

Energy-Bounded Reliability Modeling for Wireless Sensor Networks*

ZHOU Qiang*, XIONG Hua-gang, ZHANG You-guang

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The wireless sensor network (WSN) system is a kind of system in which the consumer energy of a task is strictly bounded. This paper proposed a model of the system and a model of the task which consider energy consume based on task, introduced the energy factor function, and also established a reliability model of WSN based on task. Finally, an illustration of modeling of representative hierarchical cluster topology in WSN was also presented. This method suggested that the method studied has a directive influence to both task division and topology selection of WSN system.

Key words: wireless sensor network; reliability model; task reliability; energy-bounded

EEACC:6150P;0170N

基于能量约束的无线传感器网络可靠性研究

周 强*, 熊华钢, 张有光

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京, 100083)

摘 要: 针对传感器网络系统(WSN)对任务完成所需能量有约束的特点, 首先建立了 WSN 系统的网络模型和任务模型, 引入了能量权函数, 建立了基于任务的无线传感器网络系统可靠性模型, 最后针对无线传感器网络的典型层次簇拓扑结构, 给出了建模实例。该方法为 WSN 系统的任务级划分与拓扑结构的选择和优化提供依据和参考。

关键词: 无线传感器网络; 可靠性模型; 任务可靠性; 能量因素

中图分类号: TP393; TP919.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)07-1217-05

信息技术正推动着一场新的军事变革。无线传感器网络(Wireless Sensor Network, 简称 WSN)以其随机布设、自组织、适应恶劣环境下信息的获取和采集, 在核、化学、军事等领域具有广泛的应用潜力。在这些特殊的应用环境下, 通常要求系统能够满足关键任务的可靠性要求。WSN 属于典型的分布式网络系统, 与集中式系统不同, 前者由密集型、低成本、随机分布的节点组成的, 并具有可靠性高、抗打击能力强、系统可降级使用、易于扩充等特点, 尤其适合于作战系统在部分节点失效的情况下仍能够完成特定任务的需要^[1-3]。这类系统的可靠性在保证系统能否完成正常功能及系统性能方面至关重要。因此对 WSN 开展可靠性能研究是国内外关注的重要研究领域之一。

WSN 系统属于能量限制的分布式网络系统, 现有文献考虑具有能量约束条件的 WSN 系统可靠性建模的并不多见。文献[4-6]从连通性这一最基本的要求出发研究网络系统冗余和连通可靠性问题: 文献[4]针对 Ad hoc 网络的连通性进行了研究; 文献[5]和文献[6]分别对 WSN 的 1 点、2 点和多点

连通性来考查系统可靠性。文献[7]对 WSN 进行了多级簇结构的可靠性描述, 采用连通性和覆盖性对基本簇单元进行可靠性研究。以上文献仅从抗毁性测度的角度来研究 WSN 系统的可靠性, 没有引入其它影响因素的研究。文献[8-9]将 WSN 网络系统可靠性与系统的功能联系起来, 综合考查连通性测度以外的多种因素对可靠性的影响。文献[8]综合考虑连通性测度和安全性测度, 对 WSN 系统可靠性进行评价。文献[9]在考虑连通性测度的基础上, 引入了消息延迟指标, 从有效性测度的角度综合考查系统的可靠性。但是, 以上文献均没有引入能量限制的可靠性模型。

本文针对上述 WSN 系统可靠性建模研究中没有充分考虑系统的能量因素(WSN 系统中任务具有能量约束)的不足之处, 首先建立了 WSN 系统的网络模型和任务模型, 然后通过在网络系统可靠性模型中引入能量权函数建立了基于任务的无线传感器网络系统可靠性模型, 最后针对无线传感器网络的典型层次簇拓扑结构, 给出了建模实例。

