具有可维修链路的 E-2DMesh 网络可靠性研究 *

肖 杰, 梁家荣, 徐 霜, 李 银
(广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530004)

摘 要: 对 E-2DMesh 网络中单工失效链路模式进行了研究,提出了基于子网的状态转移模型。基于该方法分别对不可维修和可维修链路模式进行了分析,证明了对较大规模的 E-2DMesh 网络,不可维修链路模式的可靠性要比可维修链路模式低。提出的方法能够用于研究其他层次结构网络和其他网络通信问题。

关键词: E-2DMesh 网络; 可靠性; 子网; 马尔可夫模型
中图分类号: TP393 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2009)02-0668-03

Reliability research of E-2DMesh network with repairable links

XIAO Jie, LIANG Jia-rong, XU Shuang, LI Yin
(*School of Computer, Electronics & Information, Guangxi University, Nanning* 530004, *China*)

Abstract: To investigate the mode of E-2DMesh network with unidirectional links failure, this paper proposed a state transition model which was based on subnet for the E-2DMesh network. Analyzed the mode of network with unrepairable and repairable links based on the algorithm respectively. The results show that the reliability of network with unrepairable links is less than the one with repairable links for the E-2DMesh network with large scale. The scheme is applicable to the study of other hierarchical network structures and other network communication problems.

Key words: E-2DMesh network; reliability; *k*-E-2DMesh; Markov model

0 引言

随着计算机技术的发展,大型多处理器并行计算机系统已在各个领域得到了广泛的应用。越来越多的重要部门,如通信、金融、国防、工业控制等对大型并行计算机系统产生了很强的依赖性,这些系统的计算机一旦发生故障,将带来不可估量的损失。以 E-2DMesh 网络为拓扑结构的新型并行计算机系统,因其结构简单、规则、可扩展且易于 VLSI 实现等优点而成为许多大型多处理器并行计算机系统所采用的拓扑结构[1]。因此,对其可靠性进行研究具有重要的实际价值。

目前大多数文献在研究通信网络可靠性时,一般均假设失效链路不可维修[2],只有少量的文献涉及到链路可维修的情况[3]。而在实际的通信系统中,通信线链路是冗余设计的,也就是说存在链路失效时对其进行维修是不影响系统通信的。因此,对可维修链路的大规模并行计算机系统进行研究更具有现实意义。

现有的方法在研究具有失效链路的通信系统可靠性时,大多是通过研究终端对的可靠性来评价整个系统的可靠性[4],这种方法不能实地反映整个系统的可靠性,缺乏灵活性。有的方法如马尔可夫链模型运算量比较大[5],只能分析中小型规模网络。Menezes 等人使用组合模型方法研究了多级网络的可靠性[6],但是他们没有考虑链路可修复的情况且缺乏严格的数学论证,使人们在实际使用时对其可靠性仍然没有足够的把握。

基于上述原因,本文设定从网络中任意节点到其他所有节点至少存在一条路径的概率来度量 E-2DMesh 网络的可靠性,通过组合模型与马尔可夫链模型相结合的方法对单工可维修链路的 E-2DMesh 网络可靠性进行定量分析。这是第一次对单工可维修链路的 E-2DMesh 网络可靠性给出严格的数学推导。

1 E-2DMesh 网络可靠性分析

本文首先研究 k-E-2DMesh 子网的可靠性模型(为简单起见,令 $k=3$),然后给出整个具有单工可维修链路的 E-2DMesh 网络的可靠性模型。由于节点的可靠性通常大于链路的可靠性,本文只考虑链路失效而不考虑节点失效的情况,并假定所有链路具有相同的失效率 λ 和维修率 α。

一个规模为 $m\times n$ 的 E-2DMesh 网络 $EM_{m\times n}$,可以被分成 $(m/k)\times(n/k)$ 个不相交的 k-E-2DMesh 子网,整个 E-2DMesh 网络 $EM_{m\times n}$ 被分成 m/k 行和 n/k 列,每一行上有 n/k 个子网,每一列上有 m/k 个子网。图 1 给出了 6×6 的 E-2DMesh 网络 $EM_{6\times6}$ 被划分为四个 3×3 的 3-E-2DMesh 子网的情形及其链路方向。

