



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 118338334 B

(45) 授权公告日 2024.09.27

(21) 申请号 202410761551.3

H04W 84/18 (2009.01)

(22) 申请日 2024.06.13

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 115665659 A, 2023.01.31

申请公布号 CN 118338334 A

US 2020127457 A1, 2020.04.23

(43) 申请公布日 2024.07.12

审查员 袁鸣骁

(73) 专利权人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞瑜路
1037号

(72) 发明人 朱晨露 郑武杰 阮一恒 张立杰

熊杰 侯睿 邓贤君

(74) 专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务

所(特殊普通合伙) 42222

专利代理师 薛玲

(51) Int. Cl.

H04W 24/04 (2009.01)

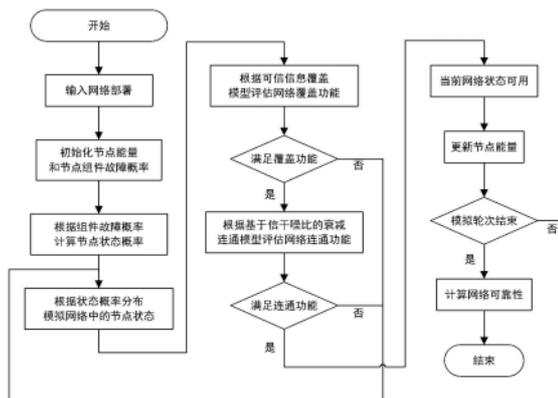
权利要求书4页 说明书11页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法及系统

(57) 摘要

本发明提供一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法及系统,所述方法包括:输入网络部署,根据物联网目标点覆盖场景建立网络模型;根据节点状态概率分布模拟网络中的节点状态,根据可信信息覆盖模型评估网络覆盖功能,判断网络的覆盖功能是否得到满足;基于信干噪比的衰减连通模型评估网络连通功能,判断网络的连通功能是否得到满足;若满足上述条件,则表示当前网络状态可用,更新网络节点能量,并判断蒙特卡罗状态模拟是否结束,最后计算网络可靠性。本发明用以解决现有技术中覆盖和连通模型较为简单、对影响可靠性的因素考虑不全面、可靠性评估算法复杂度高和难以适用于大规模网络的缺陷,实现对物联网可靠性全面、准确和高效地评估。



1. 一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤S1、输入网络部署,初始化网络节点能量和节点组件故障概率,根据物联网目标点覆盖场景建立网络模型;

步骤S2、根据节点状态概率分布模拟网络中的节点状态,以及根据可信信息覆盖模型评估网络覆盖功能,判断网络的覆盖功能是否得到满足;所述判断网络的覆盖功能是否得到满足包括:

4.1. 以变程 CR 作为边长将目标感兴趣区域划分为多个小方格,每个小方格都是一个重建区域,方格中心为重建点;

4.2. 提取所有重建区域中的重建点加入重建点集合,得到所有重建点的集合 RP ;

4.3. 遍历重建点集合 RP ,进行可信信息覆盖评估;包括:

4.3.1) 提取每个重建点所在重建区域的传感器节点和目标点,并存入相应的集合 SN_{rp} 和 TP_{rp} ;

4.3.2) 判断目标点集合 TP_{rp} 是否为空集,若为空集则跳过覆盖功能评估,否则筛选当前重建区域内,传感器节点状态为ACTIVE,且节点的当前能量可以支撑感知与收发数据的节点,存入节点集合 SN'_{rp} ;

4.3.3) 根据节点集合 SN'_{rp} 计算用于判断可信信息覆盖的时间均方根误差RMSE,如果RMSE小于根据具体应用设定的需求阈值 ϵ ,则根据可信信息覆盖模型,认为当前重建区域被可信信息覆盖,重建区域内的目标点均被可信信息覆盖;

4.4. 完成所有重建点的遍历与评估计算后,得到参与覆盖目标点的所有传感器节点的覆盖矩阵,用于指示第 j 个目标点是否被第 i 个传感器节点所可信信息覆盖;

4.5. 根据得到的覆盖矩阵,如果所有目标点均被可信信息覆盖,则认为状态 π 下的网络满足覆盖功能,进行下一步;否则返回步骤S2,进行下一轮次的状态模拟;

步骤S3、基于信干噪比的衰减连通模型评估网络连通功能,判断网络的连通功能是否得到满足;所述判断网络的连通功能是否得到满足包括:

5.1. 根据覆盖矩阵,找到并提取所有参与覆盖目标点的传感器节点集合 SP ;

5.2. 计算所述传感器节点间的欧式距离 $d(s_i, s_j)$,得到距离矩阵 DM ;

5.3. 计算两个通信节点间的信干噪比值 $SINR(s_i, s_j)$;

5.4. 将信干噪比值映射到 $[0,1]$ 区间上,得到两个通信节点间的连通系数值,并构成连通系数矩阵 CM ;

5.5. 创建一个和 CM 同等大小的测试矩阵 TM ,其元素均为随机测试阈值 $\delta_{test}(s_i, s_j)$ 组成;

5.6. 对 CM 和 TM 的每一个相对应元素进行遍历比较,如果两个节点之间的连通系数值大于测试阈值 $\delta_{test}(s_i, s_j)$,即 TM_{ij} 小于 CM_{ij} ,并且节点 s_i 处于ACTIVE或RELAY状态,同时其剩余能量可以支撑收发数据,则认为节点 s_i 与节点 s_j 是连接的,两节点能够成功通信,赋

值 $AM_{ij} = 1$,反之,则认为通信失败,并赋值 $AM_{ij} = 0$;

5.7. 当完成矩阵的元素遍历后,得到的矩阵 AM 即为网络的邻接矩阵;

5.8. 根据邻接矩阵 AM ,计算得到所有节点之间的最短路径,从而判断所有参与覆盖目标点的所有传感器节点集合 SP 与汇聚节点 $Sink$ 间的连通性;

5.9. 根据运行结果,如果上述节点均能够连通至汇聚节点,则认为状态 π 下的网络满足连通功能,状态 π 下的网络配置是可靠的,进行下一步;否则返回步骤S2,进行下一轮次的状态模拟;

步骤S4、若网络的覆盖功能和网络的连通功能都得到满足,则表示当前网络状态可用,更新网络节点能量,并判断蒙特卡罗状态模拟是否结束,最后计算网络可靠性。

2. 根据权利要求1所述的一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法,其特征在于,所述根据物联网目标点覆盖场景建立网络模型包括:

1.1. 输入具体的网络部署,确定目标感兴趣区域、传感器节点、汇聚节点和目标点的地理位置,再确定所述传感器节点的感知半径、通信半径和初始能量;其中,传感器节点包含传感单元、通信单元、处理单元和电池单元;