1 WSN网络结构和节点模型

1.1 网络结构

无线传感器网络是由大量的密集部署在监控区域的智能传感器节点构成的一种网络应用系统。通常传感器节点数量众多,在任意时刻,节点间通过无线信道连接,采用多跳(multi-hop)、对等(peer to peer)通信方式,自组织网络拓扑结构。传感器节点间具有很强的协同能力,通过局部的数据采集、预处理以及节点间的数据交换来完成全局任务。无线传感器网络系统如图1所示,由大量无线传感器节点和汇聚节点(sink)^[2]组成。传感器节点散布在指定的感知区域内,每个节点都可以收集数据,并通过多跳路由方式把数据传送到sink,sink也可以用同样的方式将信息发送给各节点。sink直接与Internet或通信卫星相连,通过Internet或通信卫星实现任务管理节点(即观察者)与传感器之间的通信^[3]。

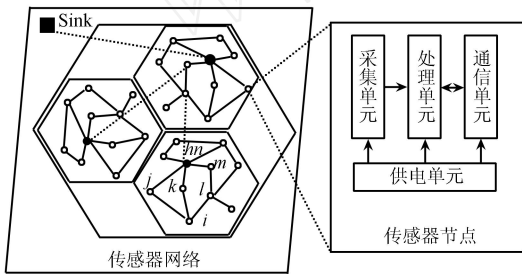


图1 传感器节点模型和网络结构

1.2 节点模型

WSN的基本组成单位是节点,节点具有传感、信号处理和无线通信功能,由处理单元、通信单元、采集单元和供电单元四部分构成,如图1所示。对于节点间的信息交换通常需要处理单元和通信单元的参与。由于采集单元只是在源节点发生作用,不参与转发节点信息交换;因此,假定采集单元始终处于正常工作情况。

2 WSN网络任务模型

网络系统中节点间信息的交换过程依赖互连网络。某一计算任务的完成,不但依赖本地节点的资源,且要求与其他节点进行通信,获取资源。在WSN网络系统中,参与信息交互的节点可以有2个、多个或者包括系统中所有的节点,本文考虑2个节点之间进行信息交互的情况。

2.1 基于能量限制的任务模型

定义任务 T 用三元组 $[S, D, E]$ 表示,其中

S 代表任务的源节点;

D 代表任务的目的节点;

E 代表任务消息单跳传输(从某一节点不需中继直接传输到下一节点)所需要的最大能量消耗。

因此 $T_{S,D,E}$ 表示源节点为 S ,目的节点为 D ,消息单跳传输最大能量消耗为 E 的任务。

2.2 任务的可用路径集

将网络系统结构抽象为系统节点和无线通信链路的集合。系统节点包含处理单元和通信单元,由于在WSN中是无线通信链路,其功能通过通信单元来实现;因此,系统由一系列节点单元集(包括处理单元集和通信单元集)构成。任务 $T_{S,D,E}$ 执行过程当中对应的系统节点的有序排列构成了任务的路径,用 $r_{S,D,E}$ 表示。在复杂拓扑网络中任务的路径可能有多个,其数目设为 $k_{S,D}$ 。

由于WSN具有能量约束的特点,所以任务的完成依赖路径的连通性,也依赖路径上各节点的能量特性,即并不是所有的连通路都能保证任务的完成,能够满足任务完成的路径集合构成任务的可用路径集。设任务 $T_{S,D,E}$ 的某一路径 $r_{S,D,E}^i$ (节点顺序为 $n_1^i, n_2^i, \dots, n_j^i, \dots, n_h^i$,其中 h 表示该路径所经历的节点的数目),用 $E_{n_j^i, n_{j+1}^i}$ 表示该路径中消息从节点 n_j^i 单跳传输至节点 n_{j+1}^i 所需的能耗;用 $E_{n_j^i}$ 表示节点 n_j^i 的可用能量(power available,简称PA,节点可用能量就是节点当前的剩余能量^[2]),定义加权函数:

$$F(i) = \begin{cases} 1 & E_{n_j^i, n_{j+1}^i} \leq E_{n_j^i} (j = 1, 2, \dots, h - 1) \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (1)$$