1.1 不可维修链路可靠性模型

令 EM_k 是一规模为 $k\times k$ 的 E-2DMesh 网络,为简单起见,本文以规模为 3×3 的 3-E-2DMesh 子网为例来介绍子网可靠

收稿日期: 2008-04-14; **修回日期**: 2008-07-21 **基金项目**: 国家自然科学基金资助项目(60564001);国家教育部新世纪优秀人才支持计划专项基金资助项目(NCET-06-0756);广西大学研究生创新计划项目

作者简介:肖杰(1984-),男,江西吉安人,硕士研究生,主要研究方向为计算机网络、网络计算(xiaojiezsf@tom.com);梁家荣(1966-),男,广西玉林人,教授,博士,主要研究方向为人工智能、控制理论与应用;徐霜(1982-),女,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为并行计算;李银(1984-),女,广西南宁人,硕士研究生,主要研究方向为网络容错.

性模型的建立和分析。包含 9 个节点,20 条链路,由单工链路组成的子网 EM_3 如图 2 所示。假定链路失效服从指数分布,网络正常工作时的链路失效率和维修率均为 λ 和 α。失效不可维修链路对应的马尔可夫状态转换图如图 3 所示。在图 2 中,假定所有虚线表示的单工链路均为有效链路,实线表示的单工链路具有失效性。

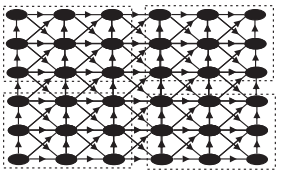

图1　E-2DMesh 网络划分策略

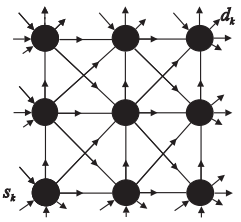

图2　单工3-E-2DMesh 子网

定义 1　由于链路失效,在实线表示的单工链路部分,除节点 s_k 不能接收消息和节点 d_k 不能发送消息外,子网 EM_k 中如果存在一个节点不能发送或者接收消息时,网络即不连通(网络失效)。

图 3 中,状态 $i(i=0,1,2,\cdots,11)$ 表示 i 条单工链路失效后,子网仍然保持连通状态。0 表示子网的初始状态,没有链路失效;F 表示网络处于不连通状态,即网络失效。箭头上的数字表示在 Δt 时间内状态间的转移概率。

在不可维修的 EM_3 子网中,若在失效的 i 条单工链路外又有链路失效,那么该失效链路的生成导致状态从 i 向 $j(j=i,i+1,i+2,\cdots,11,F)$ 转移。以下对已失效链路外一条单工链路的失效导致各状态转移的情况进行讨论。

$0\to F$:表示子网从初始状态转为失效状态。根据定义 1 容易知道,只要图 2 中左右两边 4 条单工链路中的任何一条失效,网络即进入不连通状态,即失效。所以子网从 0 状态转移到 F 状态的概率为 $e^{-4\lambda\Delta t}$。

$0\to 1$:表示子网从初始状态转为有 1 条链路失效状态,子网仍然保持连通。因为子网 EM_3 中共有 20 条链路,除了能使网络从初始状态转移到不连通状态的 4 条链路外,剩余的 16 条链路中任意一条失效都能使子网从 0 状态转移到 1 状态。所以状态转移概率为 $e^{-16\lambda\Delta t}$。

$0\to 0$:因为 0 状态只能转移到 1 状态和 F 状态,所以子网保持初始状态的概率为 $1-e^{-20\lambda\Delta t}$。

同理,可以得出 $i\to j(i=1,2,\cdots,11;\ j=i,i+1,\cdots,11,F)$ 的状态转移概率,结果如图 3 所示。

为了分析子网的可靠度 $R(t)$,引入时间的概念进行分析并建立子网的状态转移方程。

1)在 $T=t$ 时刻

定义 EM_3 处于初始状态,在此状态下的概率为 $p_{0,t}$;处于状态 $i(i=1,2,\cdots,11)$ 下,EM_3 仍然保持连通的概率为 p_i,t、EM_3 处于 F 状态下的概率为 $p_{F,t}$。

