

## 基于系统级诊断理论的卫星网络故障识别算法\*

侯 霞<sup>+</sup>, 范植华, 胡 刚, 李 磊

(中国科学院 软件研究所,北京 100080)

### A Fault Identification Algorithm for Satellite Networks Based on System Level Diagnosis

HOU Xia<sup>+</sup>, FAN Zhi-Hua, HU Gang, LI Lei

(Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62614140 ext 112, E-mail: helenhou0927@hotmail.com, <http://www.iscas.ac.cn>

**Hou X, Fan ZH, Hu G, Li L. A fault identification algorithm for satellite networks based on system level diagnosis. *Journal of Software*, 2006,17(3):388–395. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/388.htm>**

**Abstract:** It is a challenge to support the fault tolerance for satellite networks, in which fault identification is primary. After modeling satellite networks with two-level-node graph, a fault identification algorithm based on PMC test invalidation model is presented and proved to be correct. The effectiveness of the algorithm in different types of satellite networks is compared and studied by simulations. The results of experiments illustrate that the algorithm adapts to arbitrary network topology and has robustness.

**Key words:** system level diagnosis; satellite network; two-level-node graph; fault identification

**摘 要:** 提高卫星网络的容错性是一项具有挑战性的工作,故障识别是其中一项根本措施.在采用双层节点图对卫星网络建模的基础上,提出一种基于 PMC 测试无效模型的卫星网络故障识别算法,并证明了算法的正确性.通过大量仿真实验,对算法在不同类型的卫星网络中的性能进行了对比与分析.实验结果表明,算法能够适用于多种网络拓扑,并具有良好的鲁棒性.

**关键词:** 系统级诊断;卫星网络;双层节点图;故障识别

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

卫星网络<sup>[1]</sup>的通信距离远、覆盖面积广,网络故障带来的影响范围和经济损失都很大.因此,通过故障管理为卫星网络提供一定的容错机制,保证网络连续可靠的运行是非常必要的.目前,卫星管理由地面测控系统负责.但是,测控仅对一颗或几颗卫星进行管理,而没有将所有卫星作为网络进行整体分析.特别是对于具有星际链路(inter-satellite links,简称 ISLs)的卫星网络而言,网络故障管理的研究还处于探索阶段.

系统级诊断<sup>[2]</sup>是一种有效的故障识别方法.通过识别节点状态,并对故障节点进行孤立和替换,可以实现一定程度的网络容错.该方法假设节点间可以进行相互测试,测试结果的集合称为系统症状.节点状态为正常或故障,节点状态集合称为系统状态.诊断即是从系统症状到系统状态的映射.

系统级诊断自提出至今,得到科学界的广泛关注,从理论、算法到应用等各方面都取得了不少成果<sup>[3–6]</sup>.其中

\* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2004AA712032 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2004-08-13; Accepted 2005-06-02

与卫星网络相似的领域包括计算机网络<sup>[5]</sup>和 ad-hoc<sup>[6]</sup>网络.但是,卫星可以多方向通信且部分失效等特点,使得现有成果无法直接应用.文献[7]将系统级诊断引入到卫星网络的故障诊断中,提出了一种新颖的系统级诊断建模方法——双层节点图,以便更好地体现卫星网络的通信特点.本文将在此基础上,根据卫星网络中通信节点的故障类型对系统级诊断的PMC<sup>[2]</sup>模型进行扩展,提出一种基于扩展 PMC 模型的故障识别算法,并对其正确性加以证明.同时,通过仿真对算法的性能进行分析.

### 1 诊断建模

#### 1.1 卫星网络建模

定义 1. 将卫星上的一个收发器及其关联的定向天线、电源等影响因素综合抽象为一个对象,称为端口.端口负责通信并具有一定的通信范围,该范围由其关联的定向天线和电源等综合决定,且是一对多的无线通信模式.端口所在的卫星称为其属主.卫星上端口数量与定向天线个数相同,不同端口负责不同方向的通信.

