

基于系统级诊断理论的卫星网络故障诊断

侯 霞¹, 范植华², 胡 刚²

(1. 北京机械工业学院计自系, 北京 100085; 2. 中科院软件所通用软件实验室, 北京 100080)

摘 要: 本文将系统级诊断引入到卫星网络的故障诊断领域. 针对卫星可以具有多个通信方向且可以部分通信失效的特性, 提出了一种新颖的卫星网络建模方法——双层节点图, 设计了基于广播的卫星网络系统级诊断方案, 并对其通信开销进行了理论分析. 测试中充分利用了卫星广播和一对多的通信模式, 使本方案不但适用于任意类型的网络拓扑, 而且可以节省通信量. 仿真结果表明诊断的通信开销随网络中可通信端口数量的减少而下降.

关键词: 系统级诊断; 故障检测; 故障诊断; 卫星网络; 双层节点图

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 11-2066-04

Fault Diagnosis Based on System-Level Diagnosis for Satellite Networks

HOU Xia¹, FAN Zhi-hua², HU Gang²

(Department of Computer and Automation, Beijing Institute of Machinery, Beijing 100085, China;

2 General Software Lab, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: System level diagnosis was introduced into the fault diagnosis for satellite networks. A novel modeling method for satellite networks, two level node graph, was presented to characterize the specialty that a satellite could have more than one communication directions and its communication function could be faulty partly. Then a strategy of the system level fault diagnosis for satellite networks was designed based on broadcast and its communication complexity was analyzed theoretically. The satellites' broadcast and one to many communication modes were taken advantage of when testing so that our strategy is applicable to arbitrary topology and saves communication overhead. Simulation results show that the communication overhead reduces while the number of ports, which can communicate, decreases.

Key words: system level diagnosis; fault detection; fault diagnosis; satellite networks; two level node graph

1 引言

卫星通信因其通信距离远、覆盖面积大、组网灵活、机动性好等特点, 已成为一种不可或缺的通信手段. 星际链路 (Inter satellites Links, ISLs) 的加入使卫星间可以脱离地面而直接通信, 形成真正的空中网络^[1]. 加入 ISLs 在大大提高网络连通性和自治性的同时, 也使网络更为复杂. 要保证此类系统的可靠性和容错性, 网络的故障检测与诊断是至关重要的. 但是目前对卫星网络故障诊断的研究还处于起步阶段, 多限于对天上告警数据的收集, 而没有进行深入地故障诊断工作.

Preparata 等人提出的系统级诊断^[2] (System level Diagnosis, SLD) 是一种针对多处理器系统的诊断方法, 其原理是根据节点间的相互测试及结果来诊断节点状态. 由于该方法诊断粒度大, 与设备具体构造的相关性相对较小, 通用性较好, 成为故障诊断领域的一项研究热点^[3~6], 并被用于计算机网络^[4] 和 Ad hoc 网络^[5].

本文将 SLD 方法引入到卫星网络中. 由于卫星可以具有

多个通信方向且可以部分通信失效, 因此 SLD 采用图建模的方法无法直接应用于卫星网络. 针对这一问题, 本文提出一种新颖的系统建模方法——双层节点图, 同时设计一种基于广播的卫星网络系统级故障诊断方案, 并对其通信开销进行分析与仿真.

2 卫星网络系统级诊断

2.1 双层节点图

系统建模是 SLD 的一项基础工作, 通常采用图^[7]的形式, 图中顶点表示被诊断节点, 有向边表示测试及其结果. 文献^[5]中假设 Ad hoc 网络的移动节点具有全向天线并将其作为被诊断节点. 卫星网络与 Ad hoc 网络具有一定的相似性, 例如无线通信, 节点可移动等, 因而相关技术可以借鉴. 但是由于卫星上通常不采用全向天线, 因此将卫星作为被诊断节点的抽象方法过于粗糙. 一种较为合理的假设是: 设星上具有一至多个定向天线, 从而卫星可以具有多个通信方向且可以部分通信失效. 为了充分体现这一特点, 本文从卫星中抽象出