该式表明只有当路径上所有节点的可用能量 $E_{n_j^i}$ 均不小于任务消息单跳传输能量 $E_{n_j^i, n_{j+1}^i}$ 时,该路径才是可用路径。任务 $T_{S,D,E}$ 的可用路径集 $R_{S,D,E}$ 为:

$$R_{S,D,E} = \{ r_{S,D,E}^i \mid i = 1, \dots, k_{S,D} \} = \{ F(i) \cdot r_{S,D,E}^i \mid i = 1, \dots, k_{S,D} \} \quad (2)$$

其中,任务 $T_{S,D,E}$ 的第 i 条路径 $r_{S,D,E}^i$ 由节点单元集(包括处理单元集和通信单元集)组成,分别以 $P_{r_{S,D,E}^i}$ 和 $C_{r_{S,D,E}^i}$ 表示

$$P_{r_{S,D,E}^i} = \{ p_{r_{S,D,E}^i}^j \mid p_{r_{S,D,E}^i}^j \in r_{S,D,E}^i \} \quad (3)$$

$$C_{r_{S,D,E}^i} = \{ c_{r_{S,D,E}^i}^j \mid c_{r_{S,D,E}^i}^j \in r_{S,D,E}^i \} \quad (4)$$

任务 $T_{S,D,E}$ 的处理单元集表示为

$$P_{T_{S,D,E}} = \bigcup_{i=1}^{k_{S,D}} P_{r_{S,D,E}^i} \quad (5)$$

通信单元集表示为

$$C_{T_{S,D,E}} = \bigcup_{i=1}^{k_{S,D}} C_{r_{S,D,E}^i} \quad (6)$$

3 WSN可靠性模型

3.1 前提和假设

对于由 M 个节点组成的WSN系统,假设:

网络系统中的处理单元和通信单元都不可靠,但是只有正常工作和故障两种状态,处理单元与通信单元的故障相互独立,失效率可以不同。

系统中的任务数为 m , 从而构成系统的任务集 $= \{ T_{S,D,E}^k / k = 1, 2, \dots, m \}$ 。

3.2 单一任务的可靠度

任务 $T_{S,D,E}$ 的完成可以具有多条冗余路径, 任务 $T_{S,D,E}$ 的第 i 条路径 $r_{S,D,E}^i$ 的可靠度 $R_{S,D,E}^i$ 定义为路径 $r_{S,D,E}^i$ 的处理单元集 $P_{S,D,E}^i$ 和通信单元集 $C_{S,D,E}^i$ 正常工作的概率, 即

$$R_{S,D,E}^i = \Pr\{r_{S,D,E}^i\} = \Pr(P_{S,D,E}^i) \cdot \Pr(C_{S,D,E}^i) \quad (7)$$

任务 $T_{S,D,E}$ 的可靠度 $R_{T_{S,D,E}}$ 定义为任务的路径集 $R_{S,D,E}$ 中至少有一条路径正常工作的概率, 即

$$R_{T_{S,D,E}} = \Pr\left\{ \bigcup_{i=1}^{k_{S,D}} r_{S,D,E}^i \right\} \quad (8)$$

根据相容事件的概率公式^[10], 上式可表示为

$$R_{T_{S,D,E}} = \Pr\left\{ \bigcup_{i=1}^{k_{S,D}} r_{S,D,E}^i \right\} = \Pr\{r_{S,D,E}^1\} - \sum_{i < j = 2}^{k_{S,D}} \Pr\{r_{S,D,E}^i \cap r_{S,D,E}^j\} + \sum_{i < j < h = 3}^{k_{S,D}} \Pr\{r_{S,D,E}^i \cap r_{S,D,E}^j \cap r_{S,D,E}^h\} + \dots + (-1)^{k_{S,D}+1} \cdot \Pr\{r_{S,D,E}^1 \cap r_{S,D,E}^2 \cap \dots \cap r_{S,D,E}^{k_{S,D}}\} \quad (9)$$

