

卫星网络基于 ATM 鲁棒路由算法中的链路诊断^{*}

赵志刚¹ 李航² 王光兴¹

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)¹ (沈阳师范大学 沈阳 110034)²

摘要 针对使用星际链路 ISL(intersatellite links)的 LEO 卫星系统,提出一种基于 ATM 的鲁棒路由算法。只要源卫星与目的卫星之间存在一条通路,二者便可以实现通信。本文关注的是路由算法中的链路诊断部分。源卫星首先利用收集的不可达信息构建离散时间动态虚拟拓扑图(DT-DVTG)(discrete-time dynamic virtual topology graph),然后通过概率的方法诊断出最可能出现故障的链路,再经过快速的测试可精确定位故障链路。由于链路诊断过程支持动态路由,使鲁棒路由算法在保持原有动态路由算法各项性能指标的基础上进一步提高了鲁棒性。

关键词 卫星网络,星际链路,鲁棒路由算法,链路诊断

Diagnosis of Links in ATM-Based Robust Routing Algorithm in LEO Satellite Communication Networks

ZHAO Zhi-Gang¹ LI Hang² WANG Guang-Xing¹

(School of Information Sciences & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)¹

(Shenyang Normal University, Shenyang 110034)²

Abstract A robust ATM-based routing algorithm for LEO satellite systems employing ISL is proposed, by which a source satellite can communicate with any end satellite, so long as a path exists between the source satellite and the destination satellite. The focus of this paper is on faulty links' identification part of the routing algorithm. At first, a source satellite builds discrete-time dynamic virtual topology graph(DT-DVTG)based on collected unreachable path information, then it can detect the most probable failed network links through probability method, and the actual failed links can be accurately pinpointed through quick and autonomous testing. Because of its supporting dynamic routing concept, the robust routing algorithm can be further improved the robustness on the ground of the performance of the original dynamic routing algorithm.

Keywords Satellite networks, Intersatellite links (ISL), Robust routing algorithm, Diagnosis of faulty links

在当今世界,无论在军事上还是在商业中,全球通信都受到重视。在通信系统领域,卫星通信具有覆盖范围广、能够灵活地按需分配带宽,以及容易接入新用户等优点,已经成为通信领域的一个重要的组成部分。在卫星系统中,低地球轨道 LEO 卫星系统由于能够提供世界范围内的连接和实时语音通信服务而成为卫星通信近期研究的新热点。因为 LEO 具有相对地面高速运行及其网络拓扑结构的快速动态变化等特点,有可能由于负载的不均衡或不能正常工作的节点而产生拥塞,由于设备的故障或电源能量不足而造成链路断开等^[1]。特别是在战争等条件下的军事卫星网络,卫星链路故障更会是大量地、频繁地出现,这就给卫星网络的健壮性提出了更高的要求。

近几年,提出的许多的路由算法^[2~6]都是假设卫星网络是面向连接的网络结构,也就是进行 ATM 或类似 ATM 的交换,这些路由算法是离线(offline)计算好在每一个时间 Δt 内某颗卫星到其它每一颗卫星的一条最佳路由。基于 ATM 的路由算法具有它的优点^[2],但是这些路由算法把重点放在初始路径的建立阶段并且在适应性和鲁棒性上也要明显低于基于数据报(datagram)的路由算法^[7]。许多学者都在探求基于面向连接网络结构的健壮的路由算法。为了增强健壮性,文^{[2]、[3]}提出的基于 ATM 的动态路由算法按上述算法同时计算出若干个后备路由,并且在同一对源节点和目的节点

之间、各个路由路径之间不相交(即不同路径之间不存在重复链路)。这些动态路由算法简单、快速,但是后备路径由于必须满足互不相交的条件,所以不是最优的,且没有充分利用没有毁坏的链路,健壮性也只是一定程度上的。当毁坏的链路达到一定数量时,网络的性能将急剧下降,且有可能出现某些对源节点和目的节点不能互相通信的情况。为此,我们提出的鲁棒路由算法,只要源卫星与目的卫星之间存在一条路径源卫星,便可以与目的卫星通信。并且,当存在多条路径时,源卫星能够寻找出一条从源卫星到目的卫星的最优路径,既保证了网络的性能,又大大提高了网络的鲁棒性。该鲁棒路由算法是在链路检测的基础上进行的。本文对鲁棒路由算法不做讨论,只关注其中的链路检测部分。

