

天地异构网络链路状态监视技术

朱福祥, 胡成浩, 刘 言, 孙 慧, 田建召, 陆 洲

(中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 针对天地异构网络动态性、高时延以及资源有限等特点, 分析现有地面网络管理协议在天地异构网络上应用的可能性, 并对比各个网络管理协议的优缺点。在此基础上, 进一步分析直接使用传统网管协议带来的一些问题, 例如MIB库缺少端到端的时延描述、网络端口流量分析复杂导致不利于网络管理系统对其进行直接观测。最后, 结合地面传统互联网网管协议SNMP, 提出适用于监测天地异构网络链路状态的方法, 主要包括网络拓扑监测、自定义时延测试以及网络流量监控等, 为天地异构网络的设计及建设提供参考。

关键词: 网管协议; 网络拓扑; 网络时延测试; 网络流量监测

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200106

Link Status Monitoring Technology for the Heterogeneous Network

ZHU Fuxiang, HU Chenghao, LIU Yan, SUN Hui, TIAN Jianzhao, LU Zhou

China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

Abstract: Aiming at the heterogeneity, dynamics, high latency and limited resources of space-based network, the possibility of application of the existing terrestrial network management protocol used directly in space-based network had been analyzed, and the advantages and disadvantages of each network management protocol had been compared. Based on the above research, the problems caused by the direct use of traditional network management protocols had been further analyzed, such as the lack of end-to-end delay description in the MIB library and the complexity of network port traffic analysis, which is not conducive to the direct observation of network management systems. Finally, combined with the traditional network management protocol SNMP, a method suitable for monitoring the links of heterogeneous networks, including network topology, custom test of the delay and network traffic was proposed. The results of this paper have reference value for the design and construction of space-based network.

Key Words: network management protocol, network topology, network delay test, network traffic monitoring

1 引言

近几十年来, 国际卫星互联网技术发展空前繁荣, 相关的通信技术由单星模式发展成卫星组网的星座模式。由分布在运行轨道上多颗卫星组成的星座相对于单颗卫星来说, 其信号覆盖面广、业务能力强, 可以实现全球覆盖和随遇接入等业务功能。从日益增长的全球通信需求来看, 星座模式与天基组网技术的兴起是空间技术发展的必然产物。我国三分之二的国土面积是不适合铺设地面光缆的山区、高原等地区, 卫星网络对于生活在这些地区的人民群众来说无疑是一条可行且必要的手

段, 致使我国是世界上较适合发展卫星通信的国家之一, 因此建立以卫星为核心的天地异构网络尤为迫切^[1]。

天地异构融合网络由天基骨干卫星、天基接入卫星、临近空间节点以及地面节点等共同构成, 如图1所示。由于整个网络存在异构性、动态性、高时延以及资源有限等特点, 其对应的网管协议需要可扩展、可伸缩、有良好的自适应性、满足时效性和高比特效率等需求。目前在地面传统互联网管理方面主要使用的网络管理协议大致有两种: 公共管理信息协议(Common Management Information Protocol, CMIP)和简单网络管理协议(Simple

Network Management Protocol, SNMP) [2]。

采用面向对象管理方式的CMIP设计复杂, 由于SNMP的简单性, 其在传统互联网领域得到了广泛使用并成为被普遍接受的网络管理标准[3]。然而传统SNMP的多个版本没有针对卫星组网进行设计, 没有重点考虑链路时延, 因此需要在保留SNMP轻量级、内存占用量低、响应时间短和网络开销小等优点的基础上进行分析和适应性改进。针对SNMP扩展性不强以及轮询效率低等不能适应天基网络的缺点, 在此通过将管理端添加自适应动态算法的方式进行改进, 达到使SNMP具备良好的扩展性和灵活性的效果。