1.2. 确定传感器节点的故障概率,根据节点组件的故障概率计算状态分布概率;

1.3. 依据状态分布概率将传感器节点构成的无线传感器网络建模为无向图。

3. 根据权利要求1所述的一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法,其特征在于,根据节点状态概率分布模拟网络中的节点状态包括:

2.1. 令网络中可能出现的所有状态用集合 Π 表示,网络的当前状态用集合 π 表示,初始化 Π 和 π 为空集,遍历每一个传感器节点;

2.2. 根据节点状态分布概率,枚举当前节点的状态 π_i ,将枚举的状态 π_i 加入集合 π 中;其中, π_i 包括ACTIVE,RELAY,SLEEP,FAIL四种状态;

2.3. 确定网络的当前状态 π ,并将 π 加入集合 π 中。

4. 根据权利要求3所述的一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法,其特征在于,所述根据节点状态分布概率,枚举当前节点的状态 π_i ,将枚举的状态 π_i 加入集合 π 中包括:

2.2.1. 生成一个服从均匀分布的随机值 $test_{s_i}$,范围为 $0 < test_{s_i} < 1$;

2.2.2. 根据随机生成的测试值,与当前节点的状态 π_i 进行比较,进行直接抽样得到传感器节点的状态;

2.2.3. 确定传感器节点 s_i 的当前状态 π_i 。

5. 根据权利要求4所述的一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法,其特征在于,所述与当前节点的状态 π_i 进行比较,进行直接抽样得到传感器节点的状态包括:

条件1:如果 $0 < test_{s_i} \leq P_{Active}$,则传感器节点 s_i 处于ACTIVE状态下;

条件2:如果 $P_{Active} < test_{s_i} \leq P_{Active} + P_{Relay}$,则传感器节点 s_i 处于RELAY状态下;

条件3:如果 $P_{Active} + P_{Relay} < test_{s_i} \leq P_{Active} + P_{Relay} + P_{Fail}$,则传感器节点

s_i 处于FAIL状态下;

条件4:如果 $test_{s_i} > P_{Active} + P_{Relay} + P_{Fail}$,则传感器节点 s_i 处于SLEEP状态下;其中, P_{Active} 、 P_{Relay} 、 P_{Sleep} 、 P_{Fail} 分别表示节点在运行过程中处于ACTIVE,RELAY,SLEEP,FAIL的分布概率。

6.根据权利要求1所述的一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法,其特征在于,所述更新网络节点能量包括:

在判断当前状态下的网络配置是否满足覆盖功能和连通功能后,更新每个节点的剩余能量,来模拟现实网络中节点用于感知和通信所消耗的能量,并结束一轮的蒙特卡罗状态模拟。

7.根据权利要求1所述的一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法,其特征在于,所述判断蒙特卡罗状态模拟是否结束包括:

若模拟轮次未结束,则返回步骤S2,进行下一轮次的状态模拟;否则模拟结束,进行下一步。

8.一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估系统,其特征在于,包括:

网络模型建立模块用于输入网络部署,初始化网络节点能量和节点组件故障概率,根据物联网目标点覆盖场景建立网络模型;

网络覆盖功能判断模块,用于根据节点状态概率分布模拟网络中的节点状态,以及根据可信信息覆盖模型评估网络覆盖功能,判断网络的覆盖功能是否得到满足;所述判断网络的覆盖功能是否得到满足包括:

4.1.以变程 CR 作为边长将目标感兴趣区域划分为多个小方格,每个小方格都是一个重建区域,方格中心为重建点;

4.2.提取所有重建区域中的重建点加入重建点集合,得到所有重建点的集合 RP ;

4.3.遍历重建点集合 RP ,进行可信信息覆盖评估;包括:

4.3.1)提取每个重建点所在重建区域的传感器节点和目标点,并存入相应的集合 SN_{rp} 和 TP_{rp} ;

4.3.2)判断目标点集合 TP_{rp} 是否为空集,若为空集则跳过覆盖功能评估,否则筛选当前重建区域内,传感器节点状态为ACTIVE,且节点的当前能量可以支撑感知与收发数据的节点,存入节点集合 SN'_{rp} ;

4.3.3)根据节点集合 SN'_{rp} 计算用于判断可信信息覆盖的时间均方根误差RMSE,如果RMSE小于根据具体应用设定的需求阈值 ϵ ,则根据可信信息覆盖模型,认为当前重建区域被可信信息覆盖,重建区域内的目标点均被可信信息覆盖;

4.4.完成所有重建点的遍历与评估计算后,得到参与覆盖目标点的所有传感器节点的覆盖矩阵,用于指示第 j 个目标点是否被第 i 个传感器节点所可信信息覆盖;

4.5.根据得到的覆盖矩阵,如果所有目标点均被可信信息覆盖,则认为状态 π 下的网络满足覆盖功能,进行下一步;否则返回步骤S2,进行下一轮次的状态模拟;

网络连通功能判断模块,用于基于信干噪比的衰减连通模型评估网络连通功能,判断

网络的连通功能是否得到满足;所述判断网络的连通功能是否得到满足包括:

- 5.1. 根据覆盖矩阵,找到并提取所有参与覆盖目标点的传感器节点集合 SP ;
- 5.2. 计算所述传感器节点间的欧式距离 $d(s_i, s_j)$,得到距离矩阵 DM ;
- 5.3. 计算两个通信节点间的信干噪比值 $SINR(s_i, s_j)$;
- 5.4. 将信干噪比值映射到 $[0,1]$ 区间上,得到两个通信节点间的连通系数值,并构成连通系数矩阵 CM ;
- 5.5. 创建一个和 CM 同等大小的测试矩阵 TM ,其元素均为随机测试阈值 $\delta_{test}(s_i, s_j)$ 组成;
- 5.6. 对 CM 和 TM 的每一个相对应元素进行遍历比较,如果两个节点之间的连通系数值大于测试阈值 $\delta_{test}(s_i, s_j)$,即 TM_{ij} 小于 CM_{ij} ,并且节点 s_i 处于ACTIVE或RELAY状态,同时其剩余能量可以支撑收发数据,则认为节点 s_i 与节点 s_j 是连接的,两节点能够成功通信,赋值 $AM_{ij} = 1$,反之,则认为通信失败,并赋值 $AM_{ij} = 0$;
- 5.7. 当完成矩阵的元素遍历后,得到的矩阵 AM 即为网络的邻接矩阵;
- 5.8. 根据邻接矩阵 AM ,计算得到所有节点之间的最短路径,从而判断所有参与覆盖目标点的所有传感器节点集合 SP 与汇聚节点 $Sink$ 间的连通性;
- 5.9. 根据运行结果,如果上述节点均能够连通至汇聚节点,则认为状态 π 下的网络满足连通功能,状态 π 下的网络配置是可靠的,进行下一步;否则返回步骤S2,进行下一轮次的状态模拟;

