, & R_s - r_e < d(p, N_i) \leq R_s \\ 1, & d(p, N_i) \leq R_s - r_e \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $Cov(p, N_i)$ 为传感器对该处目标的感知概率,  $d(p, N_i)$ 为目标与节点 $N_i$ 之间的欧氏距离,  $\alpha$ 、 $\omega$ 为传感器节点在不同功率等级下工作的物理参数, 该参数与传感器的类型和物理特性相关,  $r_e$ 是理想条件下传感器

感知范围的边界值。

在概率感知模型中,目标与传感器的距离对于目标的感知概率影响较大.其中有些目标距离传感器节点很远,虽然这些目标位于传感器节点的感知范围内,但传感器对其感知的影响程度却很小,甚至可以忽略,因此定义有效感知范围对于简化问题求解,降低网络复杂度有非常重要的意义,本文用 $Ru$ 表示.假设节点对目标的期望感知概率(desired detection probability, DDP)为80%,当 $d(p, N_i) \leq Ru$ 时,则传感器对该位置的感知概率不低于80%,该位置被覆盖;如果 $d(p, N_i) \geq Ru$ 时,则传感器对该位置的感知概率低于80%,该位置没有被覆盖.

基于概率感知模型LWSN中每个节点的感知范围如式(3)所示,其中 $i$ 为LWSN中传感器的序号.

$$R(N_i) = \begin{cases} [0, Ru], & i = 1 \\ [i-1-Ru, i-1+Ru], & 1 < i < n \\ [i-1-Ru, i-1], & i = n \end{cases} \quad (3)$$

根据节点的状态 $X_i$ ,  $N_i$ 的感知范围如式(4)所示,其中 $\emptyset$ 代表该节点的监测范围为空.

$$C(N_i) = \begin{cases} R(N_i), & X_i = 1 \\ \emptyset, & X_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

基于决策树提供的系统状态向量集合,通过合并各节点的感知范围,获得系统状态集合的覆盖率,并筛选出满足 $\gamma$ 的系统状态集合如式(5)所示:

$$\gamma(\vec{Z}) = \frac{\bigcup_{i=1}^{\text{length}(\vec{Z})} C(N_i)}{l} \quad (5)$$

#### 1.4 可靠性评估

Weibull分布在可靠性分析中经常用于产品的寿命分布,以便估计产品的可靠性和失效概率.本文采用Weibull分布反映节点随时间变化的故障概率,如式(6)所示:

$$F(t) = 1 - e^{-(\lambda t)^\beta} \quad (6)$$

其中, $F(t)$ 是传感器节点基于Weibull分布在不同时刻的故障概率, $\lambda$ 是比例系数, $\beta$ 是形状系数.根据传感器节点的状态 $X_i$ ,节点在不同时刻下的状态概率 $P_i(t)$ 可通过式(7)获得:

$$P_i(t) = \begin{cases} F(t), & X_i = 0 \\ 1 - F(t), & X_i = 1 \end{cases} \quad (7)$$

基于当前的系统状态向量集合,当前系统状态向量集合在 $t$ 时刻的可能性可通过对集合内节点状态的

概率累乘获取,如式(8)所示:

$$P(\vec{Z}, t) = \prod_{i=1}^{\text{length}(\vec{Z})} P_i(t) \quad (8)$$

通过统计符合要求的系统状态集合的概率,得到LWSN在某一时刻满足网络覆盖参数的可能性,以达到对LWSN的可靠性评估,如式(9)所示:

$$P_\gamma(t) = \sum_{\vec{Z} \in f(\gamma)} P(\vec{Z}, t) \quad (9)$$

基于0/1圆盘感知模型分析LWSN的覆盖率会导致将监测失效区域纳入LWSN的有效感知范围,评估结果往往比实际结果偏大.为提高评估的准确性,本文引入概率感知模型,该模型通过节点与目标间的距离计算节点对范围内目标的感知概率,进而评估覆盖率.