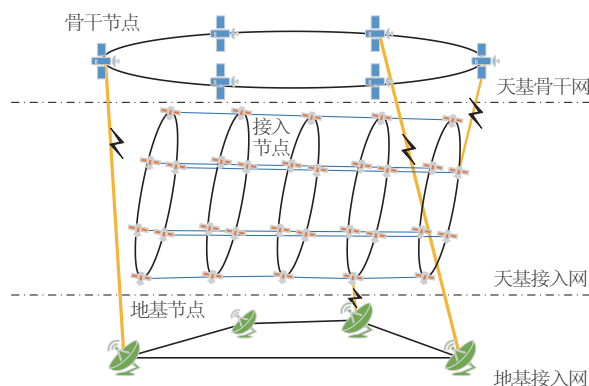


图1 天地异构网络架构

随着国内外天基信息网络的快速发展, 网络管控系统的研究持续深入。在传统互联网中, 大多数的网管系统都是建立在SNMP基础之上的, 然而为了实现卫星互联网对整个系统以及各种设备日常运行状况的监控, 需要探索基于SNMP网管系统的可行性。针对传统SNMP需要巨大管理信息库(MIB)以及资源消耗大等问题, 文献[4]提出了一种改进型网络管理协议, 即LW-SNMP网络管理协议。我国在天地异构网络领域发展相对落后, 一直是以单星或者特定星座来满足单一的用户群体需求。利用卫星组网达到同时满足多用户、多任务需求方面还比较欠缺, 尤其是卫星组网后的网络管理, 包括卫星性能管理、故障定位以及网络的自主管理等方面都需要进行深入研究。

2 网管协议分析

针对地面网络管理的需求, 业界研究者提出了SNMP, 该协议的核心思想是采用ASN.1编码格式将被管对象进行描述, 之后将其存放在MIB中。管理站(NMS)和代理(Agent)之间使用MIB进行接口的统一, MIB可

以看成NMS和Agent之间的沟通桥梁[4]。NMS利用Get-request、Set-request以及Trap等操作原语与Agent之间进行信息交互, 实现对各个MIB的管理。NMS和Agent都在自己的本地实现相应的MIB对象, 进而使得它们双方之间均可以识别对方的数据。NMS向Agent发送获取MIB中定义的数据的请求, Agent端收到该请求并识别后将设备提供的相关参数等数据转换成MIB定义的格式, 之后将该信息返回给NMS。

管理信息结构(SMI)、MIB及SNMP报文协议等共同构成了一套完整的SNMP系统。其中, SMI是为了确保网络管理数据的语法和语义明确以及无二义性而定义的一种语言, 它定义了数据类型、对象模型, 以及写入和修改管理信息的规则。MIB是被管理对象的集合, 任何一个被管理的资源(CPU、内存等)都可以表示成一个对象。MIB中的每个被管理对象都被定义了一系列属性, 比如对象名称、对象访问权限以及对象数据类型等。SNMP报文协议主要规定了5种协议数据单元PDU, 用于NMS端和Agent端之间的信息交换。图2展示了NMS与Agent之间通信的结构。

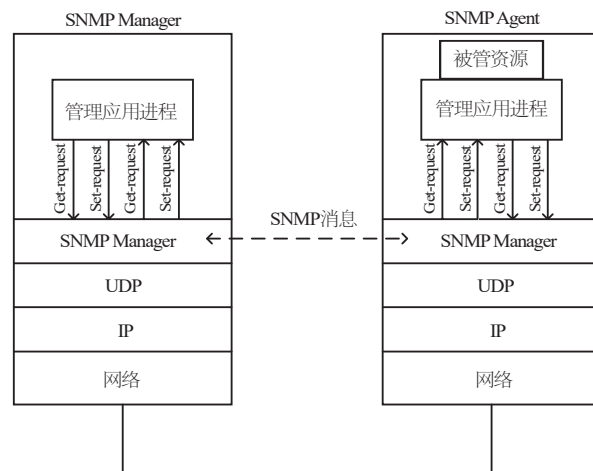


图2 NMS与Agent之间通信的结构

除了SNMP之外, 国内外现有的网络管理协议主要有TmTc、PCM、CORBA、CMIP、COPS和Netconf等。其中, TmTc主要应用于卫星遥测, 其优点是实现简单、开销小等, 缺点是无法支持信息的实时查询以及快慢变参数的差异化上报。PCM主要应用于遥测, 其优点是传输速率高、开销小以及实现简单, 缺点是帧长及信息格式固定, 导致灵活性不高。CORBA主要应用于综合网管和分布式网管, 其是分布式计算的主流技术, 在电信领域使用广泛, 缺点是开发和部署成本较高, 逐步被轻量级的Web以及RESTful服务等代替。CMIP主要应用

