

多元化网络管理协议的 Petri 网验证及其性能测试^{*}

赵建立 闻英友 赵林亮 王光兴
(东北大学网络与通信中心 沈阳110004)

摘 要 本文针对一种最新提出的卫星网络管理协议,利用 Petri 网描述协议的方法,对此网络管理协议过程进行了形式描述,利用 Petri 网的可达树、不变量对协议的有界性、活性、守恒性、完整性、前进性等性质进行了验证,确定了协议的逻辑正确性,在此基础上,完成了此协议的实现并对其性能进行了测试。

关键词 多元化网络管理协议, Petri 网, 可达树, S-不变量, T-不变量, 性能测试

Multiplex Network Management Protocol's Petri Nets Validation and it's Performance Test

ZHAO Jian-Li WEN Ying-You ZHAO Lin-Liang WANG Guang-Xing
(Research Center for Network & Communication, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract In this paper, aimed at a new satellite network management protocol, a formal specification of the network management protocol using Petri net is given, verify that the protocol has the properties of boundness, liveness, conservation, integrality and etc using petri net reachability tree and invariant variable, confirm the new network management protocol's logic correctness. At last, the performance comparison between the new protocol and SNMP is given.

Keywords MNMP, Petri net, Reachability tree, S-invariant, T-invariant, Performance test

1 前言

MNMP(Multiplex Network Management Protocol)是一种用于未来天地一体化网络的网络管理协议^[4],它能确保正常、可靠的数据通信,是天地一体化网络正常运行不可缺少的组成部分。由于天地一体化网络本身的庞大、繁杂、异构等特性,因而使得 MNMP 开发难度大、周期长、而且潜在错误多,而 MNMP 协议开发过程中任何一点错误和缺陷都将给系统的稳定性、可靠性、坚固性、安全性、容错性以及异种系统之间互通性带来巨大的危害。为此,不仅需要协议的标准化^[9],也需要以形式化技术进行协议描述、设计、验证和测试^[5,8,10]。本文将利用 Petri 网^[1,3]作为形式描述技术,完成了 MNMP 的描述和验证并进行了性能测试。Petri 网具有坚实的数学基础和分析技术,具有异步并发特性,与物理系统极其相近,适合于描述网络体系结构、服务和协议,是一种国际倾向性的协议开发技术。本文的第2节介绍了 MNMP;第3节给出了 MNMP 的 Petri 网形式描述;第4节利用 Petri 网理论对 MNMP 进行了验证;第5节对 MNMP 进行了性能测试,并与 SNMP 做了对比。

2 MNMP 的介绍

2.1 MNMP 的服务联系

MNMP 是一种在应用层基于面向连接的网络管理协议,为了区别于传输层面向连接的概念,称 MNMP 的应用层面向连接的机制为服务联系。底层的传输方式可以由管理实体通过在联系建立过程中进行协商来决定,从而避免了 CMIP(Common Management Information Protocol)因面向连接的

服务而导致的管理信息阻隔或延误以及传输连接存在周期的难确定性,同时也避免了 SNMP(Simple Network Management Protocol)因完全无连接服务而导致的管理信息不可达或丢弃,并对关键事件的通告和指标参数的统计计算产生严重影响。

为了使两个 MNMP 管理实体,即管理请求者和管理服务者,能够进行管理操作,首先必须在两者之间建立管理应用联系,这就涉及到 MNMP 的联系机制,其目的在于建立和终止管理应用服务,从而使管理活动更加规范和可靠。MNMP 的具体服务联系过程为:

(1)管理请求方发送联系请求,并提供必要的用户信息和服务参数;

(2)管理服务方接收联系请求,进行用户身份和管理权限的验证,验证通过后将进行服务参数的协商;

(3)服务协商通过后,此时向管理请求方发送联系应答,返回延时修正值,并且提供全网唯一的联系标识,标明联系建立;

(4)管理请求方在已建立联系的基础上进行管理操作,利用联系标识和延时修正参数构造操作 PDU;

(5)管理服务方对已正确接收的操作 PDU 进行解析,提供服务;

(6)管理请求方接收管理操作应答后,做出是否断开服务联系或继续进行管理操作的判定,双方在规定的间隔进行联系维护;