2)在 $T=t+\Delta t$ 时刻

(1)在初始状态下,子网 EM_3 只有从 t 时刻开始 Δt 时间内没有故障链路出现,子网才能维持其状态,因此概率为 $p_{0,t}+\Delta t=p_{0,t}(1-20\lambda\Delta t)+o(\Delta t)$。

(2)子网 EM_3 处于状态 1 下有两种情况:①$T=t$ 时子网处于状态 1 下,Δt 后仍处于状态 1 下,此时的概率为 $P_{1,t}(1-19\lambda\Delta t)+o(\Delta t)$;②$T=t$ 时子网处于状态 0 下,Δt 后转移到状态 1 下,此状态转移概率为 $p_{0,t}16\lambda\Delta t+o(\Delta t)$。故在 $T=t+\Delta t$ 时刻,系统处于状态 1 下的概率为

$$p_{1,t+\Delta t}=p_{0,t}{}^{16\lambda\Delta t}+p_{1,t}{}^{(1-19\lambda\Delta t)+o(\Delta t)}$$

相同的方法,可得到系统在 $T=t+\Delta t$ 时刻处于状态 $j(j=2,3,\cdots,11,F)$ 下的概率分别为

$$p_{2,t+\Delta t}=p_{1,t}{}^{14\lambda\Delta t}+p_{2,t}{}^{(1-18\lambda\Delta t)+o(\Delta t)}$$
$$p_{3,t+\Delta t}=p_{2,t}{}^{13\lambda\Delta t}+p_{3,t}{}^{(1-17\lambda\Delta t)+o(\Delta t)}$$
$$p_{4,t+\Delta t}=p_{3,t}{}^{11\lambda\Delta t}+p_{4,t}{}^{(1-16\lambda\Delta t)+o(\Delta t)}$$
$$p_{5,t+\Delta t}=p_{4,t}{}^{9\lambda\Delta t}+p_{5,t}{}^{(1-15\lambda\Delta t)+o(\Delta t)}$$
$$p_{6,t+\Delta t}=p_{5,t}{}^{8\lambda\Delta t}+p_{6,t}{}^{(1-14\lambda\Delta t)+o(\Delta t)}$$
$$p_{7,t+\Delta t}=p_{6,t}{}^{7\lambda\Delta t}+p_{7,t}{}^{(1-13\lambda\Delta t)+o(\Delta t)}$$
$$p_{8,t+\Delta t}=p_{7,t}{}^{5\lambda\Delta t}+p_{8,t}{}^{(1-12\lambda\Delta t)+o(\Delta t)}$$
$$p_{9,t+\Delta t}=p_{8,t}{}^{4\lambda\Delta t}+p_{9,t}{}^{(1-11\lambda\Delta t)+o(\Delta t)}$$
$$p_{10,t+\Delta t}=p_{9,t}{}^{3\lambda\Delta t}+p_{10,t}{}^{(1-10\lambda\Delta t)+o(\Delta t)}$$
$$p_{11,t+\Delta t}=p_{10,t}{}^{2\lambda\Delta t}+p_{11,t}{}^{(1-9\lambda\Delta t)+o(\Delta t)}$$
$$p_{F,t+\Delta t}=p_{0,t}{}^{4\lambda\Delta t}+p_{1,t}{}^{5\lambda\Delta t}+p_{2,t}{}^{5\lambda\Delta t}+p_{3,t}{}^{6\lambda\Delta t}+p_{4,t}{}^{7\lambda\Delta t}+p_{5,t}{}^{7\lambda\Delta t}+p_{6,t}{}^{7\lambda\Delta t}+p_{7,t}{}^{8\lambda\Delta t}+p_{8,t}{}^{8\lambda\Delta t}+p_{9,t}{}^{8\lambda\Delta t}+p_{10,t}{}^{8\lambda\Delta t}+p_{11,t}{}^{9\lambda\Delta t+o(\Delta t)}$$