到发稿时止,还没有读到关注卫星链路故障诊断方面的文献,把链路检测应用于路由算法中更是无前例的。与之相反,地面通信网的故障管理方法却很多,大量的专家系统被研制出来^[8~10]。然而,这些系统对今天的不断发展的网络需求而言不够灵活,这种方法的性能需进一步优化。Clarn 和 Schwatz 提出了一种把贝叶斯理论应用到地面通信网检测链路故障的方法(以下简称 C-S 方法)^[1],但该方法适用于具有固定网络拓扑结构的大型通信网络,且该方法检测得不彻底,尤其需要人工干预。上述这些故障检测方法运行在应用层,需要网络管理协议(如 CMIP 协议)的支持。由于卫星移动引

^{*} 国家“八六三”高技术项目(2002AA784030)。赵志刚 讲师、博士研究生,主要研究领域为卫星网络、网络管理、路由策略;李航 博士研究生,主要研究领域为网络管理、路由策略、ATM 技术;王光兴 教授、博士生导师,国务院学位委员会学科评议组成员,主要研究领域为宽带网络技术、ATM、网络管理。

起的网络拓扑的不断变化且卫星在高空中运行,不便人工干预,而且由于要把该机制应用于路由算法,这就要求链路检测的速度必须快。尽管它是在后台进行的,不会增加在线路由选择时间。

本文的链路检测算法是基于文[2]、[3]提出的周期地离散时间可变的 ISL 子网的拓扑结构展开的。整个卫星网络拓扑可以被认为是周期性重复的,由 K 个拓扑“快照”组成。“快照”时间间隔 $\Delta t = T/K$, T 为卫星沿着地球轨道运行的周期。每个“快照”上,卫星通信系统的拓扑各不相同,但是对每一 t 到 $t + \Delta t$ 时间间隔内的拓扑相同且固定,卫星网络的所有 K 个拓扑“快照”组成了卫星动态网络虚拓扑。

1 问题的提出

假设图 1 为某一 Δt 时间间隔内卫星运行“快照”的网络拓扑图。选定其中某一颗卫星为源卫星 n_1 。 n_1 在与其它卫星通信时,可能出现下面的情况。如图 2 所示,是卫星网络的一部分, n_1 为源节点。 n_1 与不同的目的节点通过下列路径通信:

$n_1 \rightarrow n_2 \rightarrow n_7 \rightarrow n_{12} \rightarrow n_{14}$, $n_1 \rightarrow n_3 \rightarrow n_7 \rightarrow n_{12} \rightarrow n_{15}$, $n_1 \rightarrow n_3 \rightarrow n_9 \rightarrow n_{12} \rightarrow n_7 \rightarrow n_{11}$, $n_1 \rightarrow n_3 \rightarrow n_7 \rightarrow n_{12}$

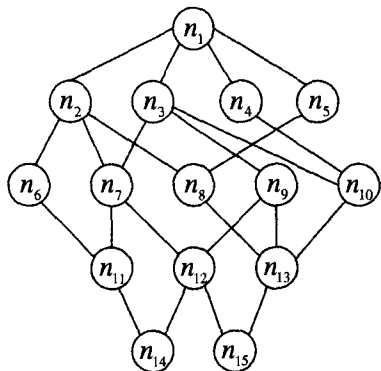


图 1 “快照”的以 n_1 为源节点的卫星网络拓扑图

由于某些链路出现了故障,这 4 条路径同时失效了。那么哪些故障链路会引起这 4 条路径同时失效呢?从直观上,我们最先想到的可能是链路 L_6 出现了故障,因为这些路径都经过链路 L_6 ;其次想到也可能是 L_1 、 L_4 出现了故障,也可能 L_2 、 L_4 出现了故障,……,甚至可能是 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 、 L_7 、 L_8 、 L_9 、 L_{10} 都出现了故障等等。若对每一条路径上的所有链路做完全的测试,需要测试 16 次。且测试的次数随着失效路径数和每条路径上的链路数的增加而增加。这时我们会想到,若按照出现故障的可能性,找出这些路径上所有链路中最可能出现故障的链路进行检测,然后再检测其余链路中最可能出现故障的链路,如此继续下去,直到找出所有的故障链路为止,则会减少很多不必要的测试次数。显然,在本例中应先判断链路 L_6 是否出现了故障。若链路 L_6 故障,则不用再检测下去了;若链路 L_6 正常,再判断 L_1 、 L_4 ,其余同理。按照这个思路,本文提出通过概率方法,找出这些路径上所有链路中故障概率最大的链路。那么通过概率方法找到的故障链路是否真的发生了故障,还需要进行测试定位。为了能够彻底地检测出网络中所有的故障链路,本文把所有的可能故障链路都包含到一个可能故障链路集里,每进行一次检测和定位就从可能故障链路集里排除一部分可能故障链路,直到可能故障链路集为“空”为止,这时就彻底检测并定位出了网络中所有