于电信网网管,其优点是定义全面、面向连接、通信可靠、支持认证和拥有安全日志等,缺点是资源占用量大、MIB库复杂,导致其难于实现。COPS是应用于策略服务器与路由器之间的加载策略,其优点是仅涉及策略的配置下发,缺点是没有面向设备的管理,无法实现告警、参数采集等。Netconf主要应用于网络设备配置,其优点是面向配置管理,缺点是无法实现告警、参数采集等功能。经过对比,在此选用轻量级、内存占用量低、响应时间短和网络开销低的SNMP作为天地异构网络备选管理协议进行地面验证。

针对网络中设备实时信息采集的需求,对每台设备进行SNMP代理部署,并配置其SNMPD.CONF文件。对被获取数据的目标设备信息进行分类,将信息绑定的对象标识(OID)归类放入数据库中,具体见表1。在NMS端采用SNMP4J的API接口编写数据采集的代码。为了缩短采集时间,代码中的实现结构使用异步多线程。NMS端向Agent端发送指定的OID请求,Agent端将返回相应的数据。

表1 对象标识

OBJ_NAME	OID	OBJ_GROUP
CPU使用率	1.3.6.1.2.1.25.3.3.1.2	hrProcessorLoad
开机时间	1.3.6.1.2.1.25.1.1.0	sysUptime
收到的全部IP分组数	1.3.6.1.2.1.4.3	ipInReceives
转发的IP分组数	1.3.6.1.2.1.4.6	ipForwDatagrams
路由表	1.3.6.1.2.1.4.21	ipRouteTable
路由目的地址	1.3.6.1.2.1.4.21.1.1	ipRouteDest
下一跳路由	1.3.6.1.2.1.4.21.1.7	ipRouteNextHop
网络接口的数目	1.3.6.1.2.1.2.1.0	IfNumber
接口当前带宽	1.3.6.1.2.1.2.2.1.5	IfSpeed
磁盘已用空间百分比	1.3.6.1.4.1.2021.9.1.9	dskPercent
获取内存大小	1.3.6.1.2.1.25.2.2.0	hrMemorySize
获取系统基本信息	1.3.6.1.2.1.1.1.0	SysDesc

3 卫星网络拓扑监测

整个卫星网络各节点之间的拓扑关系对于网络状态诊断来说是至关重要的,只有将观测到的整个网络拓扑结构呈现在网管系统中,网管系统及管理人员才能及时发现各节点的连接关系和通断状态,及时确定网络故障的准确位置。网络的拓扑结构是实现网络逻辑连接与物理连接管理的一种有效方法^[6],在卫星网络中常用平面结构进行设计,以分布式无中心的方法动态呈现整个网络的拓扑结构^[9]。这种表示方法可以满足灵活多变的天地异构网络,能够动态呈现各种应用场景需求下的拓扑结构

变化,有利于评估、管理以及监测整个网络和网络中的各个节点链路状态。

天基网络中各个节点通过不同的ID标识号加以区别,其可以是同一网段下的IP地址,也可以是所在节点的MAC地址。各个节点中的设备都在维护着一张相邻一跳的邻节点表(其为距离本节点只有一跳的所有邻节点的ID标识号列表^[7])。利用SNMP,NMS端向各个Agent端发送路由表信息获取请求,进而得到各个节点的路由表信息。首先,NMS获取Agent端的路由表信息ipRouteTable;其次,在NMS端使用广度优先算法遍历目标路由表的信息;再次,获取信息ipRouteDest路由表中某条路由的目的路由IP地址、ipRouteIfIndex路由接口索引号、ipRouteNextHop路由的下一跳地址、ipRouteType该路由的类型信息、ipRouteMask路由的子网掩码以及ipNetToMediaTable。最后,由NMS端出发,利用ARP解析寻找默认网关和当前活动IP地址,将默认网关和当前活动IP地址存入待探测队列ToDoList中。依次取出ToDoList中的IP地址,获得该IP地址的MIB库中的ipRouteTable数据。当ipRouteType=direct(direct表示本条路由的目的地址与路由接口直连)时,利用ipRouteDest可以获得当前路由器连接的子网;当ipRouteType=indirect(indirect表示本条路由的目的地址不是与路由接口直接连接,将ipRouteNextHop加入本路由的邻居路由)时,可以利用ipRouteNextHop获得路由器与路由器的连接,并将ipRouteDest存入ToDoList。获得ipNetToMediaNetAddress中的IP地址,判断其属于哪个子网。当ToDoList所有IP地址均被处理后,即可依据各设备之间的连接关系生成网络的拓扑结构,如图3所示。