## 2 模型实现

### 2.1 基于决策树获取系统状态向量集合

本文使用元组( $Value, CDamage$ )作为决策树中每个中间节点或叶子节点参数,其中 $Value$ 是当前系统状态下工作的节点数, $CDamage$ 是连续失效的节点数.决策树的构建依赖于 $Rc$ 的取值,如果 $CDamage$ 等于 $Rc$ 则表示网络断开.本文定义了算法1,该算法声明队列 $pNodes$ 与 $cNodes$ 以避免递归.其中,队列 $pnodes$ 用于保存下一轮循环的可操作节点即节点 $X_{i+1}$ ;队列 $cnodes$ 用于保存当前操作节点的孩子节点,其作用在于合并参数相同的孩子节点降低系统资源开销.构造决策树的算法如算法1.

算法1. 建立决策树

输入: LWSN总节点数 $N, Rc$ .

输出: 决策树.

```

1  $pNodes, cNodes \leftarrow \emptyset$ ;
2 创建根节点 $X_1(0, 0)$ , 并添加到 $pNodes$ 中;
3  $i = 2$ ;
4 while  $i \leq N$  do
5   for  $pNode$  in  $pNodes$  do
6      $gCDamage \leftarrow pNode.CDamage, gValue \leftarrow pNode.Value$ ;
7     if  $gValue \geq Rc - 1$ 
8       create leaf  $X_i(gValue, gCDamage + 1)$ ;
9       connect leaf to  $pNode$ 's 0-edge;
10      create node  $X_i(gValue + 1, 0)$ ;
11      node = SearchOrAdd( $X_i, cNodes, i$ );
12      connect node to  $pNode$ 's 1-edge;
13    else
14      create node  $X_i(gValue, gCDamage + 1)$ ;
```

```

15 node=SearchOrAdd( $X_i$ ,  $cNodes$ ,  $i$ );
16 connect node to  $pNode$ 's 0-edge;
17 create node  $X_i(gValue+1, 0)$ ;
18 node=SearchOrAdd( $X_i$ ,  $cNodes$ ,  $i$ );
19 connect node to  $pNode$ 's 1-edge;
20 end
21 end
22  $pNodes \leftarrow cNodes$ ,  $cNodes \leftarrow \emptyset$ ;
23  $i++$ ;
24 end
25 Addleaf( $pNodes$ );

```

算法 1 的具体步骤如下。

步骤 1: 初始化队列  $pNodes$ 、 $cNodes$ 。同时为传感器节点  $N_1$  创建一个根节点  $X_1$ , 将其元组设置为  $(0, 0)$ , 即当前连接的运行节点数为 0, 连续失效的节点数为 0, 然后将根节点  $X_1$  添加到队列  $pNodes$  中。其中, 在  $pNodes$  队列中的节点被定义为  $pNode$ 。

步骤 2: 遍历队列  $pNodes$ 。在循环流程中, 应为每个  $pNode$  构造其孩子节点。其中, 变量  $gValue$  用于保存当前系统状态下工作节点数, 变量  $gCDamage$  用于保存当前系统状态下连续失效的节点数。如果  $pNode$  中  $CDamage$  等于  $Rc-1$ , 则构造一个叶子节点并与  $pNode$  节点的 0 边相连接, 其中叶子节点的  $Value$  值不变, 表明网络从此处的断裂, 即第 8, 9 行。另一边, 构造节点  $X_i$  并使其与  $pNode$  的 1 边相连接,  $X_i$  的  $Value$  的值为  $pNode$  的  $Value+1$ 、 $CDamage$  值清零, 表明该节点运行, 即没有连续失效的节点。