4 实例分析

WSN 系统拓扑组织非常灵活, 在不同的应用中往往采用不同的拓扑形式, 拓扑选择对任务乃至系统可靠性有重要的影响, 因此对拓扑形式进行可靠性评价在 WSN 系统总体设计中占有至关重要的地位。通常, 面对 WSN 节点规模较大的特点, 需要构建适宜的拓扑结构, 层次化簇是无线传感器网络拓扑的有效方式, 这里讨论的簇是由唯一根节点发起形成的“单晶”方式^[11], 各级簇头具有树结构(如图 2 所示)。针对图 2 所示的典型 WSN 网络簇拓扑^[7], 利用本文所述基于任务的方法对其进行可靠性建模分析。图 2 所示的分簇式传感器网络结构分为两个层次: 从层 L_1 到层 L_n 各级簇头; 最低

级别簇内结构。

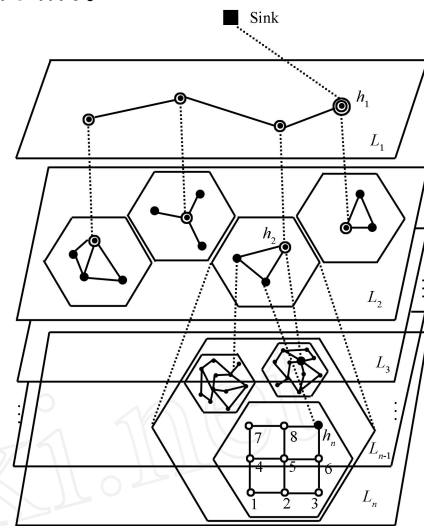


图 2 分簇式传感器网络结构

设任务 $T_{1,sink}$ 表示源点为 1、宿点为 sink 的任务, 其中 1 为第 L_n 层中最低层簇内的节点, 任务 $T_{1,sink}$ 所对应的路径如下表 1 所示, 根据簇拓扑的特点, 这些路径对应的簇层为 $L_n, L_{n-1}, \dots, L_1, sink$; 因此, 除最低层簇以外, 各级簇头采用树型结构, 该部分的路径不变, 始终为 $h_{n-1}, \dots, h_1, sink$, 而最低层簇内可采用多种复杂结构, 任务可存在多个路径(如图 2 和表 1 所示): 路径 1, 2, 3, 6, h_n 、路径 1, 2, 5, 8, h_n 、路径 1, 4, 5, 6, h_n 等。因此, 任务 $T_{1,sink}$ 的可靠度分两个部分, 可表示为下式:

$$R_{T_{1,sink}} = R_{T_{h(n-1),sink}} \cdot R_{T_{1,h(n)}} \quad (10)$$

其中, n 表示簇的深度, $h(w) = h_w (w = 1, \dots, n)$; $R_{T_{h(n-1),sink}}$ 表示路径在簇头部分的可靠度; 而 $R_{T_{1,h(n)}}$ 表示最低层簇内(简称簇内)的可靠度。由簇的定义和式(7)有

$$R_{T_{h(n-1),sink}} = \Pr(P_{T_{h(n-1),sink}}) \cdot \Pr(C_{T_{h(n-1),sink}}) \quad (11)$$

表 1 任务的路径及其簇层

路径标号	路径	路径对应的簇层
1	1, 2, 3, 6, $h_n, h_{n-1}, \dots, h_1, sink$	$L_n \rightarrow L_{n-1} \rightarrow \dots \rightarrow L_1 \rightarrow sink$
2	1, 2, 5, 8, $h_n, h_{n-1}, \dots, h_1, sink$	$L_n \rightarrow L_{n-1} \rightarrow \dots \rightarrow L_1 \rightarrow sink$
3	1, 4, 5, 6, $h_n, h_{n-1}, \dots, h_1, sink$	$L_n \rightarrow L_{n-1} \rightarrow \dots \rightarrow L_1 \rightarrow sink$
...	其它路径	$L_n \rightarrow L_{n-1} \rightarrow \dots \rightarrow L_1 \rightarrow sink$