定义可靠度 $R_i(t)(0\leqslant i\leqslant 11)$ 为系统到时刻 t 有 i 条链路失效仍保持连通的概率。因此,根据上式可求得子网 EM_3 的可靠度。

定理 1　在单工不可维修链路模式下,假设子网 EM_3 中每条链路具有独立的失效概率 λ,则子网 EM_3 的可靠度为

$$R(t)=\sum_{i=0}^{11}p_{i,t}$$

其中:$p_{0,t}=e^{-20\lambda t}$,$p_{1,t}=-16e^{-20\lambda t}+16e^{-19\lambda t}$,$p_{2,t}=112e-^{20\lambda t}-224e^{-19\lambda t}+112e^{-18\lambda t}$,$p_{3,t}=-1\ 456/3e^{-20\lambda t}+1\ 456e^{-19\lambda t}-1\ 456e^{18\lambda t}+1\ 456e/3e^{-17\lambda t}$,…。限于篇幅,这里不一一列举。

证明　前面已经建立了子网 EM_3 的状态转移方程,根据福克—普朗克方程式,可得以下方程组:

$$\begin{cases}
dp_{0,t}/dt=-20\lambda p_{0,t}\\
dp_{1,t}/dt=-19\lambda p_{1,t}+16\lambda p_{0,t}\\
dp_{2,t}/dt=-18\lambda p_{2,t}+14\lambda p_{1,t}\\
dp_{3,t}/dt=-17\lambda p_{3,t}+13\lambda p_{2,t}\\
dp_{4,t}/dt=-16\lambda p_{4,t}+11\lambda p_{3,t}\\
dp_{5,t}/dt=-15\lambda p_{5,t}+9\lambda p_{4,t}\\
dp_{6,t}/dt=-14\lambda p_{6,t}+8\lambda p_{5,t}\\
dp_{7,t}/dt=-13\lambda p_{7,t}+7\lambda p_{6,t}\\
dp_{8,t}/dt=-12\lambda p_{8,t}+5\lambda p_{7,t}\\
dp_{9,t}/dt=-11\lambda p_{9,t}+4\lambda p_{8,t}\\
dp_{10,t}/dt=-10\lambda p_{10,t}+3\lambda p_{9,t}\\
dp_{11,t}/dt=-9\lambda p_{11,t}+2\lambda p_{10,t}\\
dp_{F,t}/dt=4\lambda p_{0,t}+5\lambda p_{1,t}+5\lambda p_{2,t}+6\lambda p_{3,t}+7\lambda p_{4,t}+7\lambda p_{5,t}+\\
7\lambda p_{6,t}+8\lambda p_{7,t}+8\lambda p_{8,t}+8\lambda p_{9,t}+8\lambda p_{10,t}+9\lambda p_{11,t}
\end{cases}$$

初始条件为 $p_{0,0}=1,p_{i,0}=0(i=1,\cdots,11,F)$。求得此微分方程组的解为 $p_{i,t}(0\leqslant i\leqslant 11)$。其中,$p_{i,t}$是子网 EM_3 处于状态 i 下的稳态概率。因为可靠度 $R_i(t)=R_{i-1}(t)+p_{i,t}$,$R_0(t)=p_{0,t}$,所以可得到子网 EM_3 在单工不可维修链路模式下的可靠度为 $R(t)=\sum_{i=0}^{11}p_{i,t}$。得证。

由于规模为 $m\times n$ 的 E-2DMesh 网络 $EM_{m\times n}$ 可被分成 $(m/3)\times(n/3)$ 个不相交的 3-E-2DMesh 子网,当每个子网 EM_3 都保持连通时,根据设定可知,整个 E-2DMesh 网络 $EM_{m\times n}$ 也保持连通。依据定理 1,可得规模为 $m\times n$ 的 E-2DMesh 网络 $EM_{m\times n}$ 的可靠度为 $(\sum_{i=0}^{111}p_{i,t})^{m\times n/9}$。根据可靠性手册,取 λ =