网络可靠性计算模块,若网络的覆盖功能和网络的连通功能都得到满足,则表示当前网络状态可用,更新网络节点能量,并判断蒙特卡罗状态模拟是否结束,最后计算网络可靠性。

一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及物联网技术领域,尤其涉及一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法及系统。

背景技术

[0002] 无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)因其具有分布式、自组织、动态拓扑、快速部署和低成本等优点,被广泛应用于环境监测、灾难预警、医疗保健、国防军事、监视系统和目标追踪等关键技术领域,它被认为是实现物联网(Internet of Thing, IoT)的使能技术之一,在检测事件和测量感兴趣的物理或环境现象方面发挥着关键作用。

[0003] 网络可靠性是衡量物联网性能的核心指标之一,许多重要的物联网应用都具有任务关键型的特点,对网络可靠性也有着严格的要求,它反映了系统在规定条件下,在预定时间内完成指定任务的能力,一旦网络出现故障未能检测到目标兴趣区域(Region of Interest, RoI)中事件或现象的发生,将会产生严重影响。因此,在网络的设计和部署阶段,必须解决可靠性问题。

[0004] 通常一个典型的WSN通常由大量廉价的传感器节点组成,通过随机或确定性部署的方式实现对目标点或目标区域的感知覆盖,同时传感器节点可以通过单跳或多跳的方式将感知到的数据传输到汇聚节点,以完成监测等任务。因此,一个网络的可靠性,主要通过判断其是否满足覆盖和连通功能来评估。现有的可靠性评估方法多为精确可靠性评估方法,它们被证明是NP-hard问题,随着网络规模的提升,很难在较短时间内完成可靠性的评估与计算。且目前的大部分工作均使用较为简单的覆盖和连通模型,没有充分考虑影响可靠性的其它因素,可能造成对可靠性的高估或是低估,不符合实际应用。因此,拟针对关键物联网应用中的目标监测场景,基于蒙特卡罗状态模拟方法,综合考虑能量消耗、覆盖和连通功能,实现对物联网可靠性准确、高效地多维评估。

发明内容

[0005] 针对现有技术中存在的技术问题,本发明提供一种基于蒙特卡罗模拟的物联网可靠性多维评估方法及系统,用以解决现有技术中覆盖和连通模型较为简单、对影响可靠性的因素考虑不全面、可靠性评估算法复杂度高和难以适用于大规模网络的缺陷,实现对物联网可靠性全面、准确和高效地评估。

[0006] 根据本发明的第一方面,本发明提供一种基于蒙特卡罗模拟的物联网可靠性多维评估方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤S1、输入网络部署,初始化网络节点能量和节点组件故障概率,根据物联网目标点覆盖场景建立网络模型;

[0008] 步骤S2、根据节点状态概率分布模拟网络中的节点状态,以及根据可信信息覆盖模型评估网络覆盖功能,判断网络的覆盖功能是否得到满足;

[0009] 步骤S3、基于信干噪比的衰减连通模型评估网络连通功能,判断网络的连通功能

是否得到满足；

[0010] 步骤S4、若满足上述条件，则表示当前网络状态可用，更新网络节点能量，并判断蒙特卡罗状态模拟是否结束，最后计算网络可靠性。

[0011] 在上述技术方案的基础上，本发明还可以作出如下改进。

[0012] 可选的，所述根据物联网目标点覆盖场景建立网络模型包括：

[0013] 1.1. 输入具体的网络部署，确定目标感兴趣区域、传感器节点、汇聚节点和目标点的地理位置，在确定所述传感器节点的感知半径、通信半径和初始能量；其中，传感器节点包含传感单元、通信单元、处理单元和电池单元；

[0014] 1.2. 确定传感器节点的故障概率，根据节点组件的故障概率计算状态分布概率；

[0015] 1.3. 依据状态分布概率将传感器节点构成的无线传感器网络建模为无向图。

[0016] 可选的，根据节点状态概率分布模拟网络中的节点状态包括：

[0017] 2.1. 令网络中可能出现的所有状态用集合 Π 表示，网络的当前状态用集合 π 表示，初始化 Π 和 π 为空集，然后遍历每一个传感器节点；

[0018] 2.2. 根据节点状态分布概率，枚举当前节点的状态 π_i ，将枚举的状态 π_i 加入集合 π 中；其中， π_i 包括ACTIVE, RELAY, SLEEP, FAIL四种状态；

[0019] 2.3. 确定网络的当前状态 π ，并将 π 加入集合 π 中。

[0020] 可选的，所述根据节点状态分布概率，枚举当前节点的状态 π_i ，将枚举的状态 π_i 加入集合 π 中包括：

[0021] 2.2.1. 生成一个服从均匀分布的随机值 $test_{s_i}$ ，范围为 $0 < test_{s_i} < 1$ ；

[0022] 2.2.2. 根据随机生成的测试值，与当前节点的状态 π_i 进行比较，进行直接抽样得到传感器节点的状态；

[0023] 2.2.3. 确定传感器节点 s_i 的当前状态 π_i 。

[0024] 可选的，所述与当前节点的状态 π_i 进行比较，进行直接抽样得到传感器节点的状态包括：

[0025] 条件1: 如果 $0 < test_{s_i} \leq P_{Active}$ ，则传感器节点 s_i 处于ACTIVE状态下；

[0026] 条件2: 如果 $P_{Active} < test_{s_i} \leq P_{Active} + P_{Relay}$ ，则传感器节点 s_i 处于RELAY状态下；

[0027] 条件3: 如果 $P_{Active} + P_{Relay} < test_{s_i} \leq P_{Active} + P_{Relay} + P_{Fail}$ ，则传感器节点 s_i 处于FAIL状态下；

[0028] 条件4: 如果 $test_{s_i} > P_{Active} + P_{Relay} + P_{Fail}$ ，则传感器节点 s_i 处于SLEEP状态下。