下面从簇内和系统两个层次进行 WSN 网络簇拓扑的可靠度研究, 针对簇内可将其看作一个包含任务集的系统, 按照前述基于能量限制的可靠性建模方法开展研究。

这里, 考查图 2 所示的 WSN 网络系统中任务集 $= \{ T_{1,sink,2}, T_{3,sink,2}, T_{7,sink,2} \} (m = 3)$ 的可靠性。根据式(11)该任务集对应于簇内子系统的任务集 $= \{ T_{1,h(n),2}, T_{3,h(n),2}, T_{7,h(n),2} \} (m = 3)$ 。为便于讨论, 做以下假定:

假设所有通信单元和处理单元具有相同的失效率; 又为了反映部件失效率对系统可靠度的影响, 将待考查单元失效率的动态范围设为 $1e-1 \sim 1e-3$ 。

假设当前簇内节点的可用能量^[2]分别为(见图 3): $E_1 = E_3 = E_4 = E_5 = E_6 = E_8 = 2; E_2 = E_7 = 1$; 各级簇头的可用能量分别为: $E_{h(n)} = E_{h(n-1)} = \dots = E_{h(1)} = E_{sink} = 2$; 消息单跳传输所需的能耗分别为: $E_{2,3} = E_{2,5} = E_{5,6} = E_{7,8} = 1.5; E_{1,2} = E_{1,4} = E_{4,7} = E_{5,8} = E_{4,5} = E_{3,6} = E_{8,h(n)} = E_{6,h(n)} = 2$ 。

根据本文中的可靠性建模方法,按照图2最低簇内组织结构(网状形式)路由规则,找出任务的源节点到目的节点的路径(包括处理单元集和通信单元集),得到各个任务源节点和目的节点之间的处理单元集和通信单元集,如表2至表4所示。通过编制计算机程序,分别求得,各种单元在上述失效率的水平时,各个任务的可靠度。

从表2中可以看出,在任务 $T_{1,h(n),2}$ 的所有路径中,只有路径4和路径5能满足该任务的能量限制要求,其它路径虽然在路由规则下具有连通性,但是不能满足任务的能量限制要求,因此在计算系统基于任务的可靠度时应予以排除。同理,表3至表4也分别给出了任务 $T_{3,h(n),2}$ 和任务 $T_{7,h(n),2}$ 的路径及其可用性情况。根据式(7) - 式(9),可计算得到各任务的可靠

度结果,如任务 $T_{1,h(n),2}$ 的可靠度计算公式为式(12)。

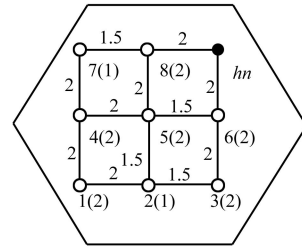


图3 簇内节点当前能量及消息单跳传输能耗

$$R_{T_{1,h(n),2}} = \Pr\left\{ \prod_{i=1}^2 r_{i,h(n),2} \right\} = \Pr(r_{1,h(n),2}^1) + \Pr(r_{1,h(n),2}^2) - \Pr(r_{1,h(n),2}^1 \cdot r_{1,h(n),2}^2) = \Pr(P_{T_{1,h(n),2}}^1) \cdot \Pr(C_{T_{1,h(n),2}}^1) + \Pr(P_{T_{1,h(n),2}}^2) \cdot \Pr(C_{T_{1,h(n),2}}^2) - \Pr(P_{T_{1,h(n),2}}^1 \cdot P_{T_{1,h(n),2}}^2) \cdot \Pr(C_{T_{1,h(n),2}}^1 \cdot C_{T_{1,h(n),2}}^2) \quad (12)$$