步骤 3: 如果某些元组的参数相同如图 6 所示, 通过将其合并以降低冗余如图 8 所示。在第 11 行中, 本文设计了算法 2, 其功能为合并参数相同的元组。该算法分为两种情况: 如果当前节点是 LWSN 的最后一个节点且在  $cNodes$  队列中存在具有相同  $Value$  值的元组; 如果当前节点不是最后一个节点且在  $cNodes$  队列中存在具有相同  $Value$  和  $CDamage$  值的元组。通过遍历队列  $cNodes$ , 寻找是否存在符合以上要求的节点, 如果存在则返回相对应的节点, 否则将新节点加入到队列  $cNodes$  中并返回自身。

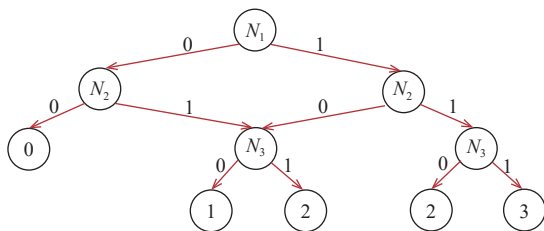


图 8 合并叶子节点

算法 2. SearchOrAdd

输入:  $cNodes$ ,  $X_i$ ,  $i$ 。

输出:  $cNodes$  中的  $X_i$ 。

```

1 for node in  $cNodes$  do
2   if  $i==N$ 
3     if  $node.Value==X_i.Value$ 
4       return node;
5     end
6   else
7     if  $node.Value==X_i.Value$  and  $node.CDamage==X_i.CDamage$ 
8       return node;
9     end
10  end
11 end
12 append  $X_i$  into  $cNodes$ ;
13 return  $X_i$ ;

```

步骤 4: 如果  $pNode$  中的  $CDamage$  值小于  $Rc-1$ , 则意味着在网络未断开的情况下, 接下来的节点可能会失效, 因此根据  $pNode$  的两种情况分别创建节点  $X_i$  并将节点  $X_i$  连接到  $pNode$  上, 即第 14-19 行。

步骤 5: 传感器节点  $N_i$  处理完毕后, 将队列  $cNodes$  复制到  $pNodes$  中为处理传感器节点  $N_{i+1}$  做准备, 并清空队列  $cNodes$ 。

步骤 6: 循环结束之后, 需要为网络的尾节点添加叶子节点, 具体实现如算法 3 所示。

算法 3. Addleaf

输入:  $pNodes$ 。

```

1 for  $pNode$  in  $pNodes$  do
2    $gCDamage \leftarrow pNode.CDamage$ ,  $gValue \leftarrow pNode.Value$ ;
3   create leaf  $X_i(gValue, gCDamage+1)$ ;
4   connect leaf to  $pNode$ 's 0-edge;
5   create leaf  $X_i(gValue+1, 0)$ ;
6   connect node to  $pNode$ 's 1-edge;
7 end

```

通过对算法 1 生成的决策树进行深度优先遍历获得 LWSN 的系统状态集合, 为后续的覆盖率的分析提供样本。该算法对比基于对系统所有状态的穷列举举, 算法的时间复杂度为  $O(n^3)$ , 空间复杂度为  $O(n)$ 。

## 2.2 分析 LWSN 的覆盖率

概率感知模型依赖于传感器的相关参数, 通过调整节点的参数, 以计算节点的有效监测范围  $R_u$ 。为统计符合覆盖要求的系统状态集合  $f(\gamma)$ , 本文在算法 4 中声明一个队列  $coverageSSV$ , 其中变量  $totalLength$  为当前系统状态下的实际感知范围。同时, 还需要统计

当前系统状态下工作的节点数  $operationCount$  与失效的节点数  $dieCount$ , 为下一步的可靠性分析做准备. 算法 4 如下所示.

算法 4. 计算 LWSN 的覆盖率

输入: 节点的相关参数  $\alpha$ 、 $\omega$ , 期望感知概率  $DDP$ , 网络覆盖参数  $\gamma$ , 感知范围  $R_s$ .

