

一种卫星通信网分簇管理的簇首备份机制

尹 译, 梁 俊, 肖 楠, 王 轶

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 针对卫星网络分层分簇的管理结构易在空间段产生中心节点故障, 导致网络管理安全性下降的问题, 在分析星簇簇首在空间中安全性需求的基础上, 提出了能够实现簇首快速切换的备份机制和相应的基于优先级的主备簇首选举算法, 该算法将星簇内部成员间可达性、时延、链路可靠性等因素进行合理量化考虑, 经过卫星优先级计算和星簇内协商选举, 生成簇首和备份簇首。仿真结果表明, 该机制能够在极短时间内替换故障簇首, 恢复星簇工作, 同时保证簇首对星簇管理开销最小。

关键词 卫星网络管理; 星簇簇首; 备份机制; 簇首选举

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.04.016

中图分类号 TN927 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)04-0065-05

A Cluster Head Backup Mechanism of Clustered Management in Satellite Communication Network

YIN Yi, LIANG Jun, XIAO Nan, WANG Yi

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In view of the problem that the security of network management is easily decreased by the center node troubles in the traditional satellite network management mechanism based on hierarchical-clustering structure, a novel scheme is proposed to meet the needs of the security cluster head, which supports the fast switching between formal and backup cluster head, and then a relevant new priority-based selecting algorithm is proposed for the formal and backup head selecting the formal cluster head and the backup cluster head through cluster members negotiating and priority calculating in consideration of communication ingredients comprehensively in satellite cluster such as accessibility, delay and reliability. The results of simulation indicate that the scheme can not only replace the failure cluster head and recover the cluster in very short time, but also minimize management cost of the cluster head.

Key words: space network management; cluster head; backup mechanism; cluster head selecting

卫星通信网是由不同轨道、功能、性质的卫星及地面设备构成的通信系统, 具有通信距离远、覆盖范围广、对通信环境要求低等优点^[1], 在通信领域中发挥着不可替代的作用。为了保证卫星网络能够稳定、高效、可靠地运行, 必须对其网络资源、运行业务

和通信状态进行有效的管理^[2], 以满足用户需求以及适应网络自身和外界环境的变化。卫星网络管理技术是对整个卫星通信网网络运行控制、状态监视和资源调度的关键技术。

传统基于地面站-卫星的点对点集中式的网络

收稿日期: 2013-12-24

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2012JM8004)

作者简介: 尹译(1989-), 男, 四川绵阳人, 硕士生, 主要从事卫星网络管理技术研究. E-mail: Yinyi1989114@163.com

引用格式: 尹译, 梁俊, 肖楠, 等. 一种卫星通信网分簇管理的簇首备份机制[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 15(4): 65-69. YIN Yi, LIANG Jun, XIAO Nan, et al. A cluster head backup mechanism of clustered management in satellite communication network[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(4): 65-69.

管理模式^[3],使得卫星缺乏管理的自主性与高效性。分层卫星网络管理结构的提出^[4,5],有助于解决传统网管模式对于卫星网络管理功能执行的制约问题。在该管理体系中,卫星星座采用分簇^[6]的方式进行管理^[7,8],通常将空间位置相对临近、功能任务存在协同关系的卫星构建为星簇,由簇首在空间进行直接管理,较大地提高了卫星网管的可靠性与灵活性。文献[7~8]提出了星簇构建的原则与相应算法,解决了星簇划分的实际问题。

但是,已有研究成果主要集中在星簇的构建与划分问题上,却忽略对簇首卫星自身的可靠性和安全性的考虑。在分层卫星网管体系中,簇首作为载有网管服务器^[9,10]的关键节点,其可靠性直接影响网络运行的健壮性,簇首一旦出现故障将导致整个星簇管理的瘫痪。针对以上问题,本文设计了一种星簇簇首生成与备份机制,并提出了相应的簇首选举算法,以提高卫星网络管理的有效性与可靠性。