表2 任务 $T_{1,h(n),2}$ 的路径及其处理单元集和通信单元集

序号	路径	处理单元集	通信单元集	能量权 $f(\cdot)$	是否可用
1	1, 2, 3, 6, h_n	$p_1, p_2, p_3, p_6, p_{h(n)}$	$c_1, c_2, c_3, c_6, c_{h(n)}$	0	N
2	1, 2, 5, 6, h_n	$p_1, p_2, p_5, p_6, p_{h(n)}$	$c_1, c_2, c_5, c_6, c_{h(n)}$	0	N
3	1, 2, 5, 8, h_n	$p_1, p_2, p_5, p_8, p_{h(n)}$	$c_1, c_2, c_5, c_8, c_{h(n)}$	0	N
4	1, 4, 5, 8, h_n	$p_1, p_4, p_5, p_8, p_{h(n)}$	$c_1, c_4, c_5, c_8, c_{h(n)}$	1	Y
5	1, 4, 5, 6, h_n	$p_1, p_4, p_5, p_6, p_{h(n)}$	$c_1, c_4, c_5, c_6, c_{h(n)}$	1	Y
6	1, 4, 7, 8, h_n	$p_1, p_4, p_7, p_8, p_{h(n)}$	$c_1, c_4, c_7, c_8, c_{h(n)}$	0	N
...	其它路径	均为0	N

表3 任务 $T_{3,h(n),2}$ 的路径及其处理单元集和通信单元集

序号	路径	处理单元集	通信单元集	能量权 $f(\cdot)$	是否可用
1	3, 6, h_n	$p_3, p_6, p_{h(n)}$	$c_3, c_6, c_{h(n)}$	1	Y
2	3, 6, 5, 8, h_n	$p_3, p_6, p_5, p_8, p_{h(n)}$	$c_3, c_6, c_5, c_8, c_{h(n)}$	1	Y
3	3, 6, 5, 4, 7, 8, h_n	$p_3, p_6, p_5, p_4, p_7, p_8, p_{h(n)}$	$c_3, c_6, c_5, c_4, c_7, c_8, c_{h(n)}$	0	N
4	3, 6, 5, 2, 1, 4, 7, 8, h_n	$p_3, p_6, p_5, p_2, p_1, p_4, p_7, p_8, p_{h(n)}$	$c_3, c_6, c_5, c_2, c_1, c_4, c_7, c_8, c_{h(n)}$	0	N
5	3, 2, 5, 6, h_n	$p_3, p_2, p_5, p_6, p_{h(n)}$	$c_3, c_2, c_5, c_6, c_{h(n)}$	0	N
6	3, 2, 5, 8, h_n	$p_3, p_2, p_5, p_8, p_{h(n)}$	$c_3, c_2, c_5, c_8, c_{h(n)}$	0	N
7	3, 2, 5, 4, 7, 8, h_n	$p_3, p_2, p_5, p_4, p_7, p_8, p_{h(n)}$	$c_3, c_2, c_5, c_4, c_7, c_8, c_{h(n)}$	0	N
8	3, 2, 1, 4, 7, 8, h_n	$p_3, p_2, p_1, p_4, p_7, p_8, p_{h(n)}$	$c_3, c_2, c_1, c_4, c_7, c_8, c_{h(n)}$	0	N
9	3, 2, 1, 4, 5, 8, h_n	$p_3, p_2, p_1, p_4, p_5, p_8, p_{h(n)}$	$c_3, c_2, c_1, c_4, c_5, c_8, c_{h(n)}$	0	N
10	3, 2, 1, 4, 5, 6, h_n	$p_3, p_2, p_1, p_4, p_5, p_6, p_{h(n)}$	$c_3, c_2, c_1, c_4, c_5, c_6, c_{h(n)}$	0	N