系统级诊断通常采用图的形式对系统结构和节点间的测试关系进行建模,图中的顶点表示系统的被诊断节点,有向边及边值表示节点间的测试及结果.在计算机网络<sup>[5]</sup>或 ad-hoc 网络<sup>[6]</sup>中,网络节点与被诊断节点是对等的,可以采用图形式进行建模.但是,这种方式并不适合卫星网络:一方面,卫星各端口的状态可能是无关的,仅凭借对卫星某端口的测试无法判断其他端口甚至整个卫星的状态.所以,将卫星作为被诊断节点和图中的顶点是不合理的.例如,端口因为相关联的定向天线失效而无法通信,此时,这种故障不会影响其他端口;另一方面,不同端口的通信状态也可能相关.例如,卫星上仅有一个星上处理器,当该处理器发生故障时,星上所有端口都会受影响.可见,以端口作为图的顶点既不能体现一颗卫星上不同端口间的相关性,也无法体现网络的连通性.综上,为了更好地体现卫星多端口通信的特点,文献[7]中提出了“双层节点图”.

定义 2. 双层节点图  $G=(S,V,L)$  是一种扩展的有向图.其中,  $S=\{s_1,s_2,\dots,s_m\}$  为网络中卫星的集合,  $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$  为网络中端口的集合.图形表示时,分别用较大的空心圆和较小的实心圆表示.定义二元关系  $\angle:v_i \rightarrow s_p$  表示卫星  $s_p$  是端口  $v_i$  的属主.属主相同的端口聚集在卫星内部.  $L$  为有向边集合.边  $e \in L$  是一个有序二元组  $(e_s,e_r)$ .其中,  $e_s$  和  $e_r$  分别对应一个有序的卫星对和有序的端口对,并且卫星节点分别是相应端口节点的属主.由于每个端口唯一对应一个属主,因此边可用与其对应的端口对来表示.例如,在图 1(c)中,存在边  $((s_1,s_3),(v_1,v_4)) \in L$ ,可以简单地记为  $(v_1,v_4)$  或  $l_{1,4}$ .双层节点图由两个传统的图叠加而成:由卫星与 ISLs 组成的图  $G_s=(S,L_s)$  和由端口与 ISLs 组成的图  $G_v=(S,L_v)$ ,  $L_s$  与  $L_v$  中的边一一对应.

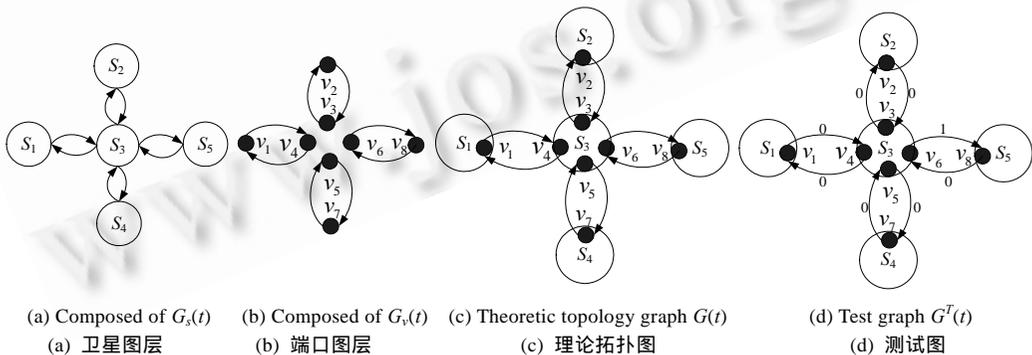


Fig.1 An example of the theoretic topology graph, composed of  $G_s(t)$  and  $G_v(t)$ , and its test graph

图 1 卫星网络的理论拓扑图及其卫星图层、端口图层和测试图的例子

为了体现卫星网络拓扑时变的特性,对网络的理论拓扑和实际状态进行建模时加入时间参数  $t$ ,分别得到  $G(t)=(S,V,L(t))$  和  $G^T(t)=(S^T,V^T,L^T(t))$ .根据卫星运动的规律性,可设  $t$  到  $(t+1)$  的时间间隔内,卫星网络拓扑不变.

(1)  $G(t)$  是网络  $t$  时刻的理论拓扑图.其中的边集  $L(t)$  是端口间理论上应具有的所有通信链路,即 ISLs.图 1

中的(c)是卫星网络理论拓扑图  $G(t)$ 的例子,(a)和(b)分别是  $G(t)$ 的两个图层;

- (2) 实际状态图  $G^T(t)$ 是  $t$ 时刻端口间的测试及结果,也称为测试图.设  $v_i, v_j \in V$ ,当且仅当  $v_i$  测试  $v_j$  得到结果为  $x$  时,存在边  $(v_i, v_j) \in L(t)$ ,边值记为  $l_{i,j}=x$ .图 1 中的(d)是与(a)对应的一个测试图.