的故障链路。

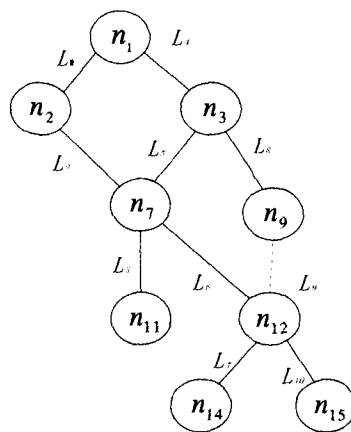


图 2 卫星网络的一部分

2 DT-DVTG 模型的建立过程

下面以图 1 为例,介绍 DT-DVTG 模型的建立过程。检测卫星网络的链路故障,需要构建 DT-DVTG 模型。首先介绍虚拓扑的概念。在 Δt 时间间隔内不同的时间点上,同一个源节点到不同目的节点的所有不可达路径的集合,构成了离散时间点上的虚拓扑图。由于卫星的动态运动,引起不同时间间隔内虚拓扑图也是不同的、动态变化的。这些动态变化的离散时间点上的虚拓扑图组成了 DT-DVTG 模型。假设每颗卫星都了解整个卫星网络的拓扑。路径的选择采用文[2]、[3]提出的动态路由算法。假设每条卫星链路故障是独立的,链路 L_k 的故障概率为 p_k , p_k 能够由链路 L_k 故障的平均次数测得。

为了能够对本文的基本概念有一个清晰的了解,特给出如下一些定义。

不可达节点:从源节点到目的节点路由失败一次,该目的节点便成为不可达节点。

不可达路径:从源节点到不可达节点,路由失败所经过的路径。

可达节点:不可达路径上,从源节点沿此不可达路径可以到达的中间节点。

可达路径:从源节点到目的节点路由成功所经过的路径。

不确定节点:不可达路径上,沿此不可达路径源节点不知道其是否可达的中间节点。

每条不可达路径上一定存在一条或几条故障链路,而不同的不可达路径的不可达性可能是由相同的或者不同的链路故障引起的。本文引入“可达节点”概念是为了更快、更准确地利用第 3 节介绍的链路故障检测和定位算法,判断出故障链路的位置。构造离散时间动态虚拓扑模型,目的是使故障链路能够“暴露”在 DT-DVTG 图上,然后通过概率方法检测并定位出来。

用 $P' = \{p'_1, p'_2, \dots, p'_n\}$ 表示 Δt 时间间隔内不可达路径的集合, P' 集合组成了 DT-DVTG 模型。用 $G(V_k, E_k)$ 表示 DT-DVTG 中的 p'_k , 其中 V_k 表示该不可达路径上节点的集合, $V_k = (n_{k1}, n_{k2}, \dots, n_{km})$, m 是节点数; E_k 表示相邻节点 $n_{ki}, n_{kj} \in V_k, i \neq j$ 之间边的集合。把集合 V_k 分为 3 个互不相交的子集 $V'_k, V''_k, W_k, V'_k \cap V''_k = \Phi, V'_k \cap W_k = \Phi, V''_k \cap W_k = \Phi, V'_k + V''_k + W_k = V_k$, 其中 V'_k 表示 $G(V_k, E_k)$ 中不可达路径上不可达节点的集合, V''_k 表示 $G(V_k, E_k)$ 中不可达路径上

可达节点的集合, W_k 表示 $G(V_k, E_k)$ 中不可达路径上不确定节点的集合。用 P' 表示可达路径集合, l_k 表示 p'_k 上的可能故障链路集合, l 表示 DT-DVTG 模型上可能故障链路的集合。