输出: 队列  $coverageSSV$ .

```

1 根据式 (2) 计算节点的有效覆盖范围  $R_u$ , 并初始化队列  $coverageSSV$ 
  和变量  $totalLength$ ;
2 for  $\vec{Z}$  in  $SSVs$  do
3   判断头节点是否工作, 如工作则添加其有效覆盖范围到  $totalLength$ 
  中并且将  $operationCount$  加 1, 否则将  $dieCount$  加 1
4    $i=2$ 
5   for  $i \leq SSVs.size$  do
6     判断当前节点是否工作, 如工作则  $operationCount+1$ , 否则
     $dieCount+1$  并进行下轮循环
7     如果当前节点的右侧区域与前面  $R_s$  个节点的右侧区域存在
    重叠, 则删除重叠区域
8     计算当前节点的左侧感知区域, 共分两种情况: 1) 与左侧节点
    存在重叠, 则与左侧节点的感知区域进行合并. 2) 与左侧节点不存在
    重叠, 则直接添加其有效覆盖范围到  $totalLength$ 
9     添加当前节点的右侧区域到  $totalLength$ , 如超出边界则截断
10  end
11 根据式 (5) 计算该组的覆盖率, 如果满足要求, 则将该组添加到
     $coverageSSV$ 
12 end

```

算法 4 的具体步骤如下.

步骤 1: 首先根据传感器节点的相关参数与感知范围  $R_s$  计算节点的有效监测范围  $R_u$ , 并初始化队列  $coverageSSV$  与变量  $totalLength$ .

步骤 2: 判断系统状态向量集合是否遍历完毕. 如果是, 跳出循环, 否则继续执行. 在随后的循环过程中, 将计算每一组状态向量  $\vec{Z}$  的覆盖率.

步骤 3: 判断当前系统状态的头节点是否工作, 如果头节点工作则将其右侧区域添加到实际感知范围  $totalLength$  中. 需要注意的是, LWSN 的头节点与尾节点与中间节点的覆盖范围存在差异, 头节点只覆盖其右侧区域, 尾节点只覆盖其左侧区域, 中间节点的覆盖范围分为左右两侧区域.

步骤 4: 分析后面的节点, 如果节点失效则将变量  $dieCount$  加 1, 并进行下轮循环.

步骤 5: 如果节点工作且感知范围超过一个标准距离, 则可能会出现覆盖范围重叠的现象. 因此, 需要判断当前节点感知区域是否与前面  $R_s$  个节点的感知区域存在重叠的情况. 如果当前节点的右侧感知范围与

前面节点的右侧感知范围存在重叠, 即前面节点的右侧感知区域超过了当前节点的左侧感知区域并额外覆盖了部分右侧区域, 则删除重叠区域长度; 如果当前节点的左侧感知范围与前面节点的右侧感知范围存在重叠, 则将当前节点的左侧覆盖区域与前面节点的右侧覆盖区域做并集处理; 如果不存在重叠区域, 则将当前节点覆盖区域添加到实际覆盖范围  $totalLength$  中即可.

步骤 6: 如果当前节点的感知范围超出了网络的边界范围, 则需要对节点的覆盖区域与网络的边界区域做交集处理.

步骤 7: 最后, 判断当前系统状态的覆盖率是否符合要求, 如果符合要求则将该集合添加到队列  $coverageSSV$  中.

### 2.3 基于 Weibull 分布评估网络可靠性

考虑一个由  $n$  个传感器节点组成的线性无线传感网络, 传感器节点的故障分布满足式 (6). 给定任务时间  $t=T$ , 即可计算节点的不可靠性  $F(t)$ , 这与状态集合中的状态 0 相关联; 节点的可靠性  $1-F(t)$ , 这与状态集合中的状态 1 相关联. 对于每组符合要求的系统状态向量集合, 可根据每个节点状态的概率进行累乘处理获得当前系统状态的可靠性. 最后, 线性无线传感网络在时间  $T$  下的可靠性可以用集合  $f(\gamma)$  概率之和表示.