## 1.2 卫星网络系统级诊断方案

为了简化问题研究,假设卫星网络满足以下条件:

- (A1) 端口通过收发数据实现测试与被测.端口的计算任务由星上代理执行;
- (A2) 不考虑链路故障,假设可通过重传和误码检测等机制来保证测试结果的可靠性;
- (A3) 诊断期间网络拓扑不发生变化;
- (A4) 在完成一次诊断前,端口的故障状态不发生变化.

卫星网络系统级诊断将识别端口状态作为诊断目的,整体方案可归纳为如下步骤<sup>[7,8]</sup>:

- (1) 星上测试:
  - (1.1) 网络中所有端口在特定时间  $t$  同时向外广播携带计算任务的测试报文  $m_{tsr}$ ;
  - (1.2) 收到  $m_{tsr}$  的端口执行其中的计算任务(星上代理执行),然后返回携带执行结果的响应报文  $m_{rsp}$ ;
  - (1.3) 发起测试的端口将收到的执行结果与预期结果进行对比,相同时,标识测试结果为 0,否则为 1;
  - (1.4) 当  $(t+T_{out})$ 时,卫星将其上所有端口的测试结果上报到诊断中心(对结果的综合由星上代理负责).
- (2) 诊断中心利用所有卫星上报的测试结果,对时刻  $t$  网络的实际状态建模,得到测试图  $G^T(t)=(S^T, V^T, L^T(t))$ .显然,端口无法通过测试发现其硬故障邻端口.
- (3) 诊断中心计算时刻  $t$  所有端口正常时网络的理论拓扑图  $G(t)=(S, V, L(t))$ .
- (4) 对比  $G(t)$ 和  $G^T(t)$ ,在  $G^T(t)$ 中将通过测试未发现的端口和边补上,并将边值设为 2.

## 2 卫星网络故障识别算法

### 2.1 测试无效模型

系统级诊断中节点间进行相互测试,不同测试模型对测试结果的解释不同.传统的系统级诊断中设节点状态为正常(fault-free)或故障(faulty),则在最常用的 PMC 模型<sup>[2]</sup>中:一个正常节点测试正常节点时的结果为 0,测试故障节点时的结果为 1;而当一个故障节点测试另一节点时,相关结果任意.

本文将端口故障进一步划分为硬故障和软故障.硬故障是指端口失效,无法进行通信.在卫星网络中,硬故障可能是由星上电池损耗、天线失效等原因引起的;软故障是指计算错误,实际是指星上代理计算错误.根据限定的故障类型,端口的状态扩展为  $x \in \{0, 1, 2\}$ ,其中 0, 1 和 2 分别表示正常、软故障和硬故障.据此,可对 PMC 模型进行相应扩展,得出结果见表 1.其中  $l_{i,j}$  表示端口  $v_i$  对  $v_j$  的测试结果. $G^T(t)$ 中的测试结果(边值)遵守表 1.

Table 1 The extended PMC model

表 1 扩展的 PMC 模型

$v_i$	$v_j$	$l_{i,j}$	$l_{j,i}$
0	0	0	0
0	1	1	0,1
1	0	0,1	1
1	1	0,1	0,1
0 or 1 or 2	2	2	2
2	0 or 1 or 2	2	2

### 2.2 诊断规则

根据表 1 可以归纳出下列诊断规则:

- (rule1) 如果  $l_{i,j}=l_{j,i}=0$ ,则  $v_i$  和  $v_j$  状态一致(都为 0 或 1).

(rule2) 如果  $l_{i,j}=l_{j,i}=1$ , 则  $v_i$  和  $v_j$  中至少一个为 1.

(rule3) 如果  $l_{i,j}=1$  且  $l_{j,i}=0$ , 则  $v_j$  为 1.

(rule4) 如果  $v_j$  为 1 且  $l_{i,j}=0$ , 则  $v_i$  为 1.

(rule5) 如果  $v_i$  为 0 且  $l_{i,j}=0$ , 则  $v_j$  为 0;

(rule6) 如果  $v_i$  为 0 且  $l_{i,j}=1$ , 则  $v_j$  为 1.

(rule7) 如果  $l_{i,j}=l_{j,i}=2$ , 则  $v_i$  和  $v_j$  中至少一个为 2.