2.1 可达性信息的收集

收集的可达性信息要求是源节点到其它目的节点最新的信息, 因此规定保存且只保存前一 Δt 的信息。

以源节点 n_1 与目的节点 n_{12} 通过动态路由算法通信为例。已知用动态路由算法离线地计算出从源节点 n_1 到目的节点 n_{12} 的优化路径 $R_1: n_1 \rightarrow n_2 \rightarrow n_7 \rightarrow n_{12}$, $R_2: n_1 \rightarrow n_3 \rightarrow n_9 \rightarrow n_{12}$, $R_3: n_1 \rightarrow n_4 \rightarrow n_{10} \rightarrow n_{13} \rightarrow n_{15} \rightarrow n_{12}$, $R_4: n_1 \rightarrow n_5 \rightarrow n_8 \rightarrow n_2 \rightarrow n_6 \rightarrow n_{11} \rightarrow n_{14} \rightarrow n_{12}$ 。由于是离线计算出 n_1 具有的所有可达路径, 因此 n_1 本身应知道到达 n_{12} 所有路径。信息收集过程如下:

(1) 初始化 $P' = \Phi, P'' = \Phi, V'_i = \Phi, V''_i = \Phi, W_i = \Phi, i = 0$ 。

(2) 当优化路径 R_1 成功时, 把 R_1 放入 P' 转步骤(3)。若 R_1 失败, $i = i + 1$, 把 R_1 作为第 i 条不可达路径 p'_i 放入 P' , 同时把 n_{12} 放入 V'_i 。接着选择 R_2 重复 R_1 的处理过程, 直到某一路径成功, 把该路径加入 P' 或所有备用路径用完。

(3) 当源节点与另一目的节点通信时, 转步骤(2)。

从源节点到目的节点的可达和不可达信息收集得越多, 下面第 3 节网络级链路故障检测和定位过程判断故障所用的步骤越少, 检测的次数也越少, 增加了快速性。收集的信息越多, 暴露的故障链路越多, 检测得越全面、彻底。由于源节点在 $K\Delta t \sim (K+1)\Delta t$ 时间间隔内同时可能与几乎所有的目的节点通信, 而且与其中某一个目的节点通信时存在多条互不相交的备用路径, 因此源节点收集信息的范围几乎可以覆盖全网。

2.2 DT-DVTG 模型的建立

经过信息收集过程后, 就可建立离散时间动态虚拓扑模型了。易知, 与可达节点相通的节点一定是可达节点(这里的相通指无故障); 从源节点开始不可达路径上与可达路径相重合的节点属于可达节点。

下面仍以图 1 为例, 说明 DT-DVTG 模型的建立过程。

(1) 设 i 为从 P' 中取出的不可达路径的个数, 令 $i = 0$ 。

(2) $i = i + 1$, 从 P' 中取出不可达路径 p'_i , 把 p'_i 上所有节点加入 V_i 。接着先从 P' 中找到一条与不可达路径 p'_i 从源节点开始重合最多的可达路径, 把重合的节点归于可达节点集 V''_i 。

(3) 然后, 从重合的靠近目的节点的节点开始, 从所有可达路径里验证此节点沿不可达路径与之相连的下一个节点连通性。若连通, 则此相连的节点为可达节点, 放入可达节点的集合 V''_i , 继续步骤(3)。否则, 往下执行步骤(4)。

(4) 继续执行步骤(2), 直到取出 P' 中所有的不可达路径为止。 V_i 中除了 V'_i, V''_i 中的节点外的节点都属于不确定节点集合 W_i 。

如图 3, 为图 1 的以 n_1 为源节点的 DT-DVTG 模型。其中, $P' = \{n_1 \rightarrow n_3 \rightarrow n_9 \rightarrow n_{13}, n_1 \rightarrow n_4 \rightarrow n_{10} \rightarrow n_{13}, n_1 \rightarrow n_4 \rightarrow n_{10}\}$, 而 $V'_1 = \{n_{13}\}, V''_1 = \{n_3, n_9\}, W_1 = \{\}, l_1 = \{L_2\}, V'_2 = \{n_{13}\}, V''_2 = \{\}, W_2 = \{n_4, n_{10}\}, l_2 = \{L_4, L_1, L_3\}, V'_3 = \{n_{10}\}, V''_3 = \{\}, W_3 = \{n_4\}, l_3 = \{L_4, L_1\}$ 。

3 链路故障的诊断和定位

3.1 链路诊断

建立了 DT-DVTG 模型后, 需要在 DT-DVTG 模型上用割线进行切割。割线是由在每一条不可达路径上各取一条可能故障链路组成的。不同的割线要求至少有一条组成的链路不同, 即割线集合是由各个不可达路径上的可能故障链路组合而成。这样, 任一割线上的所有链路断掉, 便可引起管理节点与所有不可达节点不能通信。由于篇幅所限, 求割线过程略。