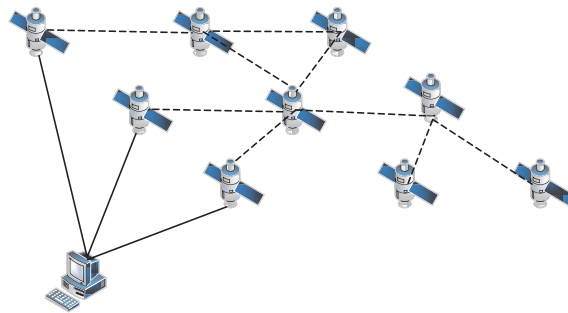


图3 网络拓扑连接关系示意

4 卫星网络时延探测

为了利用网管协议实现卫星网络时延的探测,需要确保卫星网络中NMS端和Agent端的时间同步。不失一般性,可以采用NTP实现不同节点之间的时间同步。NTP

在实现时间同步过程中会存在一些同步误差，其原因在于在应用层加入时间戳。通过采用合理的手段，NTP的授时精度可以达到微秒级。对于利用全球卫星导航系统进行授时来实现时间同步的方法来说，各个节点之间的时间同步精度一般可以达到十几纳秒的量级。相对于卫星网络几十毫秒甚至上百毫秒的传输时延来说，时钟同步误差一般可以忽略不计。

由于在传统的SNMP中没有对时延测量进行考虑，导致三代SNMP（SNMPv1-v3）网管协议均没有定义端到端时延的测量方法^[6]。由于卫星网络的异构性、拓扑动态变化性等，卫星网管系统对整张网络的时延测量显得十分必要。在此提出对私有MIB进行修改，从而实现对卫星网络中端到端时延的测量。对于探测设备之间的传输时延，可以通过扩展一个子Agent的方法实现。子Agent处理本地系统时间，在NMS端发送GET指令，并在报文中添加当前时间戳，再将子Agent返回的系统时间戳与NMS端发送指令的时间戳相减，即可得到本次的传输时延。

具体步骤如下。

（1）在代理端修改SNMPD.CONF文件（此文件是SNMP的配置文件）：添加MASTER AGENTX、ROCOMMUNITY PUBLIC以及RWCOMMUNITY PUBLIC。MASTER AGENTX是令SNMPD以主代理的模式运行。目前主代理SNMPD只支持AGENTX类型，而我们要开发的程序是一种子代理（SUBAGENT），子代理需要连接SNMPD的MASTER AGENT，让NMS端可以从子代理中获取绑定值。ROCOMMUNITY（只读对象）和RWCOMMUNITY（读写对象）的共同体都是PUBLIC，即管理端可访问读写此Agent端设备。

（2）定义自己的私有MIB库并将该OID绑定在1.3.6.1.4.1.16535.1.1私有节点下。子代理MIB里的时间戳内容主要为：

```
GetTime OBJECT-TYPE
SYNTAX DisplayString (SIZE (0..100))
MAX-ACCESS read-only
STATUS current
DESCRIPTION
"Example:2020/5/28"
::= { Time 1 }
```