1 分层卫星网络管理体系

分层卫星网络管理体系由中心管理站、区域分管理站、星簇管理星(簇首)、卫星节点代理(星簇成员)等组成^[3]。其网管体系结构见图1。

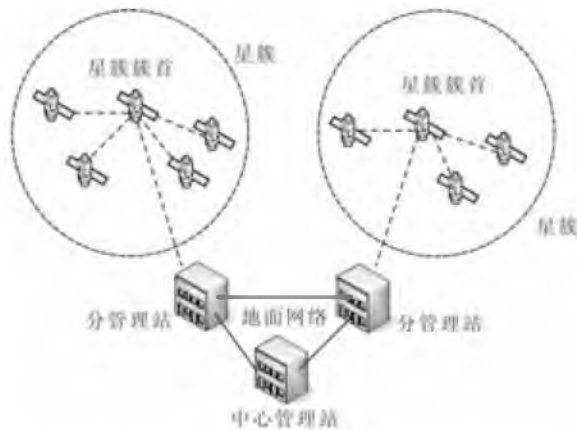


图1 分层卫星网管体系结构

Fig.1 Structure of hierarchical management in satellite network

在空间段卫星网管中,簇首卫星根据域的划分为自己所管理域内的卫星提供管理服务,在逻辑上呈现按层次集中的星状结构,这种结构的中心节点故障会导致其管辖域瘫痪甚至整个网络的异常。利用备份替换掉故障节点可以迅速恢复网络正常工作,能大大提高网络的健壮性。

因此,为了在空间中实现卫星网络的自主高效管理,必须对簇首进行备份,当在其失效时系统能够迅速切换至备份簇首,从而最大限度地保证网络的正常运转。同时,基于建设成本考虑,不能采用完全

冗余备份的方式,只能从星簇成员中进行备份的选择。这是本文的出发点。

2 星簇簇首的生成与备份机制设计

2.1 星簇中卫星优先级的确定

卫星优先级计算的前提是底层通信链路已存在并能转发簇内信息。星簇成员与簇首之间进行管理信息交互时,星簇的通信关系可以抽象为有向图 $G=(V,E)$,见图2。其中 $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 表示星簇内所有节点的集合, E 为星簇中对应所有相邻节点间链路的集合, $E=(e_1, e_2, \dots, e_m)$ 中元素 $\langle v_i, v_j \rangle$ 表示 v_i 和 v_j 之间的星际链路。

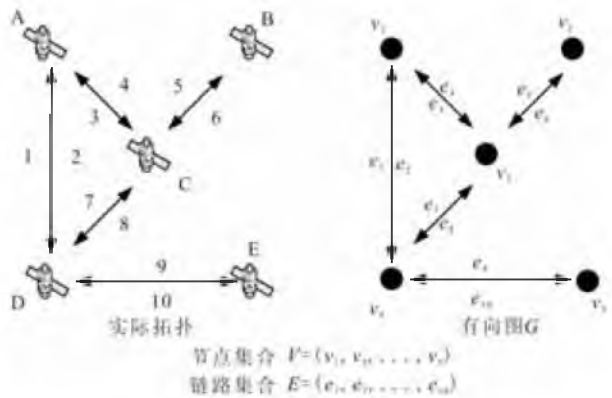


图2 网络拓扑与有向图关系

Fig.2 Network topology and relevant digraph

对于特定的星簇 $G=(V,E)$,做出如下定义:

1)定义 $A=(a_{ij})_{m \times n}$ 为 G 的邻接矩阵,其中:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \langle v_i, v_j \rangle \in E \\ 0, & \langle v_i, v_j \rangle \notin E \end{cases} \quad (1)$$

通过 Warshall 算法^[11],由邻接矩阵 A 可以计算出图 G 的可达矩阵 $P=(p_{ij})_{m \times n}$,其中:

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & v_i, v_j \text{ 通过任意次转发后能连通} \\ 0, & v_i, v_j \text{ 通过任意次转发后都不能连通} \end{cases} \quad (2)$$

2)开销矩阵 B 主要衡量星簇成员间的管理信息传输开销,设 λ_{ij} 表示 v_i 和 v_j 之间通信转发的跳数, χ_{ij} 表示 v_i 和 v_j 之间传输管理信息占用链路带宽比例, ψ_{ij} 表示 v_i 和 v_j 之间链路的可信程度, φ_{ij} 表示 v_i 和 v_j 之间链路延迟(星际链路延迟不能忽略)。其中, λ_{ij} 、 χ_{ij} 、 φ_{ij} 属于成本型开销, ψ_{ij} 属于效益型开销,为了更好地表示各因素对链路开销的影响,可将各开销参数进行标准化处理。

3)服务状态矩阵 $C=(c_i)_{n \times 1}$, C 表示星簇中各卫星是否具有管理能力, $c_i = -\infty$ 表示卫星 i 不具备簇管理功能。对于具有管理功能的卫星 j ,根据星载服务器的计算处理能力、智能管理能力,结合特定的算法生成卫星服务能力值 $c_j (c_j > 0)$ 。