“端口”作为网络的通信节点和被诊断节点。

端口(Port)是卫星收发器及其较为直接的影响因素(如定向天线、电源等)的综合抽象。端口所在卫星称为其属主(Owner)。每个端口的通信方向由与其关联的定向天线决定,通信范围由天线和发射功率等因素共同决定,在该范围内可存在不止一个通信对象。

为了在系统级诊断建模中更好地体现“网络-卫星-端口”这种层次关系,本文对图进行扩展,提出双层节点图(two level node graph)。

定义 1 双层节点图定义为一个有序的五元组 $D = (S, V, L, \phi, \Psi)$ 。有穷非空集合 S 和 V 分别是高层和低层顶点集合; L 是有向边集合。 ϕ 是 V 到 S 的映射函数,每个 V 中的元素与且仅与一个 S 中的元素存在“属于”关系,如果 $\phi(v_i) = s_p$, 则称 s_p 为 v_i 的属主。边 $l \in L$ 是一个有序的二元组 $e = (e_H, e_L)$, 其中 e_H 和 e_L 分别对应一个有序的高层顶点对和一个有序的低层顶点对,且两个高层顶点分别是两个低层顶点的属主。 Ψ 是边与有序顶点对之间的映射函数。

在 D 中,若 $l \in L$,且

$$\Psi(l) = ((\phi(v_i), \phi(v_j)), (v_i, v_j)) = ((s_p, s_q), (v_i, v_j))$$

其中 $s_p, s_q \in S, v_i, v_j \in V$, 则称边 l 与顶点 s_p, s_q, v_i 和 v_j 关联; s_q 和 s_p 是 l 的高层头和尾, v_j 和 v_i 是 l 的低层头和尾;称 v_i 和 v_j 相邻。将 v_i 的所有邻点的集合称为 v_i 的邻域,记为 $N(v_i)$ 。

图形表示中,高层顶点用较大的空心圆表示,低层顶点用较小的实心圆表示并位于其属主内部,边用带箭头的弧线表示起始方向,从边的尾指向头。为了书写方便,在有图形参照时,可以把 $D = (S, V, L, \phi, \Psi)$ 简化为 $D = (S, V, L)$, 此时 L 中的边直接用它的两个有序顶点对来表示,关系 ϕ 从参考图形中直观得到。

每个双层节点图可以看作由高层图 $D_H = (S, L_H)$ 和低层图 $D_L = (V, L_L)$ 叠加而成,每层是一个有向图。其中 L_H 和 L_L 分别是 D_H 和 D_L 的有向边集合,其中的边一一对应。例如如图 1 所示。

2.2 卫星网络建模

在卫星网络建模中,双层节点图中的高层和低层顶点分别表示卫星和端口。由于端口仅有一个属主,因此设卫星和端口在网络中分别具有唯一标识,则双层节点图的边可用与其关联的低层头和尾来标记。如图 1(a)中的边 l_1 可以记为 (v_1, v_2) 或 $l_{1,2}$ 。

为了体现卫星网络拓扑时变的特性,在双层节点图中加入时间 t , 对卫星网络 t 时刻的理论状态和实际状态分别进行建模。基本思想是利用卫星运动的周期性,将系统时间分为一组时间间隔,拓扑只在每个间隔的开始时变化而在其他时间保持恒定^[8]。即将网络在 t 到 $(t+1)$ 间的状态看作是静态