(7)管理操作结束后,按照事先协商的方式断开连接,同时返回相应的联系统计信息。

2.2 MNMP 的服务原语

^{*} 国家863基金资助(2002AA712051)。赵建产 博士研究生,研究方向:网络管理及重构,ad hoc 网络,移动通信;王光兴 教授,博士生导师,国务院三、四届学科评议组成员,研究方向:网络管理、宽带网技术,移动通信。

在 MNMP 中,提供了5种管理操作服务 Execute、Get、Set、Inform、Cancel 与定义的两种应答方式 SReply、Dreply 完成网络系统中管理操作信息的传输。在管理体系结构的研究中,我们基于面向对象的方式定义和组织管理信息,因此定义的被管对象除本身封装的属性外,还将包含动作、参数和通告等,因此服务 Execute 除用于创建和撤销管理对象实例外,还将指定对象执行相应的动作实现管理操作;Get 提供管理者对被管对象的查询功能,主要是获取被管对象的属性值;Set 实现对被管理对象的修改服务,即被管对象实例的属性值设置,包括设置属性值为新值或恢复默认值等;作为管理信息通告的 Inform,既可以由管理站向管理站,也可以是由代理向管理站发送的关键事件报告;Cancel 用于取消一个查询操作或者终止一个正在被执行的任务,也可以用来释放预留的资源。

在 MNMP 的管理服务联系后,即可通过 MNMP 服务实现管理操作(图1)。

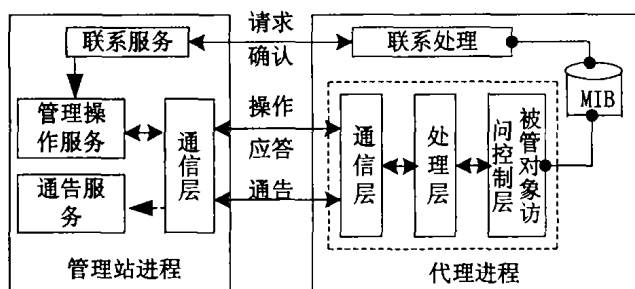


图1 MNMP 的通信机制

3 MNMP 的 Petri 网形式描述

图2是以上所描述的 MNMP 的 Petri 网模型,网的初始标记 M_0 是 TOKEN 在 P1(管理请求方等待发送联系请求)和 P6(管理服务方等待接收联系请求)中。

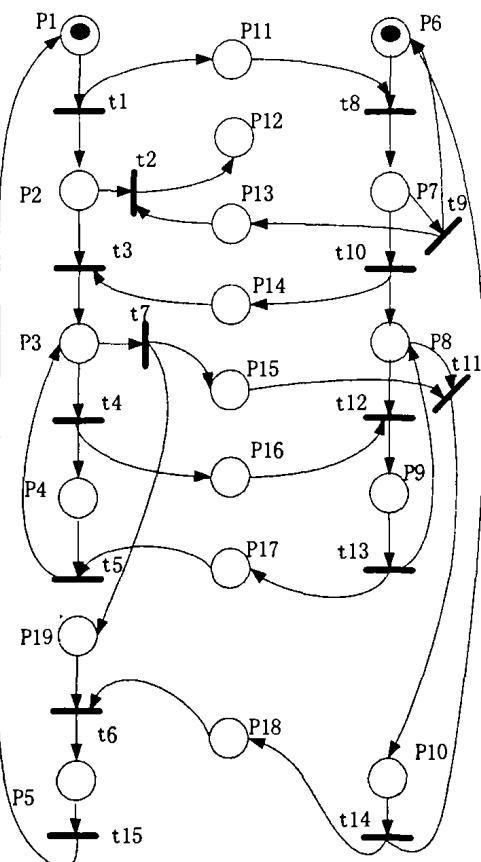


图2 MNMP 的 Petri 网描述

库所—P1:管理请求方等待发送联系请求;P2:管理请求方等待联系请求响应;P3:管理请求方等待发送操作 PDU;P4:管理请求方等待 PDU 操作应答;P5:管理请求方等待释放本次联系占用的资源;P6:管理服务方等待接收联系请求;P7:管理服务方进行验证过程;P8:管理服务方等待接收 PDU 操作;P9:管理服务方执行 PDU 操作过程;P10:管理服务方等待释放占用资源;P11:联系请求在信道中;P12:向上层用户指示无法建立联系;P13:拒绝联系在信道中;P14:联系请求确定在信道中;P15:断开联系请求在信道中;P16:PDU 操作请求在信道中;P17:PDU 操作应答在信道中;P18:断开联系请求确认在信道中;P19:管理请求方等待断开联系请求应答。