在分析集合  $f(\gamma)$  的可靠性过程中, 如果对  $f(\gamma)$  中节点的状态逐个分析, 则会增加算法的时间复杂度. 为了减少对  $f(\gamma)$  的遍历次数, 我们声明了变量  $operationCount$  与  $dieCount$  以统计当前系统状态下节点的状态, 因此当前系统状态的可靠性可通过式 (10) 获取:

$$P(\vec{Z}, t) = (1-F(t))^{operationCount} \times F(t)^{dieCount} \quad (10)$$

### 2.4 算法流程

具体流程如下.

(1) 为评估具有不同连通性的 LWSN, 基于算法 1 通过输入网络的总节点数  $N$  与节点的通信半径  $R_c$  获取具有不同连通性的决策树, 决策树的每条路径对应着一种 LWSN 的有效系统状态, 其中 0 边代表节点失效 1 边代表节点工作, 如果某节点连续失效的节点数  $CDamage$  等于  $R_c$  则表示网络从该处断开. 通过对该决策树深度优先遍历得到 LWSN 的系统状态集合. 其中, 算法 2 用于合并参数相同的元组以减小系统开销, 如果网络的总节点数越多则效果越明显, 算法 3 用

于为网络的尾节点添加叶子节点.

(2) 由于本文提出的算法具有通用的特点, 其中传感器节点间的距离使用一个标准距离表示, 因此传感器节点的相关参数需要对应调整. 在算法 4 中, 通过调整传感器节点的相关参数, 计算节点的有效监测范围  $R_u$ . 根据每种 LWSN 的系统状态计算其实际覆盖范围  $totalLength$ , 最后基于式 (5) 判断当前系统状态是否符合要求, 如果符合要求则将该集合添加到队列  $coverageSSV$  中, 为下一步的可靠性分析做准备.

(3) 基于 Weibull 分布统计队列  $coverageSSV$  中符合要求的系统状态集合在不同时刻出现的可能性, 以达到对 LWSN 的可靠性评估.

### 3 案例研究

在本节中, 本文将根据案例分析 LWSN 的可靠性. 假设在 LWSN 中有 18 个同构、等间距的传感器节点, 每个节点符合 Weibull 分布, 经过大量的研究表明, 式 (6) 中参数取  $\lambda=3 \times 10^{-5}$ ,  $\beta=1.2$  为宜. LWSN 的可靠性要求为覆盖长度至少达到总覆盖长度的 80%, 即 LWSN 覆盖参数  $\gamma=80%$ . 本文将基于概率感知模型分析 LWSN 的可靠性, 并与 0/1 圆盘概率模型进行对比, 得出一些结论.

本节将分别研究  $R_c$  和  $R_s$  值从 1 到 3 的各种情况. 首先, 使用算法 1 为传感器通信半径从 1 到 3 的线性无线传感网络生成决策树, 并对决策树进行遍历以获取系统状态向量集合. 然后, 基于算法 4 根据节点的相关参数计算节点的有效监测范围. 其中, 节点的相关参数与  $R_s$  相关, 本文将式 (3) 中节点的路径损耗指数  $\alpha$  恒置为 1, 通过修改节点参数  $\omega$  改变节点的感知范围. 最后根据式 (9) 计算线性无线传感网络的可靠性.

图 9 显示了采用概率感知模型对不同  $R_c$ 、 $R_s$  取值的 LWSN 的可靠性概率曲线, 表 1 列出了分析后的样本结果.

我们可以发现  $R_c=1$  的曲线远低于  $R_c=2、3$  的曲线, 这说明连通性限制了可靠性. 当  $R_c=2$  时, 由于扩大了节点的通信半径导致传感器之间增加了可替代的路径, LWSN 的连通性得到提升并导致覆盖可靠性得到提高.