该段表示GetTime的对象类型是String类型值，大小为0~100，只读状态，当前可用。

（3）在NMS端通过命令发送请求，子代理端把带有时间戳的数据包返回给NMS。

发送指令为：Snmpget -v2c -c public localhost Test-MIB::GetTime.0。

收到消息为：Test-MIB::GetTime.0=String: "Thu May 28 13:46:27 2020"。

（4）将返回的数据包中的到达时刻与发送报文中的发送时刻做差，即可得到本次的传输时延。

本文在局域网内使用虚拟机的Linux系统进行了测试，在宿主机上用Java编写脚本文件，在发起获取数据命令的时刻，记住当前时刻的时间戳，执行采集1.3.6.1.4.1.16535.1.1节点下数据的命令，并将返回的值与记住的发起命令时刻的时间戳相减，即可得到本次单次传输时延，如图4所示。因为在局域网内测试，所以时延都在2 ms以内。

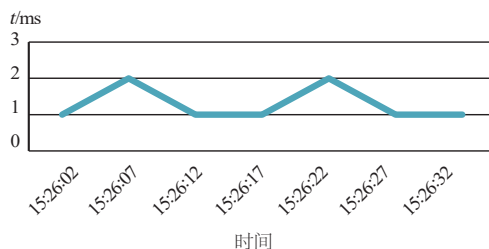


图4 单次传输时延

5 卫星网络流量监测

网络流量是对天基异构网络监控的重要参数，对卫星网络各个节点的流量监控有助于实现对整个网络资源的合理分配以及优化网络结构，进而提升卫星网络资源的利用率。由于卫星网络的异构性以及灵活多变的特点，使得网络故障排查的困难变大，通过对网络流量使用状态的分析可以大致推导出卫星网络出现故障的节点或者链路，有利于后续的精确定位及相关的处理工作。传统地面网络中常用的网络流量监测方法主要分为基于软件以及基于硬件的系统等两大类。考虑到天地异构网络是地面网络系统与卫星网络系统的融合，在此采用基于软件系统的流量测试方法更加合理。

本文采用基于SNMP方式的软件流量测试技术。在具体的实施中，NMS端对Agent端进行周期性的轮询，Agent端将根据NMS端的请求情况将相关转发数据包的数据反馈给NMS（见表2），并同时在报文中添加Agent端时间戳。根据公式(1)~(4)以及两次上报的数据，在NMS端计算出网络质量指标。其中，4个指标分别为每秒输出数据包量、每秒输入数据包量、输入丢包率以及输出丢包率。

$$\text{outFlow} = (\Delta(\text{ifOutUcastPkts} + \text{ifOutNUcastPkts})) / \Delta(T) \quad (1)$$

$$\text{inFlow} = (\Delta(\text{ifInUcastPkts} + \text{ifInNUcastPkts})) / \Delta(T) \quad (2)$$

$$\text{packInLoss} = (\Delta(\text{ifInDiscards})) / \text{inFlow} \quad (3)$$

表2 转发相关MIB库

OBJ_NAME	OBJ_GROUP	OID
发送广播包数	ifOutUcastPkts	1.3.6.1.2.1.2.2.1.17
发送非广播包数	ifOutNUcastPkts	1.3.6.1.2.1.2.2.1.18
收到广播包数	ifInUcastPkts	1.3.6.1.2.1.2.2.1.11
收到非广播包数	ifInNUcastPkts	1.3.6.1.2.1.2.2.1.12
发送丢包数	ifOutDiscards	1.3.6.1.2.1.2.2.1.19
接收丢包数	ifInDiscards	1.3.6.1.2.1.2.2.1.13

$$\text{packOutLoss}=(\Delta(\text{ifOutDiscards}))/\text{outFlow} \quad (4)$$

其中，ifOutUcastPkts和ifInUcastPkts表示代理端发送和接收的广播包数，ifOutNUcastPkts和ifInNUcastPkts表示代理端发送和接收的非广播包数， $\Delta(x)$ 表示变量x的两次相邻数值的差值的函数。整个网络流量监测流程如图5所示。