建立了 DT-DVTG 模型并用切线切割以后, 就要分别对每一条可能故障链路计算其引起源节点与不可达节点不能通信的概率, 从中选出概率最大的可能故障链路。然后通过 3.3 节的定位过程确认该链路是否真的出现了故障。若确认了该链路是故障链路, 则把该链路所在的所有不可达路径及这些路径上的所有可能故障链路从 DT-DVTG 模型中移去。因为一条不可达路径上只要有一条故障链路, 便可引起该条路径不通, 该不可达路径上其它的可能故障链路就不用检测了, 这样一些不可达路径就从 DT-DVTG 模型移除了; 若确认了该链路正常, 则原来的一些不确定节点可能成为可达节点, 从而加速了故障检测进程。重复上述检测过程, 直到定位了所有可能故障为止, 即 $l = \{\}$ 结束。

令 $C_i = 0$ 表示割线 C_i 上所有链路都出现了故障, $L_k = 0$ 表示可能故障链路 L_k 出现了故障, 则由 L_k 引起管理节点与所有不可达节点不能通信的概率为 $P_{(L_k=0)}(C_1 = 0 \cup \dots \cup C_r = 0) \cdot p_k$, 式中 p_k 表示链路 L_k 出现故障的概率。而 $L_k = 0$ 在 DT-DVTG 模型上表现为把链路 L_k 从该模型中移去。下面推导故障概率公式, 过程如下:

(1) 当存在 2 条割线时,

$$P_{(L_k=0)}(C_1 = 0 \cup C_2 = 0) = P_{(L_k=0)}(C_1 = 0) + P_{(L_k=0)}(C_2 = 0) - P_{(L_k=0)}(C_1 = 0 \cap C_2 = 0) \quad (1)$$

式(1)中, $P_{(L_k=0)}(C_i = 0)$ 为把链路 L_k 从该图中移去后割线 C_i 上所有链路故障概率的乘积, 式(1)中右边第 3 项为割线 C_1 和 C_2 上不同链路的故障概率乘积。

(2) 当存在 3 条割线时,

$$P_{(L_k=0)}(C_1 = 0 \cup C_2 = 0 \cup C_3 = 0) = P_{(L_k=0)}(C_1 = 0 \cup C_2 = 0) + P_{(L_k=0)}(C_3 = 0) - P_{(L_k=0)}[(C_1 = 0 \cup C_2 = 0) \cap C_3 = 0] \quad (2)$$

式(2)中右边前两项已知, 第 3 项

$$P_{(L_k=0)}[(C_1 = 0 \cup C_2 = 0) \cap C_3 = 0] = P_{(L_k=0)}[(C_1 = 0 \cap C_3 = 0) \cup (C_2 = 0 \cap C_3 = 0)] \quad (3)$$

式(3)右边项代入(1)式, 便可求得。

(3) 当存在 3 条以上割线时, 采用迭代方法可求得相应的概率。

下面以图 3 的 DT-DVTG 模型为例, 讲述故障链路检测过程。

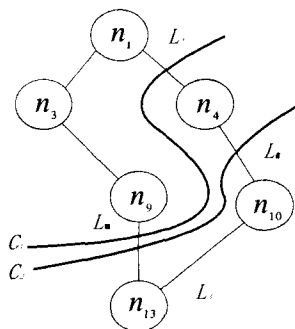


图 3 以 n_1 为管理节点的 DT-DVTG 模型

假设链路 L_1, L_2, L_4 出现故障的概率为 $p_1 = p_2 = p_4 = 0.1$, 首先计算 L_1 引起 n_{10}, n_{13} 不可达的概率。以下用 P_{L_k} 表示 $P_{(A_k=0)} (C_1=0 \cup C_2=0) \cdot P_k$, 因为

$$P_{(A_1=0)} (C_1=0 \cup C_2=0) = 0.01 + 0.1 - 0.01 = 0.1$$

进行归一化处理, 得 $P_{L_1} = 0.255, P_{L_2} = 0.49, P_{L_4} = 0.255$. 因此, 链路 L_2 具有最大的故障概率。若通过 3.3 节的定位过程, 证实了 L_2 确实有故障, 为了进一步检测下一个故障链路, 把 L_2 所在的不可达路径 p'_1 从 DT-DVTG 模型中移去, 并把 p'_1 上所有的可能故障链路从 l 中去除, 在本例中是把 L_2 从 l 中去除。重复上述检测过程, p'_1 移去后, 经归一化处理, $P_{L_1} = 0.5, P_{L_4} = 0.5$. L_1, L_4 的故障概率相等且最大。按照第 3.3 节的定位原则, 先选择 L_4 进行定位。若经第 3.3 节的定位过程发现 L_4 确实发生了故障, 则把 L_4 所在的所有的不可达路径 p'_2 和 p'_3 从 DT-DVTG 模型中移去并把 p'_2 和 p'_3 上的链路 L_1 和 L_4 从 l 中去除, 这时 $l = \{\}$ 结束。