[0029] 可选的，所述判断网络的覆盖功能是否得到满足包括：

[0030] 4.1. 以变程CR作为边长将目标感兴趣区域划分为多个小方格，每个小方格都是一个重建区域，方格中心为重建点；

[0031] 4.2. 提取所有重建区域中的重建点加入重建点集合，得到所有重建点的集合RP；

- [0032] 4.3. 遍历重建点集合 RP , 进行可信信息覆盖评估;
- [0033] 4.4. 完成所有重建点的遍历与评估计算后, 得到参与覆盖目标点的所有传感器节点的覆盖矩阵;
- [0034] 4.5. 根据得到覆盖矩阵, 如果所有目标点均被可信信息覆盖, 则认为状态 π 下的网络满足覆盖功能, 进行下一步; 否则返回步骤S2, 进行下一轮次的状态模拟。
- [0035] 可选的, 所述判断网络的连通功能是否得到满足包括:
- [0036] 5.1. 根据覆盖矩阵, 找到并提取所有参与覆盖目标点的传感器节点集合 SP ;
- [0037] 5.2. 计算所述传感器节点间的欧式距离 $d(s_i, s_j)$, 得到距离矩阵 DM ;
- [0038] 5.3. 计算两个通信节点间的信干噪比值 $SINR(s_i, s_j)$;
- [0039] 5.4. 将信干噪比值映射到 $[0, 1]$ 区间上, 得到两个通信节点间的连通系数值, 并构成连通系数矩阵 CM ;
- [0040] 5.5. 创建一个和 CM 同等大小的测试矩阵 TM , 其元素均为随机测试阈值 $\delta_{test}(s_i, s_j)$ 组成;
- [0041] 5.6. 对 CM 和 TM 的每一个相对应元素进行遍历比较, 如果两个节点之间的连通系数值大于测试阈值 $\delta_{test}(s_i, s_j)$, 也即 TM_{ij} 小于 CM_{ij} , 并且节点 s_i 处于ACTIVE或RELAY状态, 同时其剩余能量可以支撑收发数据, 则认为节点 s_i 与节点 s_j 是连接的, 两节点可以成功通信, 并赋值 $AM_{ij} = 1$, 反之, 则认为通信失败, 并赋值 $AM_{ij} = 0$;
- [0042] 5.7. 当完成矩阵的元素遍历后, 得到的矩阵 AM 即为网络的邻接矩阵;
- [0043] 5.8. 根据邻接矩阵 AM , 计算得到所有节点之间的最短路径, 从而判断所有参与覆盖目标点的所有传感器节点集合 SP 与汇聚节点Sink间的连通性;
- [0044] 5.9. 根据运行结果, 如果这些节点均可以连通至汇聚节点, 则认为状态 π 下的网络满足连通功能, 状态 π 下的网络配置是可靠的, 进行下一步; 否则返回步骤S2, 进行下一轮次的状态模拟。
- [0045] 可选的, 所述更新网络节点能量包括:
- [0046] 在判断当前状态下的网络配置是否满足覆盖功能和连通功能后, 更新每个节点的剩余能量, 来模拟现实网络中节点用于感知和通信所消耗的能量, 并结束一轮的蒙特卡罗状态模拟。
- [0047] 可选的, 所述判断蒙特卡罗状态模拟是否结束包括:
- [0048] 若模拟轮次未结束, 则返回步骤S2, 进行下一轮次的状态模拟; 否则模拟结束, 进行下一步。
- [0049] 根据本发明的第二方面, 提供一种基于蒙特卡罗模拟的物联网可靠性多维评估系统, 包括:
- [0050] 网络模型建立模块, 用于输入网络部署, 初始化网络节点能量和节点组件故障概率, 根据物联网目标点覆盖场景建立网络模型;

[0051] 网络覆盖功能判断模块,用于根据节点状态概率分布模拟网络中的节点状态,以及根据可信信息覆盖模型评估网络覆盖功能,判断网络的覆盖功能是否得到满足;

[0052] 网络连通功能判断模块,用于基于信干噪比的衰减连通模型评估网络连通功能,判断网络的连通功能是否得到满足;

[0053] 网络可靠性计算模块,若满足上述条件,则表示当前网络状态可用,更新网络节点能量,并判断蒙特卡罗状态模拟是否结束,最后计算网络可靠性。

[0054] 本发明的技术效果和优点:

[0055] 本发明提供了一种基于蒙特卡罗模拟的物联网可靠性多维评估方法及系统,通过使用蒙特卡罗模拟方法模拟了传感器节点因四种组件故障和工作/休眠占空比而变化的四种工作状态,还原了无线传感器网络在运行过程中的能量消耗和状态变化,对关键目标点全覆盖可靠性TFCR进行评估计算。用以解决现有技术中覆盖和连通模型较为简单、对影响可靠性的因素考虑不全面、可靠性评估算法复杂度高和难以适用于大规模网络的缺陷,实现对物联网可靠性全面、准确和高效地评估。

附图说明

[0056] 图1为本发明实施例提供的物联网可靠性多维评估方法的流程示意图;

[0057] 图2为本发明实施例提供的物联网目标点覆盖场景下的网络模型示意图。

具体实施方式

[0058] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明中的附图,对本发明中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0059] 现有的用于评估和计算物联网可靠性的方法主要分为两类,一类是基于精确可靠性的计算方法,包括组合式方法,如二元决策图,故障生成树和状态枚举等。

[0060] Deif等人将传感器节点建模为三模式系统,将可靠性定义为网络在任务时间内正常运行的概率,并通过组合数学与搜索算法枚举所有可用状态来计算网络的精确可靠性。Chakraborty等人研究了具有多状态节点的WSN的可靠性,并且提出了一种改进的不相交乘积求和方法,利用枚举的最短最小路径来评估WSN的可靠性。这些方法通常需要先计算出所有最小切割或最小路径(minimal cuts (MCs)、minimal paths (MPs)),然后通过使用包含-排除法或不相交乘积的总和(sum-of-disjoint method or inclusion-exclusion method)来计算可靠性,然而它们被证明是 NP-Hard 问题,很难适用于大规模网络的可靠性评估。

[0061] 另一类是基于近似可靠性的计算方法,例如寻找尽可能少的最小切割或最小路径,或是找到趋近于可靠性精确值的边界来间接地计算可靠性。Yeh等人认为对于高可靠性网络,计算近似可靠性比精确可靠性更实用,他们提出了一个基于二进制加法树的算法BAT的可靠性精确值下界用于计算二进制状态网络的近似可靠性。Xiao等人使用三阶张量来统一表示和建模节点状态、节点组合和覆盖模式,采用更为准确的可信信息覆盖模型替换传统的二进制圆盘覆盖模型,并提出了一种网格聚类连通性算法,以降低评估大规模网络连