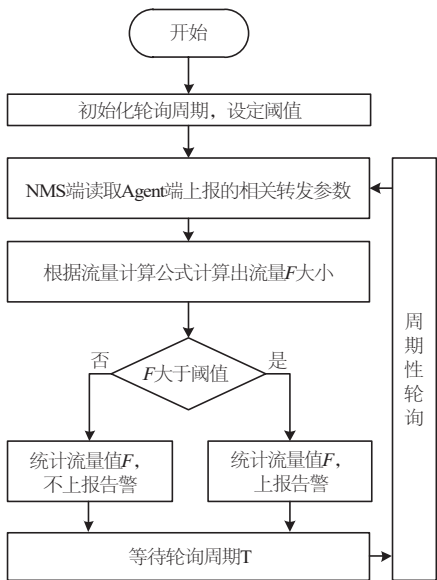


图5 SNMP流量监测流程

在本文测试过程中，采集的设备为虚拟机的Linux系统，每隔5 s采集一次，采集返回的值存储在数据库中，具体见表3。

依据公式(1)~(4)和表3中的数据，依次可得到每秒输出数据包量为337 kbit/s，每秒输入数据包量为593.6 kbit/s，输入丢包率为0，输出丢包率为0。

6 涉及的关键技术

在天地异构网络中，低轨卫星在其轨道上高速运

表3 获取的端口流量数据

时间	OID	值
2020/06/08 14:02:22	1.3.6.1.2.1.2.2.1.17.1	2 702
2020/06/08 14:02:22	1.3.6.1.2.1.2.2.1.17.2	388 094
2020/06/08 14:02:22	1.3.6.1.2.1.2.2.1.18.1	0
2020/06/08 14:02:22	1.3.6.1.2.1.2.2.1.18.2	0
2020/06/08 14:02:22	1.3.6.1.2.1.2.2.1.11.1	2 702
2020/06/08 14:02:22	1.3.6.1.2.1.2.2.1.11.2	550 768
2020/06/08 14:02:22	1.3.6.1.2.1.2.2.1.12.1	0
2020/06/08 14:02:22	1.3.6.1.2.1.2.2.1.12.2	0
2020/06/08 14:02:22	1.3.6.1.2.1.2.2.1.19.1	0
2020/06/08 14:02:22	1.3.6.1.2.1.2.2.1.19.2	0
2020/06/08 14:02:22	1.3.6.1.2.1.2.2.1.13.1	0
2020/06/08 14:02:22	1.3.6.1.2.1.2.2.1.13.2	0
2020/06/08 14:02:27	1.3.6.1.2.1.2.2.1.17.1	2 702
2020/06/08 14:02:27	1.3.6.1.2.1.2.2.1.17.2	389 779
2020/06/08 14:02:27	1.3.6.1.2.1.2.2.1.18.1	0
2020/06/08 14:02:27	1.3.6.1.2.1.2.2.1.18.2	0
2020/06/08 14:02:27	1.3.6.1.2.1.2.2.1.11.1	2 702
2020/06/08 14:02:27	1.3.6.1.2.1.2.2.1.11.2	553 736
2020/06/08 14:02:27	1.3.6.1.2.1.2.2.1.12.1	0
2020/06/08 14:02:27	1.3.6.1.2.1.2.2.1.12.2	0
2020/06/08 14:02:27	1.3.6.1.2.1.2.2.1.19.1	0
2020/06/08 14:02:27	1.3.6.1.2.1.2.2.1.19.2	0
2020/06/08 14:02:27	1.3.6.1.2.1.2.2.1.13.1	0
2020/06/08 14:02:27	1.3.6.1.2.1.2.2.1.13.2	0

行，进而导致网络连接的随机性大、拓扑结构处于动态变化中、整个网络受空间和时间的影响大。这种天基异构网络的特点必然会导致突出的问题，过于灵活多变的网络对传统的网络管理协议的使用提出新的需求。对比地面传统网络，天基网络资源有限，带宽和存储容量都远远不及地面网络，因此传统地面网络的网管系统需要经过适应性的改造才能适用于天基网络。