由假设(A1)可知, 卫星上的计算任务都由星上代理负责. 因此, 同一颗卫星上所有非硬故障端口的计算能力应该一致. 由此可补充规则(rule8):

(rule8) 如果  $v_i$  和  $v_j$  都是非硬故障节点, 且  $v_i$  和  $v_j$  属主相同, 则  $v_i$  和  $v_j$  状态一致(都为 0 或 1).

### 2.3 故障识别算法

诊断的正确性和完全性是衡量系统级诊断算法的两大标准. 如果基于系统故障而产生的给定征兆能够标识出所有故障节点, 则称该诊断是完全的; 否则为不完全诊断. 如果在给定征兆的基础上, 没有正常节点被标识为故障, 则称该诊断是正确的; 否则为不正确诊断.

为了描述简便, 规定网络端口集  $V$  中端口总数量为  $\#V=n$  ( $\#$  表示集合的势), 其中真正故障端口集为  $V_f$ , 并设  $V$  中每个端口理论上至少可与一个其他端口进行互测. 本文提出的故障识别算法最终把  $V$  划分为  $K$  (正常端口集合)、 $F1$  (软故障端口集合)、 $F2$  (硬故障端口集合) 和  $U$  (未诊断出状态的端口集合), 且  $K \cup F1 \cup F2 \cup U = V$ . 算法正确是指  $K, F1$  和  $F2$  中端口状态与实际状态一致. 但是, 本文算法不保证能够识别出所有端口的状态, 即不保证  $U$  为空. 算法包括 CoarseSplit, SplitZ 和 Diagnosis 三部分.

(1) CoarseSplit. 对集合  $V$  进行粗分. 从表 1 可以看出, 所有被诊断端口能够根据可通信双方互相诊断的结果划分为如下定义的  $Z, S, U1, H$  四类, 且  $Z \cup S \cup U1 \cup H = V$ .

$$Z = \{(v_i, v_j) | l_{i,j} = l_{j,i} = 0\}; \quad S = \{(v_i, v_j) | l_{i,j} = l_{j,i} = 1\}; \quad U1 = \{(v_i, v_j) | l_{i,j} \neq l_{j,i}\}; \quad H = \{(v_i, v_j) | l_{i,j} = l_{j,i} = 2\}.$$

(2) SplitZ. 将  $Z$  划分为若干子集  $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_h\}$ , 每个子集称为  $Z$  的一个割集.  $Z$  由满足  $l_{i,j} = l_{j,i} = 0$  的端口对组成,  $Z$  的割集是由公共卫星连接起来的这类端口对的集合. 满足  $Z_1 \cup Z_2 \cup \dots \cup Z_h = Z$  且  $Z_i \cap Z_j = \emptyset (i \neq j)$ . 设  $\delta$  是  $Z$  的所有割集的势的最大值, 即  $\delta = \max(\#Z_1, \#Z_2, \dots, \#Z_h)$ .

引理 1. 任意  $Z$  的割集内部所有端口状态一致.

证明: 设  $Z_a$  是  $Z$  的任意一个割集, 其中包含  $l$  个端口对.

(a) 当  $l=1$  时, 设  $Z_a$  中仅存在端口对  $(v_i, v_j)$ . 根据规则 rule1,  $v_i$  和  $v_j$  状态一致.

(b) 当  $l>1$  时, 设  $(v_i, v_j) \in Z_a$ , 则根据  $Z$  的割集的定义, 必存在  $(v_p, v_q) \in Z_a$ , 满足  $(v_i, v_j)$  和  $(v_p, v_q)$  中的某两个端口属于同一颗卫星. 不失一般性, 设  $v_i$  和  $v_p$  属主相同. 则根据规则 rule8,  $v_i$  和  $v_p$  的状态一致. 进而再根据 rule1 可知,  $v_i, v_j, v_p$  和  $v_q$  的状态一致. 依此类推,  $Z_a$  内部所有端口状态一致.

由引理 1 可以得出如下诊断规则:

(rule9) 对于  $Z$  的任意割集  $Z_a$ , 如果任意  $v_i \in Z_a$  的状态已知为  $x$ , 则所有  $v_j \in Z_a$  的状态都为  $x$ .

(3) Diagnosis. 在进行故障识别时, 先找到一些状态确定的端口集合作为基础, 然后根据诊断规则进行联想推理得到最终结果, 算法如下. 其中,  $v_i$ .owner.flag 标识  $v_i$  属主的星上代理计算正常与否 (0 和 1 分别表示正常和异常).

算法.