的,系统级诊断在此间隔内进行。

(1)理论状态模型 利用卫星运动的规律性计算出网络 t 时刻的理论状态,建模为 $D(t) = (S, V, L(t))$, 其中 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 和 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 分别是卫星和端口集合, $L(t)$ 为理论上网络 t 时刻应有的链路。设通信是双向的,则 $l_{i,j} \in L(t)$ 当且仅当 $l_{j,i} \in L(t)$ 。任意 $v_i \in V$ 在 t 时刻的邻域为

$$N(v_i, t) = \{v_j | l_{i,j} \in L(t), j = 1, 2, \dots, n\}$$

(2)实际状态模型 设 $D^T(t) = (S^T, V^T, L^T(t))$ 为网络 t 时刻的测试图。 $L^T(t)$ 为 t 时刻端口间的测试及结果。当且仅当 v_i 测试 v_j 并得到测试结果 x 时,有 $l_{i,j} \in L^T(t)$, 边值为 x 。

对于任意 $v_i \in V^T, v_i$ 的被测端口集和测试端口集分别表示为

$$\Gamma(v_i, t) = \{v_j | l_{i,j} \in L^T(t), j = 1, 2, \dots, n\}$$

$$\Gamma^{-1}(v_i, t) = \{v_j | l_{j,i} \in L^T(t), j = 1, 2, \dots, n\}$$

v_i 的邻域即为 $N^T(v_i) = \Gamma^{-1}(v_i, t) \cup \Gamma(v_i, t)$ 。

一般情况下,测试图与理论状态图的关系为: $D^T(t) \subseteq D(t)$ 。图 2 是某时刻一个卫星网络的理论状态图及相应测试图的例子。

2.3 系统级诊断方案

为了简化问题研究,设卫星网络模型满足:

(A1) 端口具有测试和被测的功能,由通信实现。

(A2) 诊断中心能计算卫星网络任意时刻的理论拓扑。

(A3) 端口的状态是正常、软故障或硬故障。硬故障指端口失效,无法进行通信。卫星网络硬故障产生的原因可能是星上电池损耗、天线失效等。软故障指计算错误。

(A4) 不考虑链路故障。设可通过重传和误码检测等机制保证测试的可靠性。

(A5) 诊断期间网络拓扑不发生变化。

(A6) 故障是静态的。即在上次诊断完成前,节点的状态不发生变化。

本文设计的卫星网络系统级故障诊断方案分为星上测试和集中诊断两部分:

(1)星上测试 本文采用一种简单有效的测试方法:端口向外广播测试请求,并根据被测端口返回的测试响应结果来判断被测者的状态。由于硬故障端口无法返回响应,因此为避免无限等待设定一个 T_{out} , 端口向外广播测试后在 T_{out} 内返回的测试响应视为有效。设星间通信时延主要由星间距离决定,

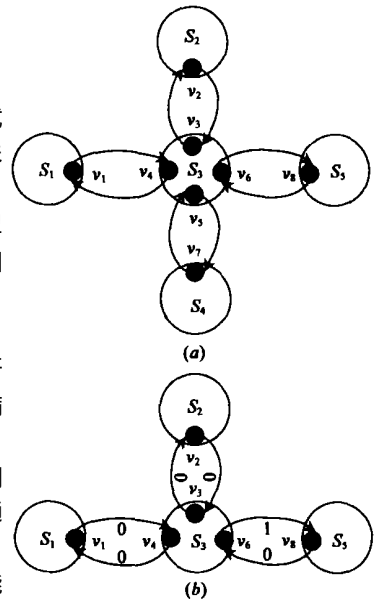


图 2 (a)卫星网络理论状态图;(b)相应测试图

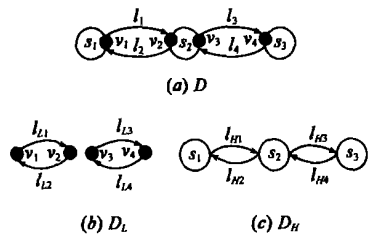


图 1 双层节点图 D 及其低层图 DL 和高层图 DH

其他如排队时延、处理时延等忽略不计,则设置 T_{out} 值应主要考虑通信的最大星间距离,及为保证测试的可靠性所需重传的时间需求。但是该值应小于拓扑保持稳定的时间间隔。测试的具体过程如下:

(a) 一个测试周期开始时,所有卫星的时戳 t 加 1, 计数器 Δt 清 0。

(b) 端口 v_i 生成测试任务 T_i 及其预期结果 R_i , 生成并向外广播测试请求报文 $m_{is} = (i, t, T_i)$ 。

(c) 任意 $v_j \in \Gamma(v_i, t)$ 收到 m_{is} 后, 生成并返回测试响应报文 $m_{rp} = (j, t, R_{i,t})$, 其中 $R_{i,t}$ 是对 T_i 的执行结果。

(d) v_i 收到 $m_{rp} = (j, t, R_{k,t})$ 且 $\Delta t < T_{out}$, 则提取 $R_{k,t}$:

(d1) 如果 $k = i$, 则表示 m_{rp} 是对 v_i 测试的正常响应。

• 如果 $R_{i,t} = R_i$, 则 v_i 标记 v_j 为正常 ($x = 0$)。

• 否则, 标记 v_j 为软故障 ($x = 1$)。

(d2) 否则, 丢弃 m_{rp} 。

(e) 一旦 $\Delta t = T_{out}$, 卫星将所有端口的测试结果打包成报文 m_{vp} , 上报到诊断中心。

(2) 集中诊断 为了解决星上处理能力受限的问题, 通过测试对端口状态进行收集后, 采用集中式诊断。诊断中心利用星上测试结果集成测试图 $D^T(t) = (S^T, V^T, L^T(t))$ 。即星上时戳为 t 时, 如果 v_i 测试 v_j 的结果为 x , 则 $v_i, v_j \in V^T, \phi(v_i), \phi(v_j) \in S^T, l_{i,j} \in L^T(t)$ 且边值为 x 。端口采用广播的形式进行测试, 理论上其所有邻点都可以收到测试, 但是由于硬故障端口无法返回响应, 因此对比 $D^T(t)$ 和理论图 $D(t)$ 时可能存在 $(l_{i,j} \in L(t)) \wedge (l_{i,j} \notin L^T(t))$, 此时在 $D^T(t)$ 中加入边 $l_{i,j}$ 并设边值为 2 至此得到一个完整的测试图。

本方案中各卫星同时进行测试, 可以提高诊断效率、最小化诊断延时。基于广播的测试方案充分利用了一对多的通信模式, 端口可以用一个测试动态地测试其多个邻点, 使得本方案不但适用于任意类型的网络拓扑, 而且可以减少重复发送带来的通信量。

3 诊断开销

本部分将以报文数量 N 来衡量卫星网络系统级诊断的通信开销。设卫星网络的理论图 $D(t) = (S, V, L(t))$, 其中 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 和 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是卫星和端口集合。设 $\delta_{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} |N(v_i, t)|_{1 \leq i \leq n}$ 。

任意端口 v_i 利用卫星一对多广播的功能, 最多生成一个测试请求报文, 最多产生 $|N(v_i, t)| \leq \delta_{\max}$ 个响应报文。因此测试通信量最多 $n(1 + \delta_{\max})$ 为个报文。

对于任意卫星, 综合星上端口测试结果仅产生一个 m_{vp} 报文, 并至多经过 $(m-1)$ 次卫星转发到达诊断中心。

因此, 一个诊断过程中 N 最多为 $n(1 + \delta_{\max}) + m^2$ 。

下面通过仿真分析诊断的通信开销。仿真网络是拓扑如图 3 所示的双层卫星网络, 其中包括 36 颗低轨 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星和 4 颗中轨 (Medium Earth Orbit, MEO) 卫星, 共 172 个端口, $\delta_{\max} = 25$, 则按照理论分析 $N \leq 6072$ 。仿真中分别评估了一对多和一对一两种通信模式下所需的诊断开销。设