通性时的计算复杂度。

[0062] 同时还有一种主流的近似可靠性计算方法为模拟仿真法,如基于马尔可夫模型的方法和蒙特卡罗模拟仿真法等。Xiang等人认为WSN正常工作的条件是互连并连接到接收节点的传感器节点的数量不少于所需的最小数量,并提出了广义终端信度和平均广义终端信度,同时给出了使用代数图论和蒙特卡罗模拟的相应计算方法。Chakraborty等人在可靠性评估方面展开了深入的研究,他们考虑了传感器节点的工作睡眠占空比和能量消耗,并使用蒙特卡罗模拟方法配合马尔可夫状态转移方程,模拟了节点在整个网络运行期间可能出现的工作状态,以此来评估网络的近似可靠性。文中的可靠性定义为网络在任务时间内满足覆盖率并保持连通的概率。

[0063] 综上所述,使用蒙特卡罗模拟方法来计算近似可靠性被认为是目前的主流可靠性评估方法。对于覆盖可靠性的计算,大部分算法使用圆盘模型等较为简单理想的覆盖模型来评估,这对于网络整体可靠性的评估是不准确的,不符合实际应用。对于连通可靠性的计算,许多算法仅考虑无线传感器节点可能出现的节点故障,并没有考虑实际通信时无线链路可能存在的干扰和噪声问题。同时,部分算法未考虑无线传感器节点的能量有限且电池不可充电,仅将节点建模为简单的工作和故障状态,未考虑实际应用中节点存在一个工作睡眠占空比来节约能量消耗的问题。

[0064] 可以理解的是,基于背景技术中的缺陷,本发明实施例提出了一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法,用于对具体的网络部署进行可靠性评估与计算,具体如图1所示,所述方法包括如下步骤:

[0065] 步骤S1,输入网络部署,初始化网络节点能量和节点组件故障概率,根据物联网目标点覆盖场景建立网络模型;

[0066] 所述建立网络模型具体包括:

[0067] 1.1)输入具体的网络部署,确定目标感兴趣区域RoI、传感器节点SN、汇聚节点Sink和目标点TP的地理位置;在确定传感器节点的感知半径 R_s 、通信半径 R_c 和初始能量 E_{in} ;

[0068] 1.2)将传感器节点建模为多状态多组件系统;

[0069] 1.3)将传感器节点构成的无线传感器网络建模为无向图 $G = \{SN \cup \{Sink\}, Link\}$,其中,Link为传感器节点间形成的通信链路。

[0070] 图2展示了本实施例所建立的无线传感器网络模型,图中,网络中的传感器节点由于其组件故障和工作睡眠占空比可能处于四种状态。其中激活节点可用于覆盖,所覆盖区域如图中淡粉色阴影所示;激活节点和中继节点可用于通信,所形成的通信链路如图中黑灰色线条所示,而休眠节点和故障节点无法参与覆盖和通信。

[0071] 其中,传感器节点包含传感单元、通信单元、处理单元和电池单元四个组件。所述将传感器节点建模为多状态多组件系统包括:

[0072] 1.2.1)确定传感器节点的四个组件的故障概率,分别为 λ_s 、 λ_c 、 λ_p 和 λ_b ;

[0073] 1.2.2)传感器节点遵循随机工作/睡眠占空比 α ,节点在运行过程中可能处于ACTIVE,RELAY,SLEEP,FAIL四种状态,根据节点组件的故障概率按下列公式计算上述状态

分布概率,分别用 P_{Active} 、 P_{Relay} 、 P_{Sleep} 、 P_{Fail} 表示;

$$[0074] \quad P_{Active} = (1 - \lambda_s) \cdot (1 - \lambda_c) \cdot (1 - \lambda_p) \cdot (1 - \lambda_b) \cdot \alpha \quad (1)$$

$$[0075] \quad P_{Relay} = \lambda_s \cdot (1 - \lambda_c) \cdot (1 - \lambda_p) \cdot (1 - \lambda_b) \cdot \alpha \quad (2)$$

$$[0076] \quad P_{Sleep} = 1 - \alpha \quad (3)$$

$$[0077] \quad P_{Fail} = 1 - P_{Active} - P_{Relay} - P_{Sleep} \quad (4)$$

[0078] 步骤S2,根据节点状态概率分布模拟网络中的节点状态,以及根据可信信息覆盖模型评估网络覆盖功能,判断网络的覆盖功能是否得到满足;

[0079] 在本实施例中,根据节点状态概率分布模拟网络中的节点状态包括如下步骤:

[0080] 2.1) 令网络中可能出现的所有状态用集合 Π 表示,网络的当前状态用集合 π 表示,初始化 Π 和 π 为空集,然后遍历每一个传感器节点;

[0081] 2.2) 根据节点状态分布概率,枚举当前节点的状态 π_i ;其中 π_i 只属于ACTIVE, RELAY, SLEEP, FAIL四种状态,并将枚举的状态 π_i 加入集合 π 中;

[0082] (2.3) 确定网络的当前状态 π ,并将 π 加入集合 π 中;

[0083] 具体地,在步骤2.2)中,所述根据节点状态分布概率,枚举当前节点的状态 π_i 具体包括:

[0084] 2.2.1) 生成一个服从均匀分布的随机值 $test_{s_i}$,范围为 $0 < test_{s_i} < 1$;

[0085] 2.2.2) 根据这个随机生成的测试值,与以下条件进行比较,进行直接抽样得到传感器节点的状态;

[0086] 条件1: $0 < test_{s_i} \leq P_{Active}$,如果生成的测试值属于这一类,则传感器节点 s_i 处于ACTIVE状态下。

[0087] 条件2: $P_{Active} < test_{s_i} \leq P_{Active} + P_{Relay}$,如果生成的测试值属于这一类,则传感器节点 s_i 处于RELAY状态下。

[0088] 条件3: $P_{Active} + P_{Relay} < test_{s_i} \leq P_{Active} + P_{Relay} + P_{Fail}$,生成的测试值属于这一类,则传感器节点 s_i 处于FAIL状态下。

[0089] 条件4: $test_{s_i} > P_{Active} + P_{Relay} + P_{Fail}$,如果生成的测试值属于这一类,则传感器节点 s_i 处于SLEEP状态下。

[0090] 2.2.3) 确定传感器节点 s_i 的当前状态 π_i 。

[0091] 上述技术方案中,定义关键目标点全覆盖可靠性为无线传感器网络可以成功监测所有目标点,并将监测数据传输至汇聚节点的概率。在根据可信信息覆盖模型评估网络覆盖功能,它需要满足能量条件、覆盖条件和连通条件来确保WSN的网络功能得到满足;其中,

[0092] 条件1:能量条件:传感器节点的剩余能量 E_{res} 应当支持对应节点状态在接下来一轮周期内继续工作所需的最小能量;例如处于RELAY状态的节点需满足 $E_{res} \geq E_{relay}$ 。