Diagnosis ( )

```
{
1   K=∅; F1=∅; F2=∅; U=∅; U2=∅;
2   for (each (v_i, v_j) ∈ U1) /* according to rule3 */
      if (l_{i,j}=1 and l_{j,i}=0) { F1=F1+v_j; U2=U2+v_i; v_j.owner.flag=1; }
3   K = ⋃_{a=1}^h Z_a ;
```

```

4   for (each  $v_i \in K$ )  $v_i$ .owner.flag=0;
5   while ( $U \neq V - K - F1 - F2$ ) {
       $U = V - K - F1 - F2$ ; /* ports set with unknown states */
      for (each  $Z_a \in Z$ ) {
          if (any  $v_i \in (F1 \cap Z_a)$ ) {
              For (each  $v_i \in Z_a$ )  $v_i$ .owner.flag=1;
               $F1 = F1 + Z_a$ ;  $Z = Z - Z_a$ ;
          }
          if (any  $v_i \in (K \cap Z_a)$ ) {
              for (each  $v_i \in Z_a$ )  $v_i$ .owner.flag=0;
               $K = K + Z_a$ ;  $Z = Z - Z_a$ ;
          }
      } /* according to rule8 */
      for (each  $v_i \in (Z \cup S \cup U2)$ ) {
          if ( $v_i$ .owner.flag==0)  $K = K + v_i$ ;
          if ( $v_i$ .owner.flag==1)  $F1 = F1 + v_i$ ;
      } /* according to rule8 */
      for (each  $(v_i, v_j) \in S$ ) /* according to rule2 */
          if ( $v_i \in K$ ) {  $F1 = F1 + v_j$ ;  $S = S - (v_i, v_j)$ ;  $v_j$ .owner.flag=1; }
      for (each  $(v_i, v_j) \in H$ ) /* according to rule7
          if ( $v_i \in (K \cup F1)$ ) {  $F2 = F2 + v_j$ ;  $H = H - (v_i, v_j)$ ; }
      } /* end while */
  } /* diagnosis result is  $K, F1, F2$ , and  $U$  */

```

#### 2.4 算法的正确性

在系统级诊断中,通过测试收集节点信息的原理非常简单,但故障节点会产生欺骗性信息.如何不受错误信息的误导,而从测试结果中正确地识别出节点状态,是系统级诊断算法的主要任务和挑战.算法的前两部分只是根据扩展后的 PMC 模型和规则对算法的输入作了一些处理,并没有真正进入诊断.算法 Diagnosis 中,通过语句 2~语句 4 确定“诊断的初始集”: (1) 根据规则 rule3 从  $U_1$  中分离出软故障端口集合  $F1$ ; (2) 假设势最大的  $Z$  的割集为正常端口集合.

之后,while 语句 5 即从现有的诊断基础开始,根据诊断规则进行推理,扩充诊断结果.因此,整个诊断算法的正确性证明可归结为:势最大的  $Z$  的割集中端口状态都为正常,即 Diagnosis 算法语句 3 的假设成立.

**定理 1.** 设网络中故障端口数量满足  $\#V_f \leq \beta$ , 且势最大的  $Z$  的割集为  $Z_i, \delta = \#Z_i$ . 如果  $\delta > \beta$ , 则诊断正确.

证明: 假设  $Z_i$  中的端口并非全部为正常. 根据引理 1 可知,  $Z_i$  中  $\delta$  个端口都为故障, 得到  $\#V_f \geq \delta > \beta$ .

但是这与前提  $\#V_f \leq \beta$  矛盾. 因此假设不成立. 所以, 当  $\delta > \beta$  时,  $Z_i$  中端口都为正常, 因而 Diagnosis 算法中语句 3 成立, 以此为“诊断的初始集”可以得到正确的诊断结果.

**定理 2.** 设势最大的  $Z$  的割集为  $Z_i, \delta = \#Z_i$ . 如果故障端口数量满足  $\#V_f < \beta$ , 则诊断正确, 其中

$$\beta = \#(S \cup U_1 \cup H) / 2 - \#(S \cap U_1) + \delta - \#((S \cup U_1 \cup H) \cap Z_i).$$