3.3 链路故障的定位

经过第 3.2 节的链路故障检测过程, 大致确定了最可能出现故障的链路。为了进一步确认该链路确实出现了故障, 还需进行卫星网络自主地、实时地定位故障的过程:

(1) 首先采用 DT-DVTG 模型进行定位。链路两端的节点若一个为不可达节点, 另一个为可达节点, 则该链路有故障。如图 3, L_2 链路两端的节点 n_{13} 为不可达节点, 而 n_9 为可达节点, 显然 L_2 有故障。从图 3 可以看出, 这样的链路所在的路径上不存在不确定节点, 即 $W_i = \{\}$ 。因此, 若某条不可达路径的 $W_i = \{\}$, 可以直接通过 DT-DVTG 模型进行定位, 而不需要经过第 3.2 节的链路诊断过程。

(2) 对于同一不可达路径上可能存在多条故障概率相同的链路的情况, 由源节点给不可达路径上的不确定节点沿此不可达路径发测试包, 并把它归到相应的可达集或不可达集里。然后, 按需定位链路的类型 (包括可达节点与不确定节点之间的链路、不确定节点与不确定节点之间的链路、不确定节点与不可达节点之间的链路), 判断此链路是否真的出现了故障。

4 性能仿真

本算法以铱星系统为例用 NS-2 仿真软件做了各种仿真实验。

实验表明, 在保证原有路由性能指标的前提下, 若从管理卫星到其它各个卫星的路由路径具有一定的重合度, 且在检测时间间隔内从管理卫星到其它各个目的卫星至少通信一次, 将会使 DT-DVTG 图内不含有不确定节点, 那么可直接采用 DT-DVTG 模型定位, 而不需 DT-DVTG 模型的构建过程、切割过程、检测过程和发测试包, 定位故障链路快速、准确。

现在考虑 DT-DVTG 模型内含有不确定节点的情况, 这时源卫星需向不确定节点发测试包, 以定位故障链路。下面从两个指标来评价算法的性能: 一个是最终定位出所有故障链路的时间, 另一个是检测的准确度如何。下面分别加以测试。

最终定位出所有故障链路的时间 T_{all} 可以用下式表达。

$$T_{all} = T_{model} + T_{iden} + T_{locn}$$

其中, T_{model} 表示 DT-DVTG 模型的构建时间, T_{iden} 是用于检测的时间, T_{locn} 是用于定位故障的时间。经过仿真发现, DT-DVTG 模型的构建时间和检测时间相对于定位时间可以忽略不计, 而定位时间与发测试包数及测试的路径距离有关。

为了表示出定位时间与发测试包数及测试的路径距离的关系, 我们选择不确定节点跳数和算法处理时间的关系作为评价的指标。用 j 表示 DT-DVTG 模型中的不确定节点的序号, Q_j 为该不确定节点离源节点的跳数, ΣQ_j 表示此 DT-DVTG 模型中所有 Q_j 的和。

为了得到不确定节点跳数和算法处理时间的关系, 分别选择了 DT-DVTG 模型中含有 3 条故障链路和 2 条故障链路的模型进行了多次测试, 测试的统计结果如图 4 所示。

图中, 曲线 1 表示 DT-DVTG 模型中有 3 条故障链路时算法处理时间和 ΣQ_j 的关系, 曲线 2 表示 DT-DVTG 模型中有 2 条故障链路时算法处理时间和 ΣQ_j 的关系。由图中可见:

- ① 算法处理时间与 ΣQ_j 成正比;
- ② 但 $\Sigma Q_j = 0$ 时, 即模型中不含不确定节点时, 算法处理时间为 0, 只有可达域和不可达域, 可以直接采用 DT-DVTG 模型定位, 而不需要检测过程和发测试包;
- ③ 当存在不确定节点时, 源卫星需要对不确定节点发测试包;