[0093] 传感器节点的能耗根据其工作状态而有所不同,主要由感知 E_{Sen} 、发送 E_{Tx} 和接收数据 E_{Rx} 三部分组成。各状态节点的能耗如下列公式所示,特别的是,处于SLEEP状态的

节点是休眠状态下的节点,在休眠结束后它将恢复正常工作,我们规定其能耗为比例系数乘上ACTIVE节点能耗或RELAY节点能耗,这取决于它由何种状态转换而来;而处于FAIL状态的节点已经永久失去了正常工作的能力,无法感知和传输数据,因此其不产生能耗。

$$[0094] \quad E_{active} = E_{Tx} + E_{Rx} + E_{Sen} \quad (5)$$

$$[0095] \quad E_{relay} = E_{Tx} + E_{Rx} \quad (6)$$

$$[0096] \quad E_{sleep} = \begin{cases} 0.70588 \times E_{active} \\ 0.70588 \times E_{relay} \end{cases} \quad (7)$$

$$[0097] \quad E_{fail} = 0 \quad (8)$$

[0098] 条件2:覆盖条件:网络总体覆盖率应满足具体应用的覆盖要求 θ_{req} ,并且网络应能完全可信信息覆盖所有关键目标点。

[0099] 在可信信息覆盖模型中,对于一个需要估计环境变量的空间点,称其为重建点 \mathbf{x} ,在重建点变程(Correlation Range, CR)范围内的区域,称其为重建区域,只有在重建区域内的传感器所测量的环境变量值才与重建点具有空间相关性。通过使用原始克里金插值技术作为重建函数,利用在重建区域内的传感器节点 $\mathbf{S}(\mathbf{x})$ 的测量值 $\mathbf{z}(s_i)$,可以得到重建区域的估计值 $\hat{\mathbf{z}}(\mathbf{x})$,原始克里金插值采用的线性估计量如下:

$$[0100] \quad \hat{\mathbf{z}}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{|\mathbf{S}(\mathbf{x})|} \lambda_i \mathbf{z}(s_i), s_i \in \mathbf{S}(\mathbf{x}) \quad (9)$$

[0101] 其中 λ 为原始克里金插值中的插值权重,根据原始克里金插值的无偏属性,其权重和为1。

[0102] 使用 $\mathbf{z}_t(\mathbf{x})$ 表示重建点在时间 t 的真实测量值, $\hat{\mathbf{z}}_t(\mathbf{x})$ 表示它的估计值。针对不同的应用场景,对重建质量的需求也不同,对于一个具体的应用,一般可以设置一个重建质量的需求阈值 ε ,并通过时间平均均方根误差(Roost Mean Square Error, RMSE) $\Phi(\mathbf{x})$ 来衡量评估该重建区域内的重建质量和重建精度。

$$[0103] \quad \Phi(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\mathbf{z}_t(\mathbf{x}) - \hat{\mathbf{z}}_t(\mathbf{x}))^2} \quad (10)$$

[0104] 与此同时,通过最小化克里金变量,可以得到一组最优的插值权重:

$$[0105] \quad \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(s_1, s_1) & \cdots & \gamma(s_1, s_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(s_n, s_1) & \cdots & \gamma(s_n, s_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma(s_1, \mathbf{x}) \\ \vdots \\ \gamma(s_n, \mathbf{x}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

[0106] 其中 $\gamma(s_i, s_j)$ 是节点 s_i 和节点 s_j 之间的空间相关性, $\gamma(s_i, \mathbf{x})$ 是节点 s_i 和重建点 \mathbf{x} 之间的空间相关性,它们均可以根据变差函数进行计算,不同的变差函数适用于不同的空间地理环境,通常可以选用高斯变差函数来表示空间相关性特征,并以此计算得到 $\gamma(s_i, s_j)$:

$$[0107] \quad \gamma(s_i, s_j) = \begin{cases} 0, & d = 0 \\ C_0 + C(1 - e^{-\frac{d^2}{CR^2}}), & d \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

[0108] 其中 d 为 s_i 和 s_j 间的欧氏距离,CR表示变程,常数 C_0 称之为块金(nugget),

$C_0 + C$ 称之为基台值(sill),当 $C_0 = 0, C = 1$ 时,称之为标准高斯模型。

[0109] 根据所选的变差函数以及得到的最优插值权重,可以将RMSE表示为

$$[0110] \quad \Phi(x) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (z_t(x) - \hat{z}_t(x))^2} \quad (13)$$

[0111] 根据可信信息覆盖模型,当这个估计误差 $\Phi(x)$ 小于需求阈值 ε 时,则认为该重建点 x 所处的重建区域被可信信息覆盖。

[0112] 由此,判断网络的覆盖功能是否得到满足具体包括:

[0113] 4.1)以变程 CR 作为边长将目标感兴趣区域划分为多个小方格,每个小方格都是一个重建区域,方格中心为重建点;

[0114] 4.2)提取所有重建区域中的重建点加入重建点集合,得到所有重建点的集合 RP ;

[0115] 4.3)遍历重建点集合 RP ,进行可信信息覆盖评估;

[0116] 4.4)完成所有重建点的遍历与评估计算后,得到参与覆盖目标点的所有传感器节点的覆盖矩阵,用于指示第 j 个目标点是否被第 i 个传感器节点所可信信息覆盖;

[0117] 4.5)根据覆盖矩阵,如果所有目标点均被可信信息覆盖,则认为状态 π 下的网络满足覆盖功能,进行下一步;否则返回步骤S2,进行下一轮次的状态模拟。

[0118] 在步骤4.3)中,所述遍历重建点集合 RP ,进行可信信息覆盖评估具体包括:

[0119] 4.3.1)提取每个重建点所在重建区域的传感器节点和目标点,并存入相应的集合 SN_{rp} 和 TP_{rp} ;

[0120] 4.3.2)判断目标点集合 TP_{rp} 是否为空集,若为空集则跳过覆盖功能评估,否则筛选当前重建区域内,传感器节点状态为ACTIVE,且节点的当前能量可以支撑感知与收发数据的节点,存入节点集合 SN'_{rp} ;

[0121] 4.3.3)根据节点集合 SN'_{rp} 计算用于判断可信信息覆盖的时间均方根误差RMSE,如果RMSE小于根据具体应用设定的需求阈值 ε ,则根据可信信息覆盖模型,认为当前重建区域被可信信息覆盖,重建区域内的目标点均被可信信息覆盖。

[0122] 步骤S3,基于信噪比的衰减连通模型评估网络连通功能,判断网络的连通功能是否得到满足;