此外, 当  $R_s=1$  时, 仅扩大  $R_c$  不会显著地增加 LWSN 的可靠性, 说明覆盖率同样限制了可靠性. 当  $R_c=3$  时,

对比  $R_c=2$  线性无线传感网络的覆盖可靠性明显提高. 当  $R_s=3$  时, 对比  $R_s=2$  其覆盖可靠性基本没有得到明显提高. 因此, 为了获得更多的覆盖可靠性, 我们应该使用  $R_s=2$ , 并尽可能地扩大  $R_c$ .

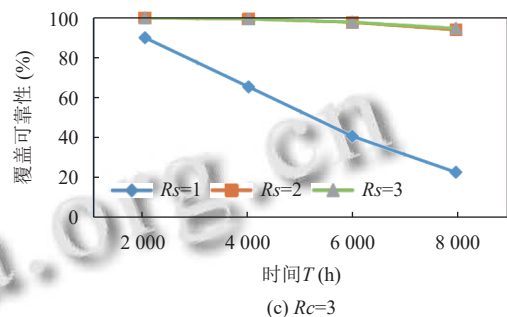
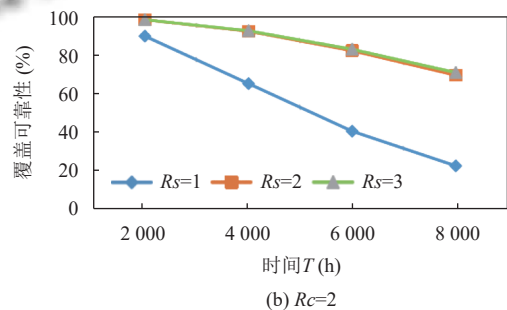
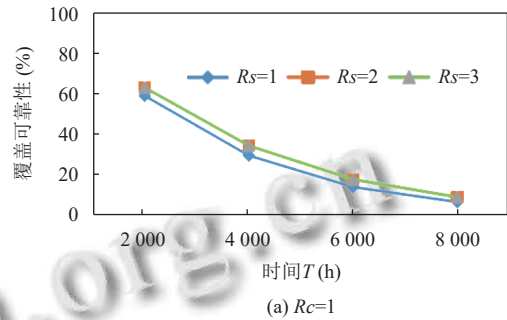


图 9 基于概率感知模型生成的特征曲线

表 1 基于概率感知模型生成的样本数据

$R_c$	$R_s$	$\omega$	$T=2000\text{ h}$	$T=4000\text{ h}$	$T=6000\text{ h}$	$T=8000\text{ h}$
1	1	0.5	0.578 746	0.284 669	0.129 53	0.055 770 4
1	2	0.3	0.619 693	0.333 079	0.167 234	0.080 002 4
1	3	0.2	0.619 693	0.333 079	0.167 234	0.080 002 4
2	1	0.5	0.899 712	0.653 008	0.405 998	0.225 861
2	2	0.3	0.984 38	0.924 305	0.821 754	0.691 555
2	3	0.2	0.984 764	0.927 591	0.831 654	0.710 809
3	1	0.5	0.900 365	0.654 631	0.407 861	0.227 38
3	2	0.3	0.999 446	0.992 924	0.968 009	0.910 361
3	3	0.2	0.999 485	0.994 378	0.978 468	0.946 609

图 10 显示了采用 0/1 圆盘感知模型对不同  $R_c$ 、 $R_s$  取值的 LWSN 的可靠性概率曲线, 表 2 列出了分析后的样本结果.