变迁—t1:管理请求方发送联系请求;t2:管理请求方收到拒绝联系应答;t3:管理请求方收到联系请求确认标示;t4:管理请求方发送操作 PDU;t5:管理请求方收到操作 PDU 应答;t6:管理请求方收到断开联系确认;t7:管理请求方发送断开联系请求;t8:管理服务方收到联系请求;t9:管理服务方发送拒绝联系应答;t10:管理服务方发送联系确认应答;t11:管理服务方收到断开联系请求;t12:管理服务方收到操作 PDU;t13:管理服务方返回应答 PDU;t14:管理服务方释放占用资源;t15:管理请求方释放占用资源。

4 MNMP 的 Petri 网验证

4.1 MNMP 的 Petri 网可达树分析

可达性分析是指生成 Petri 网的全部可达状态^[2,6],以检查是否符合协议所要求出现的状态以及期望的行为特征,通常包括死锁、意外接收发送、变迁活性以及库所标记数的有界性等。可达性分析从初始全局标识开始,根据每一个点火变迁或并发变迁集同时具备点火条件的变迁的集合生成分支结点,总体上形成可达树。

可达树构造算法如下^[7]:

a) $T(PN)$ 的初值只有根节点 r , $M_r = M_0$, 即 M_r 以初始标识标记。

b) 令 x 为 $T(PN)$ 的叶节点。若任何变迁 $t \in T$ 在 M_x 均无发生权, x 为真叶节点。若从根节点 r 到 x 的路径上有另一个节点 y , $y \neq x$, 但 $M_y = M_x$, 则 x 也为真叶节点。若 $T(PN)$ 的节点全为真叶节点, 则算法结束。否则, 执行 c)。

c) 若 $T(PN)$ 由叶节点 x , x 不是真叶节点, 就是在 M_x 至少有一个变迁有发生权。对 M_x 授权发生的每个 $t \in T$, 在 $T(PN)$ 上面添加一个新的节点 y , y 是 x 的子节点, 从 x 到 y 的有向弧用变迁 t 来标记。节点 y 的标识是如下定义的: 首先计算出 M_x 的后继 M' , 即对所有 $s \in S$, $M'_s = M(s) - W(s, t) + W(t, s)$, 然后计算 M_y : 对任意的 $s \in S$

$$M_y(s) = \begin{cases} \omega & \text{若从 } r \text{ 到 } y \text{ 的路径上有 } z, \text{ 使得 } M_z < M' \\ & \text{并且 } M_z(s) < M'(s) \\ M'(s) & \text{其他情况} \end{cases}$$

d) 回到步骤 b)。

根据可达树的构造规则, 对图2 MNMP 的 Petri 网形式模型进行分析, 便可得到 MNMP 的可达树。

在图3的可达树中有三个节点: (P6, P12) 表示管理服务方没通过管理请求方的身份验证或无法满足管理请求方的连接要求时, 向上层用户发出提示。(P3, P8) 表示在基于一次联系的基础上, 进行多次的 PDU 操作。(P1, P6) 表示一次联系结束, 重新开始新的联系。