[0123] 在上述步骤中,还需满足:条件3:连通条件:网络应能将传感器节点感知到的数据通过单跳或多跳的方式传输至汇聚节点。

[0124] 考虑无线通信过程中的随机性影响,当通信链路的终端节点 s_i 和 s_j 均处于ACTIVE或RELAY状态,并且它们有足够的能量进行数据传输时,使用测试阈值 $\delta_{test}(s_i, s_j)$ 表示节点 s_j 可以成功接收和解码所需的最小可接受的信噪比值,并计算两个通信节点间的连通系数值,也即是归一化后的信噪比值,如果两个节点之间的连通系数值大于测试阈值,则认为可以建立通信链路。

[0125] 在本实施例中,判断网络的连通功能是否得到满足具体包括:

[0126] 5.1) 根据覆盖矩阵,找到并提取所有参与覆盖目标点的传感器节点集合**SP**;

[0127] 5.2) 计算这些传感器节点间(包括汇聚节点)的欧式距离 $d(s_i, s_j)$,如下列公式所示,并得到一个大小为 $(N_{SP} + 1) \times (N_{SP} + 1)$ 的距离矩阵**DM**,其中 $N_{SP} + 1$ 表示所有参与覆盖目标点的传感器节点集合**SP**,并加上汇聚节点的节点数量;

$$[0128] \quad d(s_i, s_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (14)$$

[0129] 其中, \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 分别表示传感器节点的横坐标和纵坐标;

[0130] 5.3) 使用如下公式计算两个通信节点间的信噪比值**SINR** (s_i, s_j):

$$[0131] \quad \text{SINR}(s_i, s_j) = \frac{1}{1 + \sum_{k \in \mathcal{X}, k \neq i} \frac{1}{(d(s_k, s_j))^\alpha}} \quad (15)$$

[0132] 其中, $d(s_i, s_j)$ 为简化信噪比的计算,传感器节点的无线信号传输功率 P_t 与环境噪声功率电平平均设置为常数1,传感器节点集合 \mathcal{X} 设定为在传感器节点 s_i 的预定通信半径 R_c 内的具有通信能力的传感器节点集合,也即是处于ACTIVE或RELAY状态的节点集合;

[0133] 5.4) 按下列公式取对数归一化,将信噪比值映射到 $[0, 1]$ 区间上,得到两个通信节点间的连通系数值,也即是归一化后的信噪比值,并构成一个大小为 $(N_{SP} + 1) \times (N_{SP} + 1)$ 的连通系数矩阵**CM**:

$$[0134] \quad \text{SINR}_n = 1 - \frac{1}{1 + \log(1 + \text{SINR})} \quad (16)$$

[0135] 5.5) 考虑无线通信过程中的随机性影响,将生成遵循均匀分布 $0 < \delta_{test}(s_i, s_j) \leq 1$ 的随机测试阈值以代替临界信噪比值 δ_{min} 。具体来说,将创建一个和**CM**同等大小的测试矩阵**TM**,其元素均为随机测试阈值 $\delta_{test}(s_i, s_j)$ 组成;

[0136] 5.6) 对**CM**和**TM**的每一个相对应元素进行遍历比较,如果两个节点之间的连通系数值大于测试阈值 $\delta_{test}(s_i, s_j)$,也即是 TM_{ij} 小于 CM_{ij} ,并且节点 s_i 处于ACTIVE或RELAY状态,同时其剩余能量可以支撑收发数据,则认为节点 s_i 与节点 s_j 是连接的,两节点可以成功通信,并赋值 $\text{AM}_{ij} = 1$,反之,则认为通信失败,并赋值 $\text{AM}_{ij} = 0$;

[0137] 5.7) 当完成矩阵的元素遍历后,得到的矩阵**AM**即为网络的邻接矩阵;

[0138] 5.8) 根据邻接矩阵**AM**,使用Floyd-Warshall算法计算得到所有节点之间的最短路径,从而判断所有参与覆盖目标点的所有传感器节点集合**SP**与汇聚节点**Sink**间的连通性;

[0139] 5.9) 根据运行结果,如果这些节点均可以连通至汇聚节点,则认为状态 π 下的网络满足连通功能,状态 π 下的网络配置是可靠的,进行下一步;否则返回步骤S2,进行下一轮次的状态模拟。

[0140] 步骤S4、若满足上述条件,则表示当前网络状态可用,更新网络节点能量,并判断蒙特卡罗状态模拟是否结束,最后计算网络可靠性。

[0141] 上述技术方案中,在判断当前状态下的网络配置是否满足覆盖功能和连通功能后,更新每个节点的剩余能量,来模拟现实网络中,节点用于感知和通信所消耗的能量,并结束一轮的蒙特卡罗状态模拟;

$$[0142] \quad E_{res} = E_{cur} - E_{sen} - E_{Tx} - E_{Rx} \quad (17)$$

[0143] 其中 E_{res} 表示剩余能量, E_{cur} 表示当前能量, E_{sen} 表示感知消耗的能量, E_{Tx} 和 E_{Rx} 表示收发数据消耗的能量;

[0144] 所述判断蒙特卡罗状态模拟是否结束包括:

[0145] 若模拟轮次未结束,则返回步骤S2,进行下一轮次的状态模拟;否则模拟结束,进行下一步。

[0146] 最后,计算网络可靠性包括:在所有的蒙特卡罗状态模拟结束后,目标点全覆盖可靠性可以计算为无线传感器网络可以成功监测所有目标点,并将监测数据传输至汇聚节点的概率,具体的可靠性计算公式可推导为:可用网络配置数量比上模拟的全部网络配置数量,如下列公式所示;

$$[0147] \quad TFCR = \text{可用网络状态} / \text{全部网络状态} \quad (18)$$

[0148] 综上,本发明实施例所述的一种基于蒙特卡罗的物联网可靠性多维评估方法具有如下技术效果:

[0149] (1) 本方法考虑了无线传感器网络中传感器节点的四中组件故障,引入了更符合网络现实应用中为节省能量而采用的工作/休眠占空比机制,并真实还原了网络节点的四中工作状态变化情况;

[0150] (2) 本方法采用更加准确现实的模型来刻画现实网络中的节点覆盖情况和节点连通关系,从多个维度准确地评估物联网可靠性,避免了低估可靠性带来的网络部署成本过高,也避免了高估可靠性可能导致的网络故障发生;

[0151] (3) 本方法采用基于蒙特卡罗状态模拟的近似可靠性计算方法,来高效地计算物联网可靠性,避开了精确可靠性计算方法中的NP-hard问题,极大地降低计算复杂度,可适用于大规模的网络场景。

[0152] 根据本发明的第二方面,还提供一种基于蒙特卡罗模拟的物联网可靠性多维评估系统,包括:

[0153] 网络模型建立模块,用于输入网络部署,初始化网络节点能量和节点组件故障概率,根据物联网目标点覆盖场景建立网络模型;

[0154] 网络覆盖功能判断模块,用于根据节点状态概率分布模拟网络中的节点状态,以及根据可信信息覆盖模型评估网络覆盖功能,判断网络的覆盖功能是否得到满足;

[0155] 网络连通功能判断模块,用于基于信噪比的衰减连通模型评估网络连通功能,判断网络的连通功能是否得到满足;

[0156] 网络可靠性计算模块,若满足上述条件,则表示当前网络状态可用,更新网络节点能量,并判断蒙特卡罗状态模拟是否结束,最后计算网络可靠性。

[0157] 可以理解的是,本发明提供的一种基于蒙特卡罗模拟的物联网可靠性多维评估系统与前述各实施例提供的一种基于蒙特卡罗模拟的物联网可靠性多维评估方法相对应,一种基于蒙特卡罗模拟的物联网可靠性多维评估系统的相关技术特征可参考一种基于蒙特

卡罗模拟的物联网可靠性多维评估方法的相关技术特征,在此不再赘述。

[0158] 通过以上的实施方式的描述,本领域的技术人员可以清楚地了解到各实施方式可借助软件加必需的通用硬件平台的方式来实现,当然也可以通过硬件。基于这样的理解,上述技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品可以存储在计算机可读存储介质中,如ROM/RAM、磁碟、光盘等,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备等)执行各个实施例或者实施例的某些部分所述的方法。

[0159] 最后应说明的是:以上实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

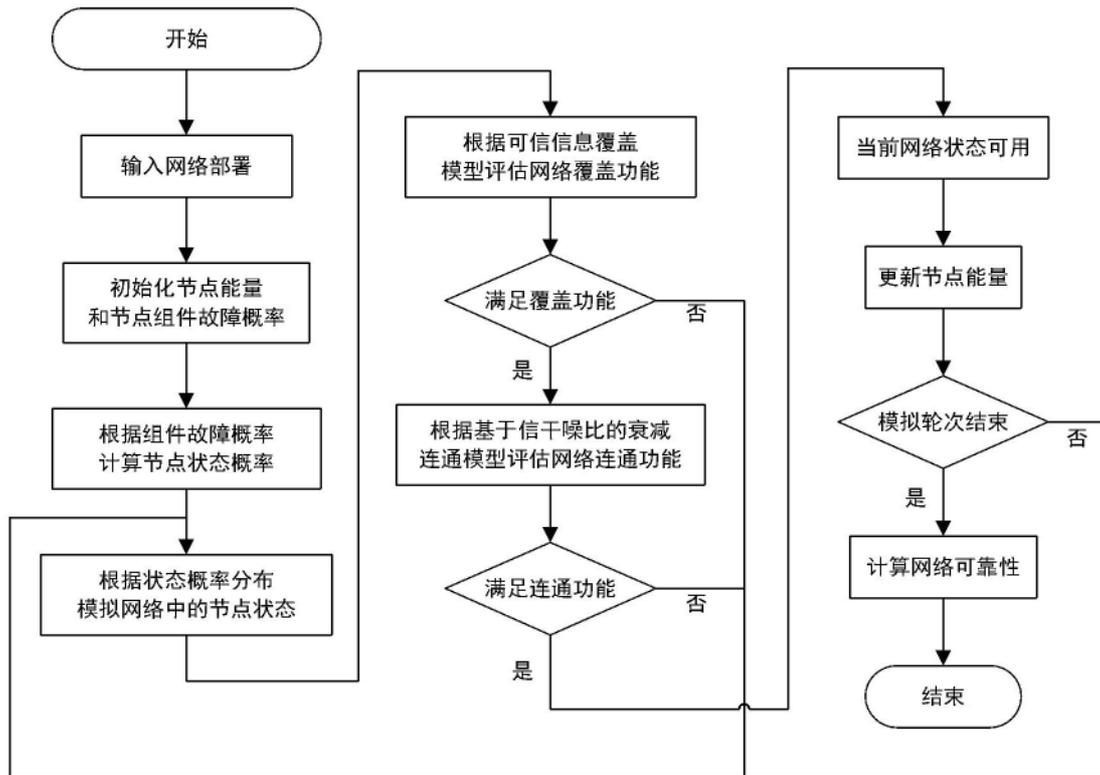


图1

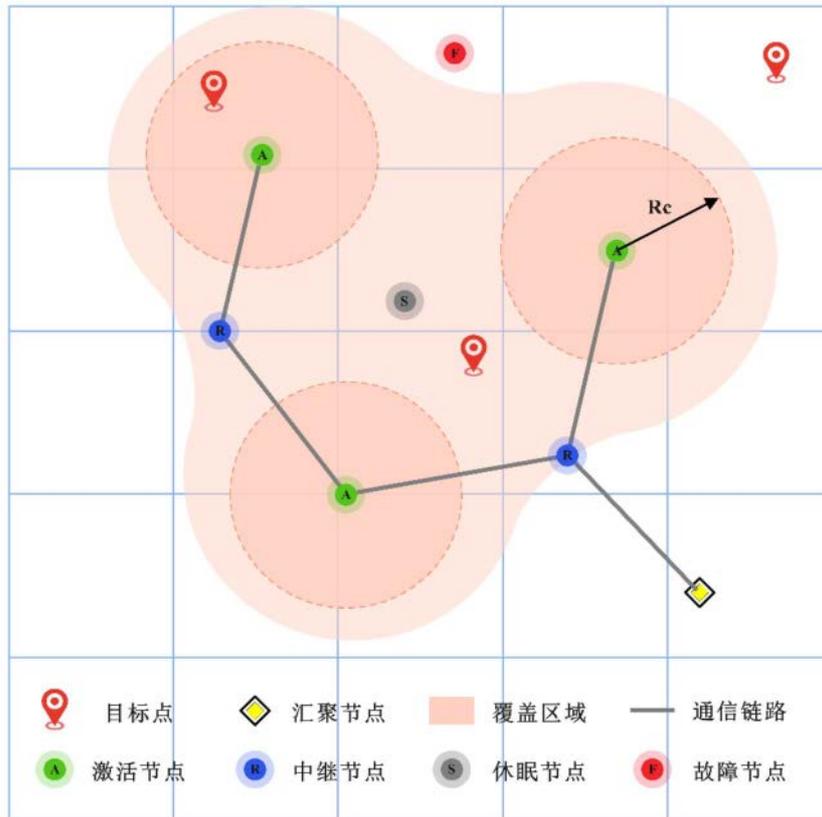


图2