证明: 由于  $S$  和  $U_1$  仅可能包含软故障端口,  $H$  可能同时包含软、硬故障端口, 因此, 设  $S$  和  $U_1$  中故障端口集分别为  $S_f$  和  $U_{1f}$ , 正常端口集分别为  $S_0$  和  $U_{10}$ . 设  $H$  中包含的正常和软、硬故障端口集分别为  $H_0, H_1, H_2$ . 设  $(A)_f$  表示集合  $A$  中的故障端口集合. 由于每个端口的状态是唯一的, 根据集合的容斥原理可得

$$\#(S \cup U_1 \cup H) \geq \#(S \cup U_1)_f + \#H_2 = \#S_1 + \#U_{1f} - \#(S_1 \cap U_{1f}) + \#H_2 \geq \#S_1 + \#U_{1f} + \#H_2 - \#(S \cap U_1) \quad (1)$$

根据规则 rule2, rule3 和 rule7 可知  $S, U_1$  和  $H$  中都至少有一半的故障端口, 所以

$$\#S + \#U_1 + \#H = (\#S_0 + \#S_1) + (\#U_{10} + \#U_{1f}) + (\#H_0 + \#H_1 + \#H_2) \leq 2\#S_1 + 2\#U_{1f} + 2\#H_2 \quad (2)$$

综合式(1)、式(2)和  $\#(S \cup U_1 \cup H) \leq \#S + \#U_1 + \#H$  可得

$$\#(S \cup U_1 \cup H) \geq \#(S \cup U_1 \cup H) / 2 - \#(S \cap U_1) \quad (3)$$

由于  $Z_i$  是  $Z$  的割集,  $Z_i \in Z$ , 且  $(S \cup U_1 \cup H \cup Z_i) = V$ , 所以

$$\#(S \cup U_1 \cup H \cup Z_i) \leq \#V_f \quad (4)$$

假设  $Z_i$  中存在故障端口,那么根据引理 1, $Z_i$  中的  $\delta$  个端口显然都为故障.综合式(1)~式(3)及容斥原理可得

$$\#(S \cup U1 \cup H \cup Z_i) \geq \#(S \cup U1 \cup H) / 2 - \#(S \cap U1) + \delta - \#((S \cup U1 \cup H) \cap Z_i) = \beta.$$

再根据(4)可得  $\#V_f \geq \beta$ .这与前提  $\#V_f < \beta$  矛盾,因此假设  $Z_i$  中存在故障端口不成立.

当  $\delta$  无法满足定理 1 或定理 2 的条件时,在 Diagnosis 算法中跳过语句 3 和语句 4,仅用  $F1$  作为“诊断的初始集”即可保证诊断的正确性.

### 3 仿 真

卫星网络通常以 walker 星座<sup>[1]</sup>为基础,以单层或多层星座的形式组网.walker 星座采用参数  $i:T/P/S$  进行描述,其中  $i$  为轨道倾角, $T$  是卫星总数, $P$  是轨道数, $S$  是相位参数.本文不详细讨论具体参数,将星座参数简化为  $T/P$ .为了评估本文算法在不同类型网络中的性能,仿真中采用单层和双层两种组网形式.单层网络采用 20/4 和 64/8 两种,分别包含端口 80 和 256 个.设单层网络中每颗卫星有 4 个端口,网络拓扑类似于网格状,如图 2 所示.仿真中采用的双层卫星网络拓扑如图 3 所示,其中 LEO 层采用 36/6 网络,MEO 层采用 4/2 网络,共 172 个端口.同轨道的两颗 MEO 因分处地球两侧而无法通信,但是每颗 MEO 与不同轨道的另外两颗 MEO 之间存在轨道间 ISLs.每颗 MEO 与多颗 LEO 之间存在 ISLs.

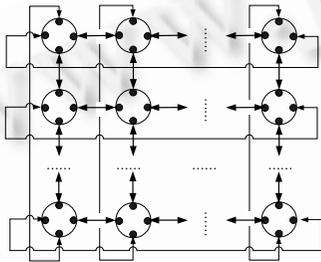


Fig.2 The topology of LEO networks  
图 2 LEO 卫星网络中的链路示意图

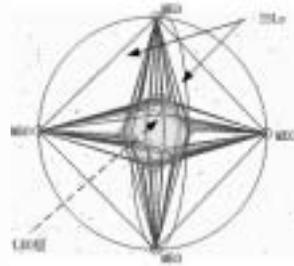


Fig.3 An example of MEO/LEO network  
图 3 MEO/LEO 网络结构的例子

端口通过广播的形式进行测试,理论上可以测试到其所有相邻端口(即一跳邻节点),而对卫星网络的拓扑类型则没有特殊限制.实验结果也表明,本方案适用于多种网络拓扑类型.