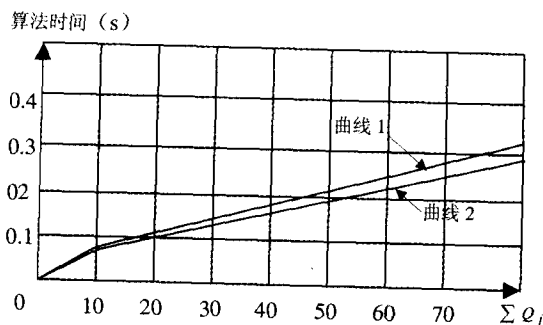


图 4 不确定节点跳数和算法处理时间的关系

④ 曲线 1 的斜率比曲线 2 大, 因为在 ΣQ_j 相同的情况下, 故障链路越多, 需要定位故障链路数越多, 算法处理时间也越长。

为了评价检测的准确度, 我们做了各种实验。设置不同的故障链路和不同的不确定节点, 可以得出结论, 对于在任一 Δt 时间内出现的链路故障, 无论是单链路还是多链路故障, 源卫星均能快速地检测到并准确定位。

仿真实验表明, DT-DVTG 模型中割线的数目随不确定节点的数目而呈指数地增长。在实践中, 应让这个数目尽可能地小, 使几乎所有的节点都在可达集或不可达集里。

链路检测算法良好的性能为鲁棒路由算法能够很好地运行提供了坚实的保证, 特别是由于链路检测算法支持动态路由, 使鲁棒路由算法在保持原有动态路由算法各项性能指标的基础上进一步降低了丢包率和卫星之间不能相互通信的概率。

本文提出的方法计算可能故障链路的故障概率, 而不是做完全的测试, 这样便加快了故障诊断过程, 并因此减少了所需网络带宽和处理过程。另外, 该方法的执行是完全在线的, 也就是在系统的运行状态下进行的。故障链路检测可以由一次或几次的路由失败而触发, 因而不需要人工干预, 整个过程是自主的、独立进行的。

总结 本文关注的是 LEO 卫星系统基于 ATM 鲁棒路由算法中的链路检测部分。为了快速、准确地定位链路故障地点, 使用动态路由过程中收集信息, 构建 DT-DVTG 模型。DT-DVTG 的构建是与网络的动态路由过程同时进行的, 不

占用路由时间,由动态路由过程中随时出现的一次或几次失败而触发。然后,利用概率理论和检测过程,迅速、准确地定位故障地点。

链路检测过程进行得彻底、准确、快速,从而保证了鲁棒路由算法的有效性和稳定性,使之具有触发迅速、适应性强、抗毁能力高等特点。尤其是在战争等条件恶劣的环境使卫星网络仍能正常工作。

我们下一步的工作是进一步详细地仿真,研究链路检测与路由算法的关系,使链路检测过程更好地应用到路由策略中去。

参考文献

- 1 Clark W, Mischa S. Identification of faulty links in dynamic-routed networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1993, 11 (9): 1449~1460
- 2 Markus W, Cecilia D, Hans-Jorg V, et al. ATM-based routing in LEO/MEO satellite networks with intersatellite links [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(1): 69~82
- 3 Werner M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks [J]. IEEE Journal on Selected

- Areas in Communications, 1997, 15(8): 1639~1648
- 4 Chang H S, Kim B W, Lee C G, et al. Topological design and routing for low-earth orbit satellite networks [A]. In: Proc. of IEEE GLOBECOM [C]. Singapore: Singapore, 1995. 529~535
- 5 Chang H S, Kim B W. FSA-based link assignment and routing in low earth orbit satellite networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(3): 1037~1048
- 6 Uzunalioglu H, Akyildiz I F, Bender M D. A routing algorithm for LEO satellite networks with dynamic connectivity [J]. ACM-Baltzer J Wireless Networks (WINET), 2000, 6(3): 181~190
- 7 Ekici E, Akyildiz F, Bender M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(2): 137~147
- 8 Katzela I, Schwartz M. Schemes for fault identification in communication networks [J]. IEEE Transactions on Networking, 1995, 3(6): 753~764
- 9 Bouloutas A, Hart G W, Schwartz M. Simple Finite-State Fault Detectors for Communication Networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 1992, 40(3): 477~479
- 10 Liu G, Mok A K, Yang E J. Composite events for network event correlation [J]. Integrated Network Management VI, 1999. 247~260

(上接第 53 页)