3.509×10^{-6},由此可得不同规模下单工不可维修链路模式 E-2DMesh 网络的可靠性。结果如图 4 所示。其中虚线为 3×3 规模的 E-2DMesh 网络可靠性对应于时间 t 的曲线;实线为 12×12规模的 E-2DMesh 网络可靠性对应于时间 t 的曲线。

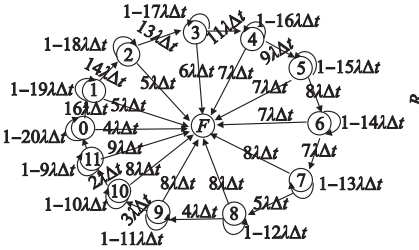

图3　不可维修链路的马尔可夫状态转换图

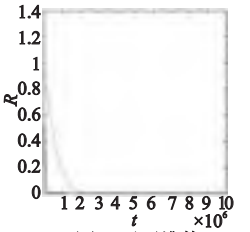

图4　不可维修链路的可靠性

1.2　可维修链路可靠性模型

由于大规模并行计算机系统内部的通信链路都是冗余设计的,某些链路失效后对其进行维修是不影响系统正常运行的。从另一个角度来说,对失效链路进行维修,也增强了系统的可靠性。

对于单工链路组成的 E-2DMesh 网络来说,某条链路的失效导致该链路不可用,对其进行维修后使得该链路可用。这里定义链路的维修强度 $\theta=\lambda/\alpha$。其中:λ 为链路的失效率;α 为链路的维修率。注意到链路维修强度 $0\leqslant\theta<1$,否则系统将不能进入稳态。显然,θ 越小越好,当 $\theta=0$ 时,链路失效后立即就会被修复。

下面对单工可维修链路模式下子网 EM_3 的状态转移情况进行讨论并建立状态转移方程。

$0\to F$:表示子网从初始状态转为失效状态。根据定义 1 容易知道,只要图 2 中左右两边 4 条单工链路中的任何一条失效,网络进入不连通状态,即失效。因此子网从 0 状态转移到 F 状态的概率为 $e^{-4\lambda\Delta t}$。

$0\to1$:表示子网从初始状态转为有 1 条链路失效状态,子网仍然保持连通。因为子网 EM_3 中共有 20 条链路,除了能使网络从初始状态转移到不连通状态的 4 条链路外,剩余的 16 条链路中任意一条失效都能使子网从 0 状态转移到 1 状态。所以状态转移概率为 $e^{-16\lambda\Delta t}$。

$0\to0$:因为 0 状态只能转移到 1 状态和 F 状态,所以子网保持初始状态的概率为 $1-e^{-20\lambda\Delta t}$。

$F\to0$:由于单工链路可维修,只要对使状态从 0 转移到 F 的失效链路进行修复即可使网络回复到初始状态。状态转移概率为 $e^{-\alpha\Delta t}$。

$1\to0$:子网要从有 1 条链路失效状态转到初始状态,只要对使子网从初始状态转移到 1 状态的那条链路进行维修即可。此时的转移概率为 $e^{-\alpha\Delta t}$。

同样的道理,可得子网 EM_3 在可维修链路模式下的状态转移关系图,如图 5 所示。

根据图 5 不难建立子网 EM_3 在可维修链路模式下 $t+\Delta t$ 时刻的状态方程。

$$p_{0,t}+\Delta t=p_{0,t}^{(1-20\lambda\Delta t)}+p_{1,t}^{\alpha\Delta t}+p_{F,t}^{\alpha\Delta t+o(\Delta t)}$$

$$p_{1,t}+\Delta t=p_{1,t}^{(1-19\lambda\Delta t-\alpha\Delta t)}+p_{0,t}^{16\Delta t}+p_{2,t}^{2\alpha\Delta t}+p_{F,t}^{\alpha\Delta t+o(\Delta t)}$$

$$p_{2,t}+\Delta t=p_{2,t}^{(1-18\lambda\Delta t-2\alpha\Delta t)}+p_{1,t}^{14\Delta t}+p_{3,t}^{3\alpha\Delta t}+p_{F,t}^{2\alpha\Delta t+o(\Delta t)}$$