仿真输入参数除了网络拓扑以外,还包括  $f\%$  和  $p$ .

(1) 网络故障率  $f\%$ :设置故障端口总数量为  $\#V_f = n \times f\%$ .含有故障端口的卫星在网络中服从均匀分布.故障端口随机产生.实验中  $f\%$  取 0%~60%,步长为 10%;

(2) 参数  $p$  控制扩展 PMC 模型中端口的测试结果.当软故障端口测试正常端口时,测试结果服从二项分布  $B(1,p)$ :结果为 0 的概率是  $p$ ;结果为 1 的概率为  $(1-p)$ .当软故障端口测试软故障端口时,测试结果服从二项分布  $B(1,p^2)$ :结果为 0 的概率是  $p^2$ ;结果为 1 的概率为  $(1-p^2)$ .仿真中  $p$  取 0.5 和 0.25.

卫星向诊断中心上报测试结果涉及到卫星网络的路由问题,本文在研究中忽略该问题,简单地假设可以得到所有测试结果.仿真目的是评估算法的有效性和鲁棒性,分析参数  $f\%$  和  $p$  对算法性能的影响.在每种网络模型中,输入不同的  $f\%$  和  $p$  后,根据算法进行故障识别.仿真结果记录每次仿真的诊断完全率  $C\%$  和诊断通信量  $N$ ,其中  $C\% = [(n - \#U)/n] \times 100\%$ , $N$  是测试中  $m_{tsf}$  和  $m_{rsp}$  的总数.相同参数的实验重复 50 次,求出  $C\%$  和  $N$  的平均值,实验结果在表 2 中列出.实验发现,当  $f\% \leq 50\%$  时, $p$  值对算法的诊断完全率和诊断通信量没有明显影响;而当  $f\% > 50\%$ , $p=0.5$  时的诊断完全率要优于  $p=0.25$  时.

Table 2 Statistical results of experiments

表 2 实验数据统计结果

f%	Single-layer LEO network(20/4)				Single-layer LEO network(64/8)				Two-layer MEO/LEO network			
	p=0.5		p=0.25		p=0.5		p=0.25		p=0.5		p=0.25	
	N	C%	N	C%	N	C%	N	C%	N	C%	N	C%
0	160	100	160	100	512	100	512	100	538	100	538	100
10	150.52	88.97	150.80	89.13	493.40	94.11	494.08	94.39	526.55	98.04	666.08	95.40
20	146.44	86.25	147.22	85.96	483.68	92.16	484.26	91.78	513.16	95.70	660.20	93.80
30	142.72	82.95	141.28	81.33	470.04	88.31	470.08	87.02	503.42	93.97	640.92	91.45
40	141.68	77.70	140.12	77.29	459.64	77.39	459.90	74.11	488.25	91.64	612.36	87.17
50	137.04	71.88	137.84	66.25	455.52	64.65	453.44	59.86	475.12	88.99	602.76	85.29
60	132.72	38.60	134.32	25.55	435.12	41.17	439.78	27.46	467.57	85.15	585.60	79.78

图 4 和图 5 给出了  $p=0.5$  时,3 种网络中  $f\%$  与  $C\%$  和  $N$  之间的关系图.从图 4 可以看出, $N$  随网络端口总数量的增加而增加.随网络中故障端口数量的增加而减少.主要原因是  $N$  随可通信端口数量的增加而上升.从图 5 可以看出, $C\%$  随着网络故障端口数量的增加而降低,特别是  $f\%>50\%$  以后,单层网络中  $C\%$  大幅下降.这是由于  $f\%\leq 50\%$  时,网络症状可以满足定理 1 或定理 2 的条件,此时“诊断的初始集”包含  $K$  和  $F1$  两部分;而  $f\%>50\%$  时,网络症状无法满足定理 1 或定理 2 的条件,此时“诊断的初始集”仅包含  $F1$ .推理的初始条件较少,导致诊断完全率大幅降低.显然,“诊断的初始集”中包含的已知结果越多,诊断完全性相对就越好.