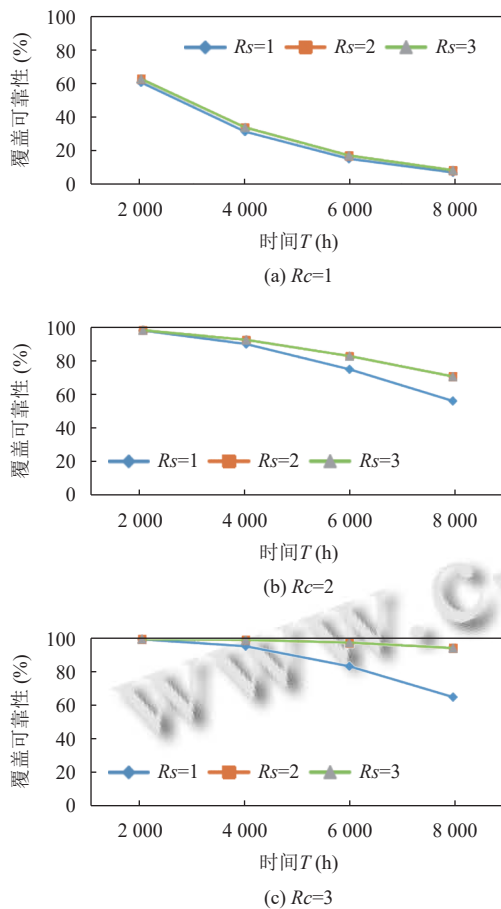


图 10 基于 0/1 圆盘感知模型生成的特征曲线

表 2 基于 0/1 圆盘感知模型生成的样本数据

$R_c$	$R_s$	$T=2000\text{ h}$	$T=4000\text{ h}$	$T=6000\text{ h}$	$T=8000\text{ h}$
1	1	0.598 87	0.307 92	0.147 18	0.066 8
1	2	0.619 693	0.333 079	0.167 234	0.080 0024
1	3	0.619 693	0.333 079	0.167 234	0.080 0024
2	1	0.982 167	0.902 646	0.753 07	0.565 759
2	2	0.984 764	0.927 591	0.831 654	0.710 809
2	3	0.984 764	0.927 591	0.831 654	0.710 809
3	1	0.997 081	0.957 005	0.838 796	0.657 465
3	2	0.999 485	0.994 377	0.978 462	0.946 551
3	3	0.999 485	0.994 377	0.978 462	0.946 551

通过对比,我们发现基于 0/1 圆盘感知模型的覆盖可靠性皆高于基于概率感知模型,原因是 0/1 圆盘感知模型会将监测失效区域纳入 LWSN 的监测范围。

当  $R_s=1$  时,由于节点之间的感知范围不存在重叠的情况,该模型会将每个节点监测失效的区域重新添加到有效的监测区域,因此其覆盖可靠性会明显高于概率感知模型。当  $R_s=2$  时,其覆盖可靠性与概率感知模型下  $R_s=3$  的覆盖可靠性近乎相同。当  $R_s=3$  时,其覆盖可靠性与  $R_s=2$  相同。

实验结果表明,仅扩大网络的连通性或覆盖率无法显著地增加 LWSN 的可靠性,需将两种指标结合同考虑。如果设计网络时需要保证网络的可靠性在 80% 以上且检测时间低于 6 000 h,则  $R_c=2$ 、 $R_s=2$  是一个很好的选择;如果监测时间超过 6 000 h,则  $R_c=3$ 、 $R_s=2$  是一个很好的选择。假设 LWSN 的可靠性  $\leq 80\%$  表示监测系统需要立即维护,可以看出在约 6 000 h 时,需要维护  $R_c$  为 2 且  $R_s=2$  的 LWSN。因此,该模型不仅可用于分析 LWSN 的可靠性,还可用于计算何时需要对 LWSN 进行维护。对比 0/1 圆盘感知模型,我们可知当  $R_s=1$  时,其可靠性相对于实际误差最大,当  $R_s=2$  时,其节点的感知范围几乎达到概率感知模型下  $R_s=3$  的程度,因此在实际工程中采用 0/1 圆盘感知模型分析线性无线传感网络的可靠性可能导致设计出的网络在任务时间内其可靠性达不到规定要求。