$$p_{3,t}+\Delta t=p_{3,t}^{(1-17\lambda\Delta t-3\alpha\Delta t)}+p_{2,t}^{13\Delta t}+p_{4,t}^{4\alpha\Delta t}+p_{F,t}^{2\alpha\Delta t+o(\Delta t)}$$

$$p_{4,t}+\Delta t=p_{4,t}^{(1-16\lambda\Delta t-4\alpha\Delta t)}+p_{3,t}^{11\Delta t}+p_{5,t}^{5\alpha\Delta t}+p_{F,t}^{3\alpha\Delta t+o(\Delta t)}$$

$$p_{5,t}+\Delta t=p_{5,t}^{(1-15\lambda\Delta t-5\alpha\Delta t)}+p_{4,t}^{9\Delta t}+p_{6,t}^{6\alpha\Delta t}+p_{F,t}^{3\alpha\Delta t+o(\Delta t)}$$

$$p_{6,t}+\Delta t=p_{6,t}^{(1-14\lambda\Delta t-6\alpha\Delta t)}+p_{5,t}^{8\lambda\Delta t}+p_{7,t}^{7\alpha\Delta t}+p_{F,t}^{\alpha\Delta t+o(\Delta t)}$$

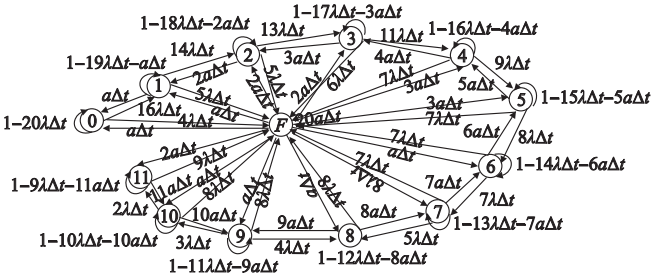

图5　可维修链路的马尔可夫状态转换图

$$p_{7,t}+\Delta t=p_{7,t}^{(1-13\lambda\Delta t-7\alpha\Delta t)}+p_{6,t}^{7\lambda\Delta t}+p_{8,t}^{8\alpha\Delta t}+p_{F,t}^{2\alpha\Delta t+o(\Delta t)}$$

$$p_{8,t}+\Delta t=p_{8,t}^{(1-12\lambda\Delta t-8\alpha\Delta t)}+p_{7,t}^{5\lambda\Delta t}+p_{9,t}^{9\alpha\Delta t}+p_{F,t}^{\alpha\Delta t+o(\Delta t)}$$

$$p_{9,t}+\Delta t=p_{9,t}^{(1-11\lambda\Delta t-9\alpha\Delta t)}+p_{8,t}^{4\lambda\Delta t}+p_{10,t}^{10\alpha\Delta t}+p_{F,t}^{\alpha\Delta t+o(\Delta t)}$$

$$p_{10,t}+\Delta t=p_{10,t}^{(1-10\lambda\Delta t-10\alpha\Delta t)}+p_{9,t}^{3\lambda\Delta t}+p_{11,t}^{11\alpha\Delta t}+p_{F,t}^{\alpha\Delta t+o(\Delta t)}$$

$$p_{11,t+\Delta t}=p_{11,t}^{(1-9\lambda\Delta t-11\alpha\Delta t)}+p_{10,t}^{2\lambda\Delta t}+p_{F,t}^{2\alpha\Delta t}+o(\Delta t)$$

$$p_{F,t+\Delta t}=p_{F,t}^{(1-20\alpha\Delta t)}+p_{0,t}^{4\lambda\Delta t}+p_{1,t}^{5\lambda\Delta t}+p_{2,t}^{5\lambda\Delta t}+p_{3,t}^{6\lambda\Delta t}+p_{4,t}^{7\lambda\Delta t}+p_{5,t}^{7\lambda\Delta t}+p_{6,t}^{7\lambda\Delta t}+p_{7,t}^{8\lambda\Delta t}+p_{8,t}^{8\lambda\Delta t}+p_{9,t}^{8\lambda\Delta t}+p_{10,t}^{8\lambda\Delta t}+p_{11,t}^{9\lambda\Delta t+o(\Delta t)}$$