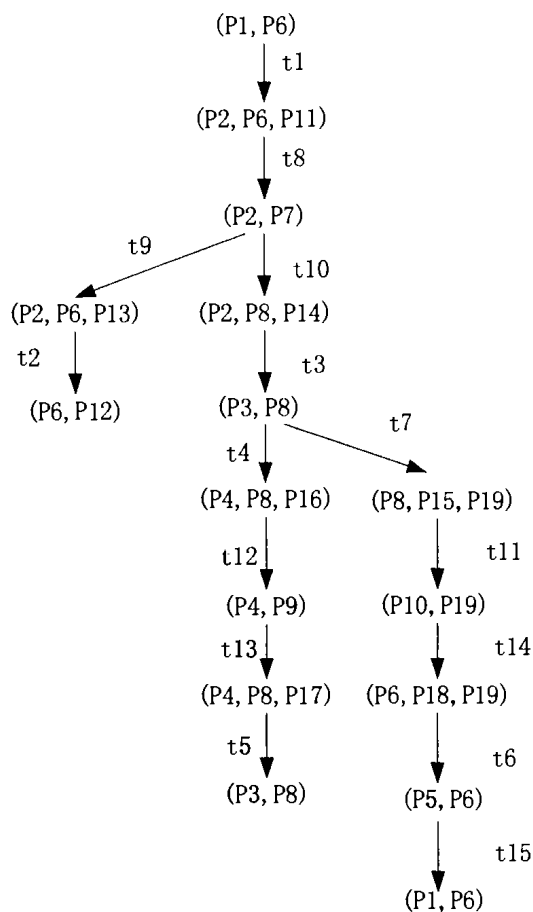


图3 MNMP 的可达树

通过可达树的分析,我们可对协议的各种性质进行分析:

1)有界性:可达树中的每个节点中,每个位置中的标记数量都是有限的,所以此网是有界的。

2)活性:从可达树中可以看出,每个变迁至少被点火一次,不会出现死锁。

3)完整性:在描述中所说的状态都能达到。

4)前进性:可达树中不存在无用的循环。

4.3 MNMP 的 Petri 网的不变量分析

不变量分析是要求网在特定执行模式下不变量的特性。

Petri 研究最广泛且理论上最完备的两种不变量是 S-不变量和 T-不变量^[2,6]。S-不变量对应于 Petri 网中标记总数保持不变的库所子集,它反映协议的守恒性。T-不变量是指保持网标识不变的变迁序列,它反映协议运作的循环或重复特性。

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15
p1	-1														1
p2	1	-1	-1												
p3			1	-1	1		-1								
p4				1	-1										
p5						1									-1
p6							-1	1						1	
p7							1	-1	-1						
p8								1	-1	-1	1				
p9										1	-1				
p10											1			-1	
p11	1						-1								
p12		1													
p13		-1							1						
p14			-1							1					
p15						1					-1				
p16				1								-1			
p17					-1								1		
p18						-1								1	
p19						-1	1								

图4 Petri 网模型的关联矩阵

4.3.1 S-不变量分析 利用 $C^T \cdot X = \theta_T$ (θ_T 是分量全为零的 T-向量), 其中 C 为 MNMP Petri 网描述的关联矩阵 (图4), 从而得到两个 S-不变量:

$$S1 = (1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$$

$$S2 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$$

即:

$$m1 + m2 + m3 + m4 + m5 + m12 = 1$$

$$m6 + m7 + m8 + m9 + m10 = 1$$

两个库所不变量表明,管理服务方、管理请求方,各自对应的所有库所的 TOKEN 数等于常数1即各 S-不变量中的库所对应的执行机构,在任何时候,只有其中之一动作,信息在处理前,不会被再次传送,从而保证了协议的可靠性。不依赖于初始标识,这代表管理服务方和管理请求方在协议运行过程中的库所总量没有发生变化,体现了协议的守恒性。

4.3.2 T-不变量分析 利用 $C \cdot X = \theta_T$ (θ_T 是分量全为零的 S-向量), 从而得到 T-不变量:

$$T = (1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$$

对所有从初始状态 M_0 ($M(p1)=1, M(p2)=1$) 出发的激发序列 Q_k , 由网系统的可达标识方程 $M_k = M_0 + W \cdot Q_k$ 从 $M_0 = (1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ 出发, 网系统在激发序列 $Q = (t_1 t_8 t_{10} t_3 t_4 t_{12} t_{13} t_5 t_7 t_{11} t_{14} t_6 t_{15})$ 作用下回到系统初始标识, 即 $M_0[t_1 t_8 t_{10} t_3 t_4 t_{12} t_{13} t_5 t_7 t_{11} t_{14} t_6 t_{15}] > M_0$, 用标识方程表示, $M_0 + C \cdot Q = M_0$ 。说明激发序列 Q 是个重复序列, 因而反映出该协议系统的循环特性。