对整个天基网络的管理必然是对资源使用进行合理的优化。由于SNMP中的MIB库较为庞大，占用资源过高，所以在天基网络中使用SNMP网管协议则必须对其进行修剪以实现星上资源利用最大化。因此，对SNMP进行适应性改良是亟待解决的一个关键问题，同时也是技术难点。现有的改良方案主要包括对MIB库进行自定义调整、删减冗余或者重构SNMP报文结构等，进而实现星地传输效率的提高。此外，还涉及拓扑监测及构造、时延获取以及流量监测等相关技术。

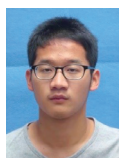
7 总结与展望

天基异构网络中频谱资源的合理使用、点波束的合理调配切换、星上灵活交换以及星上处理技术的应用在提高通信网络系统带宽、处理能力和抗干扰能力的同时，也对网络管理技术提出了更高的要求。结合地面传统网络中的网管协议SNMP，本文针对天基网络的特点提出了改良策略使得SNMP在天基网络中具有动态拓扑发现以及及时延测试等功能，对于天地异构网络的管理系统研制以及后续的深入研究具有重要意义。后续工作将加强对本文所提策略方法的地面验证，重点研究网络动态变化和发生错误告警上报时如何让网管系统自适应地处理网络变化和告警信息。此外，针对天基异构网络中时频等资源的稀缺性，进行网管协议的轻量化改造，也是后续工作的重点和难点。

参考文献：

- [1] 王燕,李长德,李霖,等. 宽带卫星网络管理系统设计[J]. 电子技术与软件工程,2017 (12):199-200.
WANG Y, LI C D, LI L, et al. Design of broadband satellite network management system[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2017 (12): 199-200.
- [2] SUBRAMANIAN M. Network management: principles and practice[M]. Pearson Education Press,2000:141-344.
- [3] 赵建立,闻英友,王光兴. 一种基于移动Agent与SNMP相结合的卫星网络管理[J]. 小型微型计算机系统,2004, 25(11):1913-1916.
ZHAO J L, WEN Y Y, WANG G X. A satellite network management based on mobile agent and SNMP[J]. Minicomputer System, 2004,25 (11): 1913-1916.
- [4] 袁菲. 轻量级SNMP协议一致性测试技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
YUAN F. Research on conformance testing technology of lightweight SNMP protocol [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [5] AMIRTHALINGAN K,MOORHEAD RJ. SNMP-an overview of its merits and demerits[A]. Proceedings of the Twenty-Seventh Southeastern Symposium on System Theory[C]//IEEE Comput. Soc.Press. 1995:180-183.
- [6] 江华,赖昕,白维学. 基于SNMP网络拓扑动态呈现技术的设计与实现[J]. 物联网技术,2019,9(4):52-54+60.
JIANG H, LAI X, BAI W X. Design and implementation of dynamic presentation technology based on SNMP network topology [J]. Internet of Things Technology, 2019, 9 (4): 52-54 + 60.
- [7] 康金禄. 一种专用 Ad Hoc 网络管理结构及其拓扑管理技术 [D]. 西安: 西安电子科技大学,2010.
KANG J L.A dedicated ad hoc network management structure and topology management technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and technology, 2010.
- [8] BLUMENTHAL U, WIJNEN B. Security features of SNMPv3[J]. The Simple Times, 1997,5(1): 8-13.
- [9] BREITBART Y, GAROFALAKIS M,JAI B, et al. Topology discovery in heterogeneous IP networks: The netinventory system [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2004,12 (3):401-414.

[作者简介]



朱福祥（1997-），男，安徽人，中国电子科技集团公司电子科学研究院硕士生，主要研究方向为天地异构融合网络以及网络运维管控。



胡成浩（1996-），男，江西人，硕士，主要研究方向为天地异构融合网络以及网络运维管控。



刘言（1985-），男，山东人，博士，主要研究方向为天地异构融合网络、网络运维管控、无线定位以及无线通信等。



孙慧（1992-），女，山西人，硕士，主要研究方向为天地异构融合网络以及网络运维管控。



田建召（1978-），男，河北人，中国电子科技集团公司电子科学研究院高级工程师，主要研究方向为天基网络。



陆洲（1970-），男，河北人，中国电子科技集团公司电子科学研究院研究员，主要研究方向为宽带卫星通信、天基网络。