表4 任务 $T_{7,h(n),2}$ 的路径及其处理单元集和通信单元集

序号	路径	处理单元集	通信单元集	能量权 $f(\cdot)$	是否可用
1	7, 8, h_n	$p_7, p_8, p_{h(n)}$	$c_7, c_8, c_{h(n)}$	0	N
2	7, 8, 5, 6, h_n	$p_7, p_8, p_5, p_6, p_{h(n)}$	$c_7, c_8, c_5, c_6, c_{h(n)}$	0	N
3	7, 8, 5, 2, 3, 6, h_n	$p_7, p_8, p_5, p_2, p_3, p_6, p_{h(n)}$	$c_7, c_8, c_5, c_2, c_3, c_6, c_{h(n)}$	0	N
4	7, 8, 5, 4, 1, 2, 3, 6, h_n	$p_7, p_8, p_5, p_4, p_1, p_2, p_3, p_6, p_{h(n)}$	$c_7, c_8, c_5, c_4, c_1, c_2, c_3, c_6, c_{h(n)}$	0	N
5	7, 4, 5, 8, h_n	$p_7, p_4, p_5, p_8, p_{h(n)}$	$c_7, c_4, c_5, c_8, c_{h(n)}$	0	N
6	7, 4, 5, 6, h_n	$p_7, p_4, p_5, p_6, p_{h(n)}$	$c_7, c_4, c_5, c_6, c_{h(n)}$	0	N
7	7, 4, 5, 2, 3, 6, h_n	$p_7, p_4, p_5, p_2, p_3, p_6, p_{h(n)}$	$c_7, c_4, c_5, c_2, c_3, c_6, c_{h(n)}$	0	N
8	7, 4, 1, 2, 3, 6, h_n	$p_7, p_4, p_1, p_2, p_3, p_6, p_{h(n)}$	$c_7, c_4, c_1, c_2, c_3, c_6, c_{h(n)}$	0	N
9	7, 4, 1, 2, 5, 6, h_n	$p_7, p_4, p_1, p_2, p_5, p_6, p_{h(n)}$	$c_7, c_4, c_1, c_2, c_5, c_6, c_{h(n)}$	0	N
10	7, 4, 1, 2, 5, 8, h_n	$p_7, p_4, p_1, p_2, p_5, p_8, p_{h(n)}$	$c_7, c_4, c_1, c_2, c_5, c_8, c_{h(n)}$	0	N

从而可得任务 $T_{1,h(n),2}$ 的可靠度计算结果,再由式(10) ~ 式(12)可进一步计算出 $T_{1,sink,2}$ 的可靠度结果,并由此得到任务集 和 中各任务的可靠度。图4至图5给出簇深 $n=5$ 时,部件单元失效率 ($e=1-r$; e 表示失效率; r 表示可靠率) 与任务可靠度的关系图。

图中表明以下结果:

随着通信单元和处理单元失效率的增大,各任务的可靠度不断降低;这说明,通过提高基本单元的可靠性可改善任务可靠度指标。

任务 $T_{3,h(5),2}$ 和 $T_{7,h(5),2}$ (或 $T_{3,sink,2}$ 和 $T_{7,sink,2}$) 在不考虑能量因素限制时,具有相同的可靠度,这是与两者的拓扑对称性相一致的。