4.4 分析结论

由以上分析可以得出结论,协议是无死锁的、安全的、守恒的,最终能实现在建立联系的基础上进行 PDU 操作,或向上层用户发出指示无法建立联系。

5 MNMP 的性能测试

5.1 MNMP GET 操作的性能测试

我们以 MNMP GET 操作测试做为例,在 100Mbps 的以太网域内,循环发送 GetPDU N 次 ($N > 30$), 间隔为 1 秒钟。查询 1.1.1.24:1 实例 (太阳能电池) 的 10 个属性, GetPDU 格式^[4]及长度:

0	27	31	38	203
pduHeader	Style	Objected	attributeList	

整个数据包格式及长度:

0	13	33	53	257
数据链路层	IP	TCP	MNMP	

详细应答:

0	180	
pduHeader	errorType	QueryResultBindings

整个数据包格式及长度

0	13	33	53	234
数据链路层	IP	TCP	MNMP	

我们利用 Network Distinct 和 Colasoft Capsa Professional 软件进行了测试,测试结果:Get 操作平均响应时间:

13ms,网络带宽:100Mbps,通信量(traffic):108.85k,传输速率(traffic/second):0.54kbps,管理端处理器占用:0~2%。

类似上述模式,进行了查询多属性的对比测试。操作(应答)帧长度是指 GetPDU(DReplyPDU)的链路层数据帧的长度(MNMP层+TCP层+IP层+链路层)。响应时间指的是从管理站发出操作到获得应答的时间间隔,包括PDU在网络上的传播时延和代理分析处理所用的时间。

表1 单一对象的多属性查询测试

操作类型	属性数	操作帧长度(B)	应答帧长度(B)	响应时间(ms)	通信量(KB)
Get	1	108	102	13	14.02
Get	2	119	110	13	14.95
Get	3	138	126	14	16.65
Get	4	159	144	14	18.56
Get	5	182	164	14	20.66
Get	6	202	181	14	22.46
Get	7	220	196	14	24.08
Get	8	236	209	14	25.49
Get	9	252	222	14	26.91
Get	10	258	235	14	27.54

表2 多对象查询测试

操作类型	对象数(每个对象5个属性)	操作帧长度(B)	应答帧长度(B)	响应时间(ms)	通信量(KB)
Get	2	276	243	13	29.11
Get	4	464	401	13	46.00
Get	6	652	559	14	62.89
Get	8	840	717	14.5	79.79
Get	10	1028	875	14	96.68
Get	12	1270	1033	15	118.85
Get	14	1458	1245	15	138.38
Get	16	1645	1402	16	155.18

从表中的性能数据可以看出,随着属性和对象个数的增多,代理端的软件分析处理时间变化不大。但是当一次操作的长度大于某个设定的值后,需要多次发送,对响应时间影响不大,可是通信量会增多。

5.2 MNMP与SNMP的性能比较

以下是利用SNMP的get-request操作和MNMP的Get操作查询多个属性时响应时间和PDU长度的比较情况。如下表,操作类型、PDU帧长度、应答帧长度、响应时间各列前者对应SNMP,后者对应MNMP。

表3 SNMP与MNMP的性能比较

操作类型(SNMP/MNMP)	属性数	PDU帧长度	应答帧长度	响应时间(ms)
get-request/Get	1	84/108	85/102	10/13
get-request/Get	2	101/119	103/110	11/13
get-request/Get	3	117/138	121/126	13/14
get-request/Get	4	133/159	138/144	16/14
get-request/Get	5	149/182	155/164	18/15
get-request/Get	6	165/202	173/181	20/15
get-request/Get	7	182/220	194/196	21/16
get-request/Get	8	199/236	214/209	24/17
get-request/Get	9	215/252	233/222	26/18
get-request/Get	10	231/258	253/235	29/19