从上式不难得出子网在可维修链路模式下的稳态可靠性概率。

定理 2　在可维修链路模式下子网 EM_3 的可靠性概率为

$$R(t)=\sum_{i=0}^{11}p_{i,t}$$

证明类似于定理 1,这里不再重复。

依据定理 2,同样可得 $m\times n$ 规模的 E-2DMesh 网络在可维修链路模式下的可靠度为 $(\sum_{i=0}^{11}p_{i,t})^{m\times n/9}$。这里,不妨设链路维修强度 $\theta=1/2$,结果如图 6 所示。其中虚线为 3×3 规模的 E-2DMesh 网络可靠性对应于时间 t 的曲线;实线为 12×12 规模的 E-2DMesh 网络可靠性对应于时间 t 的曲线。

2　不可维修和可维修链路模式下的可靠性分析

将不可维修和可维修链路两种模式情况下的子网 EM_3 可靠性进行对比,其关系如图 7 所示。其中虚线为可维修链路模式下 3×3 规模的 E-2DMesh 网络可靠性对应于时间 t 的曲线;实线为不可维修链路模式下 3×3 规模的 E-2DMesh 网络可靠性对应于时间 t 的曲线。

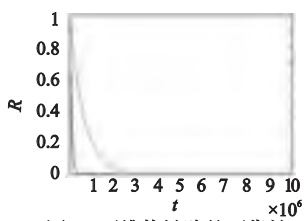

图 6　可维修链路的可靠性

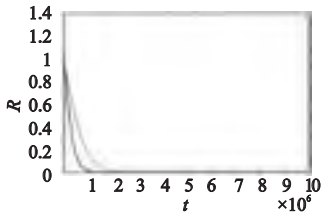

图 7　不可维修与可维修链路模式可靠性比较

从图 7 可知,可维修链路模式的可靠性要大于不可维修链路模式的可靠性。这是因为链路可维修使得原来不可用的链路又可用,这就相当于减小了链路的失效率。需要说明的是,这里的网络可靠性实际上是一个下界,其实际可靠性比下界更高。

3　结束语

本文主要基于子网的策略对单工不可维修链路模式和可维修链路模式的 E-2DMesh 网络可靠性进行了研究,通过马尔可夫链过程建立了子网的可靠性模型,利用组合模型原理得到整个网络可靠性的一个下界。对这两种模式的可靠性进行了比较。比较结果表明,随着网络规模的不断扩 (下转第 676 页)

型中功率放大所需的能量;d 为两节点间距离 。当传输距离小于阈值 d_o,功率放大损耗采用自由空间模型,能量消耗与 d^2 成正比;当传输距离大于等于阈值 d_o 时, 采用多路径衰减模型,能量消耗与 d^4 成正比。节点接收 1 bit 的数据消耗能量为

$$E_{Rx}(l) = lE_{elec} \tag{7}$$

这里假设簇头节点有理想的数据融合,即分别接收 n 个簇内节点的数据 l,融合后为 1 bit。簇头节点在作为中继节点时,首先接收数据然后再转发出去。能耗就由两部分组成:

$$E_{head}(d) = lE_{Rx} + lE_{Tx} + lE_{elec}n + l\varepsilon_{mp}d^2 = (n+1)lE_{elec} + 2l\varepsilon_{mp}d^2 \tag{8}$$

在仿真中使用了以下参数。网络大小为 150 m × 150 m,随机生成 100 个传感器节点,如图 3 所示,sink 节点位于坐标(150 ,0)处。E_{elec} 为 50 nJ/bit ,ε_{fs} 为 10 pJ/bit/m^2,ε_{mp} 为 0.001 3 pJ/bit/m^4,l 为 4 000 bit ,d_o 为 75 m。