当考虑能量因素限制时,任务 $T_{3,h(5),2}$ (或

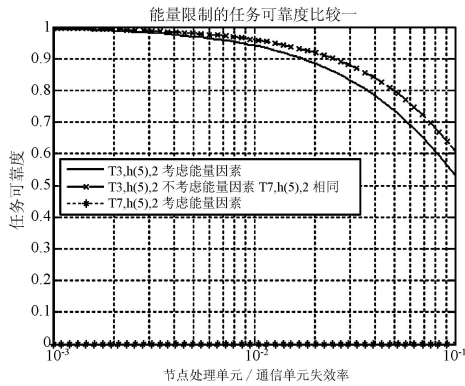


图 4 能量限制对簇内任务可靠度的影响

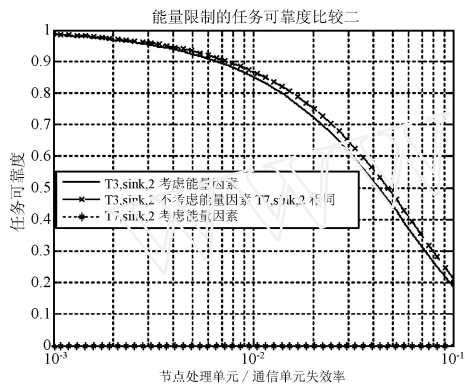


图 5 能量限制对系统任务可靠度的影响

$T_{3, sink, 2}$ 的可用路径减少到 2 条(如表 3 所示),与无能量因素限制时相比可靠度有一定的降低,说明能量限制对该种任务的有一定影响。

当考虑能量因素限制时,由于任务 $T_{7, h(5), 2}$ (或 $T_{7, sink, 2}$) 没有一条可用路径,则其可靠度为 0,不能完成任务,说明能量限制对该种任务的影响是巨大的。

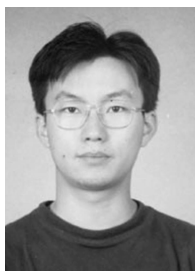
5 结论

WSN 系统可靠性建模的目的是为了指导可靠性指标的正确分配以及系统拓扑组织的评价。本文在分布式系统可靠性建模研究的基础上,充分考虑 WSN 系统具有能量限制、系统规模大、分布式的特点,建立了基于能量约束的任务的网络系统可靠性

模型。通过针对典型 WSN 簇结构的实例分析可以看出,并不是系统内所有的路径都是能量限制任务的实际可用路径。通过引入能量权函数建立了基于任务的无线传感器网络系统可靠性模型,该方法使得在分配 WSN 系统等具有能量约束条件的网络控制系统的可靠性时可以充分结合系统的实际要求,更全面地反映系统特性。进而对 WSN 系统的任务级划分与拓扑结构的选择和优化提供依据和参考。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W, et al. Wireless Sensor Networks: A Survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] 孙利民,李建中,陈渝. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] 李凤保, 李凌. 无线传感器网络技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(S8): 559-561.
- [4] Feng Xue, Kumar P R. The Number of Neighbors Needed for Connectivity of Wireless Networks [J]. Wireless Networks. 2004, 10(2): 169-181.
- [5] 孙永进,孙雨耕,等. 无线传感器网络 1 点和 2 点连通可靠性研究[J]. 传感技术学报, 2004, 17(3): 379-385.
- [6] 张强. 无线传感器网络 k 点连通可靠性的研究[J]. 传感技术学报, 2005, 18(3): 439-444.
- [7] Xing Liudong, Akhilesh Shrestha. QoS Reliability of Hierarchical Clustered Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of The 25th IEEE Intl. Performance Computing and Communications Conference, 2006: 641-646.
- [8] Xing L. Integrated Modeling for Fault-Tolerant Sensor Networks Reliability and Security[C]// The 52nd Annual Reliability & Maintainability Symposium (RAMS06), Newport Beach, CA, January 2006.
- [9] Hosam M. F. AboElFotoh, S. S. Iyengar, Krishnendu Chakrabarty. Computing Reliability and Message Delay for Cooperative Wireless Distributed Sensor Networks Subject to Random Failures [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2006, 54(1): 145-155.
- [10] 章国栋, 陆延孝, 等. 系统可靠性与维修性的设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 72-77.
- [11] Callaway E H. Wireless Sensor networks: Architectures and Protocols[J]. Auerbach Publications, 2004, 12(6): 88-90.
- [12] Akyildiz I F, Stuntebeck E P. Wireless underground Sensor Networks: Research Challenges [J]. Ad Hoc Networks, 2006, 4(6): 669-686.



周 强(1974-),男,博士后,主要研究方向为总线网络互连技术、平台电子综合, zhouqiang_ee@buaa.edu.cn