#### 4 结语

LWSN 的可靠性评估至关重要,用户采用合适的评估方法便可以准确地了解 LWSN 的运行状态,以便在合适的时间对网络进行维护。对比以往的研究,为忽略使模型复杂化的细节,学者们通常采用 0/1 圆盘感知模型分析 LWSN 的可靠性,在同等条件下其结果往往高于实际值。

本文提出了一种采用概率感知模型的 LWSN 可靠性分析方法,该模型对比 0/1 圆盘感知模型更加符合实际情况,通过计算传感器节点的有效监测范围,对不同  $R_c$ 、 $R_s$  的 LWSN 进行可靠性评估。经仿真实验表明,该方法能够为 LWSN 的可靠性进行更精确的评估,并且通过与 0/1 圆盘感知模型进行对比展现了其优越性,评估结果可为 LWSN 的设计提供准则。

#### 参考文献

- 唐武明. 无线传感器网络中网络安全协议的研究现状与发展趋势. 信息通信, 2015(8): 88-89.
- 直乾英. 基于智能优化的非测距无线传感器网络节点定位算法 [硕士学位论文]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022.
- 马文辉. 基于无线传感网络的野生动物定位跟踪技术应用研究 [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- Felemban E. Advanced border intrusion detection and surveillance using wireless sensor network technology. International Journal of Communications, Network and System Sciences, 2013, 6(5): 251-259. [doi: 10.4236/ijcns.



- 2013.65028]
- 5 Bin S, Sun GX. Optimal energy resources allocation method of wireless sensor networks for intelligent railway systems. *Sensors*, 2020, 20(2): 482. [doi: [10.3390/s20020482](https://doi.org/10.3390/s20020482)]
  - 6 Ahmed E, Yaqoob I, Gani A, *et al.* Internet-of-things-based smart environments: State of the art, taxonomy, and open research challenges. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(5): 10–16. [doi: [10.1109/MWC.2016.7721736](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721736)]
  - 7 Jawhar I, Mohamed N, Al-Jaroodi J, *et al.* An architecture for using autonomous underwater vehicles in wireless sensor networks for underwater pipeline monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(3): 1329–1340. [doi: [10.1109/TII.2018.2848290](https://doi.org/10.1109/TII.2018.2848290)]
  - 8 Liu Y, Ma XH, Li YT, *et al.* Water pipeline leakage detection based on machine learning and wireless sensor networks. *Sensors*, 2019, 19(23): 5086. [doi: [10.3390/s19235086](https://doi.org/10.3390/s19235086)]
  - 9 Liu Y, Chin KW, Yang CL, *et al.* Nodes deployment for coverage in rechargeable wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 6064–6073. [doi: [10.1109/TVT.2019.2912188](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2912188)]
  - 10 周亮, 徐薇. 基于传感器网络的环境监测系统的设计. *信息记录材料*, 2023, 24(9): 149–151.
  - 11 Çibuk M, Arı D, Ağgün F, *et al.* Investigation of failed node method to support healthy communication for linear wireless sensor networks. *Advanced Engineering Science*, 2022, 2: 21–26.
  - 12 Mo YC, Xing LD, Jiang JH. Modeling and analyzing linear wireless sensor networks with backbone support. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(10): 3912–3924.
  - 13 Mohamed N, Al-Jaroodi J, Jawhar I, *et al.* Reliability analysis of linear wireless sensor networks. *Proceedings of the 12th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications*. Cambridge: IEEE, 2013. 11–16.
  - 14 Tripathi A, Gupta HP, Dutta T, *et al.* Coverage and connectivity in WSNs: A survey, research issues and challenges. *IEEE Access*, 2018, 6: 26971–26992. [doi: [10.1109/ACCESS.2018.2833632](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2833632)]
  - 15 Yang HB. A practical method for connectivity and coverage reliability analysis for linear wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2023, 146: 103183. [doi: [10.1016/j.adhoc.2023.103183](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103183)]

(校对责编: 孙君艳)