网络中 $f\%$ 的端口是故障 (包括软、硬故障), 图 4 中是通过仿真得出的 $f\%$ 与 N 的关系图。分析仿真结果可知: 实际通信量随网络中可通信端口数量的减少而减少, 且远小于理论值 $n(1 + \delta_{\max}) + m^2$; 与一对一的通信模式相比, 本文采用一对多的广播模式进行测试可以节省大量的通信开销。

4 结束语

针对卫星可以具有多个通信方向且可以部分通信失效的特点, 本文提出了一种新颖的系统级诊断建模方法——

双层节点图, 在建模时

可充分体现卫星网络中“网络-卫星-端口”的层次关系。在此基础上, 本文提出了卫星网络系统级故障诊断方案, 并对其通信开销进行了理论分析。由于测试中充分利用了卫星广播一对多的通信模式, 使其不但适用于任意类型的网络拓扑, 而且可以减少重复发送带来的通信量。仿真结果表明诊断开销随网络中可通信端口数量的减少而下降, 且远小于理论分析值; 并验证利用一对多的通信模式确实可以节省通信开销。

本文工作属于系统级诊断中的建模和方案设计。下一步将具体研究与测试模型相关的诊断算法, 通过对测试图的分析得出最终诊断结果。

参考文献:

- [1] 全庆一, 胡健栋, 等. 卫星移动通信[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000.
- [2] PREPARATA F P, METZE G, CHIEN R T. On the connection assignment problem of diagnosable systems [J]. IEEE Trans on Electronic Computers, 1967, 16(6): 848-854.
- [3] SENGUPTA A, DAHBURA A T. On self diagnosable multi-processor systems: diagnosis by the comparison approach [J]. IEEE Trans on Computers, 1992, 41(11): 1386-1396.
- [4] DUARTE E, NANYA T. A hierarchical adaptive distributed system level diagnosis algorithm [J]. IEEE Trans on Computers, 1998, 47(1): 34-45.
- [5] CHESSA S, SANTI P. Comparison based system level fault diagnosis in Ad-Hoc networks [A]. Proceedings of IEEE 20th Symp on Reliable Distributed Systems [C]. New Orleans,

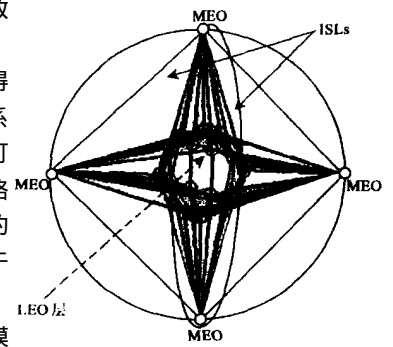


图 3 LEO/MEO 网络的拓扑图

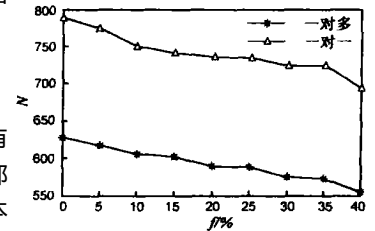


图 4 网络故障率与诊断数据量的关系图

2001. 257- 266.

- [6] 宣恒农, 张大方, 张明. PMC 故障模型的方程诊断[J]. 电子学报, 2003, 31(5): 694- 697.

XUAN Heng nong, ZHANG Da fang, ZHANG Ming. The equation diagnosis on PMC fault model[J]. ACTA Electronica Sinica, 2003, 31(5): 694- 697.

- [7] GROSS J, YELLEN J. Graph Theory and Its Application[M]. Boca Raton, Fla: CRC Press, 1999.

- [8] WERNER M. A dynamic routing concept for ATM based satellite personal communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(8): 1636- 1648.

作者简介:



侯 霞 女, 1976 年生于天津, 现于中科院软件所攻读计算机应用专业的博士学位, 研究兴趣有网络故障管理和人工智能等.

E mail: helenhou0927@ hotmail. com.



范植华 男, 1941 年生, 江苏南京人, 中科院软件所研究员, 博士生导师, 研究兴趣有数字化、并行处理和人工智能.