4.2　仿真结果

分别比较节点初始能量为 0.25、0.5、1 J 的情况下,改进算法与 LEACH 协议的网络生命周期,如图 4 所示。从图中可以看出,改进算法比 LEACH 算法在不同初始能量下,网络运行的轮数分别延长 26%、24%、32%,明显延长了网络生命周期。图 5 显示某一相同规模簇的簇头节点的能耗。从图中可以看出,改进算法的簇头能耗相对较低,也就是说,采用分簇规模约束机制和簇间转发方式可有效地节约簇头能量,平衡簇间负载。

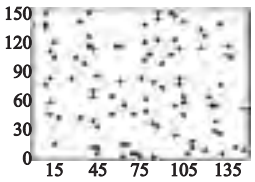

图3　传感节点随机分布图

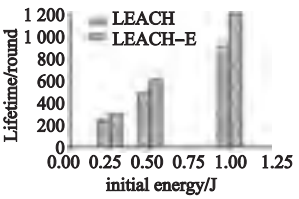

图4　不同初始能量时的网络生存周期

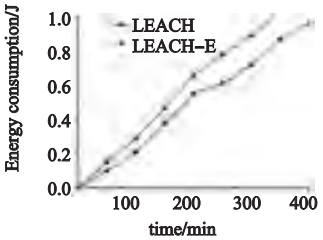

图5　簇头能耗

5　结束语

本文在分析经典的分簇路由协议 LEACH 的基础上,针对其不足提出在簇头选举中增加考虑节点当前能量的因素来解决部分能量少的节点当选簇头的问题,使得能量大的节点成为簇头的概率相对更大,有效地延长了节点存活时间。同时采用分簇规模约束机制改善了簇头之间的负载不均衡问题。仿真实验表明,以上措施有效地平衡了节点能量消耗,延长了网络生存周期。

参考文献:

[1] AKYILDIZ I F, SU Wei-lian, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al*. A survey on sensor network[J]. IEEE Communications Magazine, 2002,40(8):102-114.

[2] REN Feng-yuan, HUANG Hai-ning, LIN Chuang. Wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 4(7):1282-1291.

[3] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks[C]//Proc of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on MobiCom'00. Boston, MA:[s. n.],2000.

[4] SHAH R C, RABAEY J. Energy aware routing for low energy Ad hoc sensor networks[C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2002.

[5] KULIK J, HEINZELMAN W R, BALAKRISHNAN H. Negotiation based protocols for disseminating information in wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2002,8(2-3):169-185.

[6] BRAGINSKY D, ESTRIN D. Rumor routing algorithm for sensor networks[C]//Proc of the 1st Workshop on Sensor Networks and Applications. 2002.

[7] SHEN Bo, ZHANG Shi-yong, ZHONG Yi-ping. Cluster-based routing protocols for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2006,17(7):1588-1600.

[8] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社, 2005.

[9] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proc of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf on System Sciences. Maui: IEEE Computer Society, 2000:3005-3014.

[10] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications ,2002, 1(4):660-670.

(上接第 670 页)大,两种模式的可靠性都在不断下降;在相同网络规模时,可维修链路模式的可靠性要优于不可维修链路模式的可靠性。

参考文献:

[1] CHEN Xiao. Fault-tolerance adaptive and shortest routing in 2D extended Meshes using faulty-block-information[C]//Proc of 2000 International Workshops on Parallel Processing. 2000:267-274.

[2] 陈育斌,李建东,陈家模,等.计算通信网络整体概率连通性的一种新算法[J].通信学报,2000,21(9):91-96.

[3] 刘爱民,刘有恒.关于可修复系统的 MTBF 和 MTTR[J].电子学报,1998,26(1):70-72.

[4] HSU S J, YUANG M C. Efficient computation of marginal reliability-importance for reducible networks[J]. IEEE Trans on Reliability, 2001,50(1):98-106.

[5] 王衍,张彪,张友鹏,等.基于 Markov model 的容错计算机联锁系统可靠性分析[J].电气自动传动化,2007,29(2):8-11.

[6] CHEN H L. Submesh determinination in faulty Tori and Meshes[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2001,12(3): 272-282.