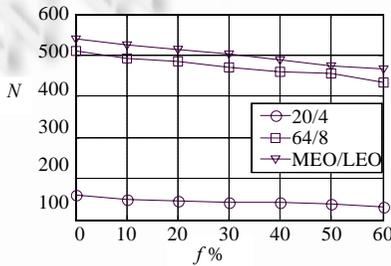


Fig.4 Relation of  $f\%$  and  $N$  when  $p=0.5$

图 4  $p=0.5$  时  $f\%$  与  $N$  的关系图

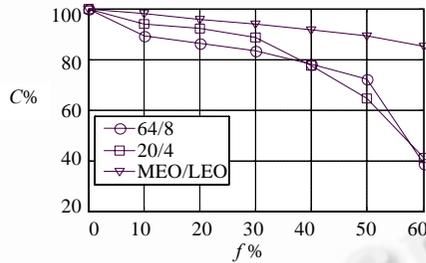


Fig.5 Relation of  $f\%$  and  $C\%$  when  $p=0.5$

图 5  $p=0.5$  时  $f\%$  与  $C\%$  的关系图

从仿真结果可以看出,算法在双层 MEO/LEO 网络中的诊断完全率明显好于在单层网络中,即使在  $f\%>50\%$  时,仍然能够保持较高的诊断完全率,体现了算法在双层网络中良好的鲁棒性.这种现象的主要原因在于,单层网络中每个端口实际只与一个端口通信,如果  $(v_i, v_j) \in H$ ,则无法判定  $v_i$  和  $v_j$  的状态.而双层网络中一个端口可与多个端口存在关系,参考信息较多,比如  $(v_i, v_j) \in H, (v_i, v_k) \in U1$ ,说明  $v_i$  是可通信端口,则根据 rule7 可知,  $v_j$  一定是硬故障.这样,  $H$  中部分端口的状态就可以推导出来.

#### 4 结论

本文在双层节点图的基础上,将 PMC 模型扩展到卫星网络中,随后提出一种基于扩展 PMC 模型的故障识别算法,并证明了算法的正确性.通过仿真对算法在不同规模和类型的卫星网络中的通信开销和诊断完全率进行了对比与分析,结果表明本文算法不会给网络带来大量的通信开销,并且在网络故障率不超过 30% 时,算法在 3 种实验网络中的诊断完全率都在 80% 以上,表明本文算法具有良好的鲁棒性.仿真中选取了单层和双层网络,结果表明本文算法在双层网络中的性能明显好于在单层网络中,说明本文算法不但可以应用到多种网络拓扑类型中,而且效果非常好.

**References:**

- [1] Quan QY, Hu JD. Satellite Communication. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2000 (in Chinese).
- [2] Preparata FP, Metze G, Chien RT. On the connection assignment problem of diagnosable systems. IEEE Trans. on Electronic Computers, 1967,16(6):848-854.
- [3] Somani AK, Agarwal VK, Avis D. A generalized theory for system level diagnosis. IEEE Trans. on Computers, 1987,36:538-546.
- [4] Kranakis E, Pelc A. Better adaptive diagnosis of hypercubes. IEEE Trans. on Computer, 2000,49(10):1013-1020.
- [5] Su MS, Thulasiraman K, Das A. A scalable on-line multilevel distributed network fault detection/monitoring system based on the SNMP protocol. In: Proc. of the IEEE GlobeCom 2002. 2002. 1960-1964.
- [6] Chessa S, Santi P. Comparison-Based system-level fault diagnosis in ad-hoc networks. In: Proc. of the 20th IEEE Symp. on Reliable Distributed Systems. New Orleans: IEEE Computer Society, 2001. 257-266.
- [7] Hou X, Fan ZH, Li L, Hong ZG. Fault diagnosis in satellite network by system-level diagnosis. In: Omidyar CG, Bourdoucen H, Naamany A, eds. Proc. of the 1st IFIP Int'l Conf. on Wireless and Optical Communications Networks. 2004. 151-154.
- [8] Hou X, Fan ZH, Li L, Xu FJ, She CD, Hu G. Algorithm of fault diagnosis for satellite network. In: Proc. of the Int'l Conf. on Intelligent Mechatronics and Automation. Chengdu: IEEE Computer Society, 2004. 594-598.

**附中文参考文献:**

- [1] 全庆一,胡健栋.卫星移动通信.北京:北京邮电大学出版社,2000.



侯霞(1976 - ),女,天津人,博士生,主要研究领域为网络管理,图论及应用.



胡刚(1971 - ),男,高级工程师,主要研究领域为网络安全,网络管理.



范植华(1942 - ),男,研究员,博士生导师,主要研究领域为并行计算,人工智能.



李嘉(1971 - ),男,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为操作系统,电子政务,软件工程.