从以上的更新过程可以看出,在交易开始之前,节点 i 与节点 j 进行交互,首先要向网络中发出查询 Query (ID_i, ID_j),得到分布式网络中其他节点对节点 j 的信任反馈,节点 i 利用本地存储的各个节点的信任值作为对推荐节点的信任度权值进行计算 Cr ,如果节点 i 本地没有交易信任记录,则可以取 Cr 为 $1/s$,然后得到节点 j 的推荐信任值 TR_j 。最后计算出节点 j 总的信任值 T_j 。

相关工作与结论 直接信任度评价反映的是评价方与被评价方的交易经验,由评价方根据被评价方交易时表现出的服务质量给出。推荐信任度反映的是评价方给出直接信任度评价的可靠程度。由于对信任的认知具有强烈的主观性和模糊性,通常很难用常规的精确的度量值对信任(直接信任或推荐信任)进行评价和处理。不少学者对于信任(直接信任或推荐信任)的度量 and 描述提出了许多不同的方案^[9]。

Ernesto Damiani 等人提出了节点和资源相结合的信任模型(servant and resource-based reputation)^[6],认为该模型能够有效地解决新加入节点的冷启动(cold-start)问题,热门的资源可以使节点在短期内获得一定的信任度,但是如何有效地区别两种声誉进行交易也是待解决的问题。Sabater Jordi 提出的 REGRET 模型^[8],认为节点当中存在着小团体,在考虑单独节点信任的同时,也要考虑到团体之间、团体和个人之间的相互信任,但是却导致模型很复杂,较大地增加了网络和节点的处理负担,而且不能够有说服力地确定各种信任之间的权值关系。Ali Aydin Selcuk 等人利用二进制向量来存储信任值^[9],把交易评价简化为成功和不成功,我们认为这样容易导致比较极端的评价,例如一个节点提供的服务不够好就认为失败是不公平的。

我们的模型提出了时间依赖函数 $f(t)$ 的概念。我们认为由于信任不仅仅是历史积累,同时近期行为也是需要考虑的重要要素。因为近期的行为体现着节点的现在和未来的信任走向。通过时间因子来赋予近期的交易评价较大的权值。同时时间依赖函数也制止了某些节点的企图通过积累信任值

进行欺骗的行为,因为声誉信任在我们的模型中建立较难,但是降低却很容易,比较有效地反映了信任值的建立较难,破坏容易的特性(easy-destruction-hard-construction)。同时我们还提出了反馈范围 s (scope)的概念,因为得到反馈的范围越广,得到的评价越可信,如果仅仅是几个节点的评价,则可信度不高,因为很可能是小团体的作弊行为。但是我们的模型也有不足之处,例如没有考虑到节点信任值传输中的安全问题,这将是今后研究工作的重点。

参考文献

- 1 Xiong L, Liu L. PeerTrust: Supporting Reputation-Based Trust for Peer-to-Peer Electronic Communities. IEEE transactions on knowledge and data engineering, 2004, 16(7)
- 2 竇文, 王怀民, 等. 构造基于推荐的 Peer-to-Peer 环境下的 Trust 模型. 软件学报, 2004, 15(4)
- 3 Selcuk A A, Uzun E, Pariente M R. A Reputation-Based Trust Management System for P2P Networks. IEEE/ACM CCGRID 2004
- 4 Hui K Y K, Lui J C S, Yau D K Y. Small World Overlay P2P Networks. IWQOS. In: Twelfth IEEE International Workshop, 2004
- 5 Ratnasamy S, Shenker S, Stoica I. Routing Algorithms for DHTs: Some Open Questions. In: First Intl Workshop on Peer-to-Peer System, 2002. 45~52
- 6 Damiani E, di Vimercati D C, Paraboschi S. A Reputation-Based Approach for Choosing Reliable Resources in Peer-to-Peer Networks. CCS'02, Nov. 2002
- 7 Cai M, Frank M. RDFPeers: A Scalable Distributed RDF Repository based on Structured Peer-to-Peer Networks. WWW2004, May 2004
- 8 Jordi S, Carles S. REGRET: A Reputation Model for Gregarious Societies. In: 4th Workshop on Deception, Fraud and Trust in Agent Societies, 2001
- 9 Meng K, Wang Y, Zhang X, et al. A Trust Management Model for Virtual Communities. CIT2005, 2005. 741~745
- 10 Zhong Y, Yu Y, et al. Dynamic Trust Production Based on Interaction Sequence: [technical report, CSD-TR 03-006]. Dept. of Computer Science, Purdue University, 2003