从表3可得到图5和图6。从图5中可以看出,利用SNMP的get-request操作的响应时间随着属性个数的增多呈线性增长趋势,而MNMP的Get操作的响应时间随属性个数的变化并不明显。MNMP显示出了在处理多属性和多对象的情况下的优势。从图6可以看出,SNMP的get-request操作随着

查询属性的增多,PDU的长度呈线性增长。PDU的长度直接影响数据流量的大小,长度越大,在网络上传输的数据量就越大,就占用越多的网络带宽。而MNMP由于封装的原因,PDU长度随属性的增多也不会明显增大,有效节约了网络带宽和资源。

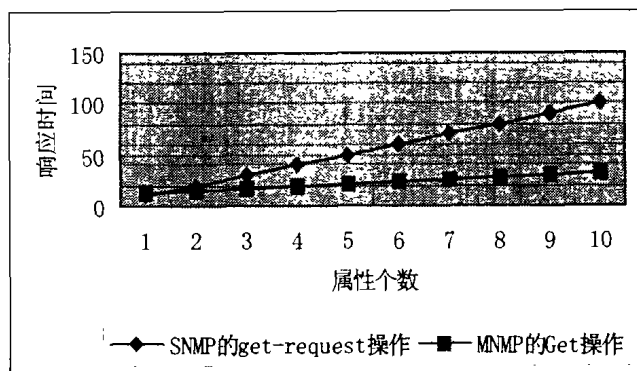


图5 响应时间

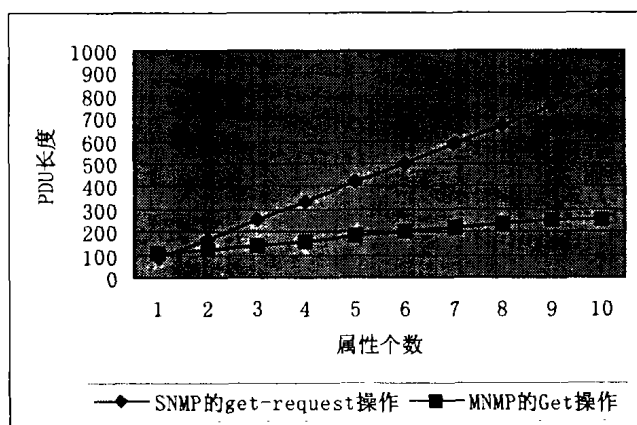


图6 PDU包长

结束语 本文介绍了MNMP,该协议的执行是未来卫星网网络管理的基础。我们给出了该协议的Petri网形式描述,利用可达树和不变量分析技术验证了该协议的正确性并做了协议性能测试。下一步的工作是在此协议的基础上进行网络管理应用的开发。

参考文献

- 1 罗军舟,沈俊,顾冠群. 从Petri网到形式描述技术和协议工程. 软件学报,2000,11(5):606~615
- 2 Diaz M. Petrinet based models in the specification and verification of protocols. In: Brauer W, ed. Petri Nets: Applications and Relationships to other Models of Concurrency. LNCS255, Berlin: Springer-Verlag, 1988. 135~170
- 3 Berthelot G, Terrat R. Petri nets theory for the connection of protocols. IEEE Transactions on Communications, 1982, 30(12): 2497~2505
- 4 姜月秋,冯永新,赵永翼,王光兴. 一种新的网络管理协议-多元化网络管理协议原型设计. 兵工学报,2003,24(4):40~43
- 5 Bolignano D. An Approach to the Formal Verification of Cryptographic Protocols. In: Proc. of ACM Conf. on Computer and Communications Security, 1996. 106~118
- 6 Murata T. Petri nets Propertie analysis and applications. IEEE invited paper, 1989, 77(4): 541~580
- 7 袁崇义. Petri网原理. 北京: 电子工业出版社, 1998. 51~59
- 8 Holzmann G J. Design and validation of computer protocol. New Jersey: Prentice Hall, 1991. 19~39
- 9 King P W. Formalization of protocol engineering concepts. IEEE Transactions on Computers, 1991, 40(4): 387~403
- 10 Lai R. Formal specification and verification of a procedural protocol: case study. Software Engineering Journal, 1995, 10(3): 97~104