4)安全状态矩阵 $\mathbf{D}=(d_i)_{n \times 1}$, \mathbf{D} 反映星簇的安全状态,包括卫星的预计剩余寿命、故障率、受损情况等。

$$\begin{cases} d_i=0, & \text{卫星停止工作} \\ d_i \in (0,1], & \text{卫星正常工作} \end{cases} \quad (3)$$

5)定义与卫星编号 i 相关的矩阵 $\mathbf{F}(i)$:

$$\mathbf{F}(i)=\begin{cases} (0 \cdots \cdots 0)^T, & (c_i=0) \\ (1 \cdots \cdots 1)^T, & (c_i \neq 0) \end{cases} \quad (4)$$

6)将 1)~5)中优先级影响因素进行综合处理,得到星簇内卫星量化后的管理开销矩阵 \mathbf{Q} :

$$\mathbf{Q}=\lambda_1 \mathbf{B}\mathbf{F}(i)+\lambda_2 \mathbf{C}+\lambda_3 \mathbf{D} \quad (5)$$

在式(5)中,系数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 按照地面分配权重预先设定。 \mathbf{Q} 中元素 Q_i 表示星簇假定成员 i 作为簇首时管理开销,星簇成员依据自己的管理开销生成相应的选举优先级(管理开销的数值越小,代表该卫星的优先级越高)。

2.2 簇首的产生和保持

簇首作为卫星网络空间部分的中心结点,应采用可靠的备份方式,保证簇首在出现故障或遭到破坏后,星簇仍能顺利地进行自主管理。

1)主备簇首的生成。星簇簇首的产生方式有 2 种:基于优先级的选举和地面直接指定。地面未指定簇首的条件下,在星簇构建完成后,各卫星以洪泛方式广播自己的优先级声明,优先级最高的将被选举为管理星,即簇首(Cluster Head, CH),其所载网管服务器即为主用管理服务器 S_1 ,对星簇成员进行管理。在 S_1 产生后,优先级次高的将被选举为备份簇首(Backup Cluster Head, BCH),其所载服务器为备用管理服务器 S_2 。

2)主备簇首的运行方式。在完成 S_1 、 S_2 的选举后,簇首与星簇成员之间通过协商探测报文中指定参数建立起邻接关系,在已建立的邻接关系上执行 COPS(Common Open Policy Service, COPS)协议,提供星簇内管理服务。参考 OSPF 协议中 Hello 报文结构,星簇内通信报文结合实际需要设计见图 3。

报文类型	发送者标识	接收者标识	通信时间	优先级	簇首 ID	簇首类型	簇首标识 ID	所有邻居	报文内容
------	-------	-------	------	-----	-------	------	---------	------	------

图 3 簇内通信报文结构

Fig. 3 Structure of communication message in cluster

簇成员的管理请求同时向 S_1 、 S_2 发起,即 S_1 、 S_2 采用热备份的工作方式,对同一请求, S_1 、 S_2 均进行应答操作。为保证 S_1 、 S_2 中管理信息库的一致性, S_1 、 S_2 定时与上层服务器进行同步,并采用发送增量摘要^[12]的方式互相校正。

3)星簇的保持。随着卫星的轨道运动和网络调整,必将导致星簇中成员(包括簇首)的变化。为了

保证簇首所辖管理域的完整性与安全性,定义如表 1 中所列出的事件,在星簇条件变化时触发执行相应处理程序。

表 1 事件及相应处理方式

Tab. 1 Events and corresponding handling measures

事件	事件描述	处理方式
α_1	管理服务器失效 (μ_1 : S_1 失效; μ_2 : S_2 失效; μ_3 : S_1 、 S_2 失效)	a
α_2	新卫星加入星簇 (μ_1 : 地面指定新簇首加入; μ_2 : 普通新卫星加入)	b
α_3	选举出簇首不理想	c
α_4	星簇卫星失效	d
α_5	未探测到备份簇首	e

a: 如果 α_1 发生, 3 种事件对应 3 种完全不同的结果, $\alpha_1-\mu_1$ 由备份簇首首先发现簇首对同步请求无回应,在短暂的簇首切换之后, S_2 接替 S_1 工作,星簇执行备份簇首重新选举。 $\alpha_1-\mu_2$ 因簇首未探测到备份簇首而触发,星簇重新选举备份簇首,簇首及其余星簇成员将保持正常工作。 $\alpha_1-\mu_3$ 常发生在网络遭大规模破坏或严重故障时,簇成员发送的探测报文多次无回应后,请求地面直接指定新簇首,或以点对点的方式直接管理。

b: 如果 α_2 发生,该过程将比较复杂。当非星簇成员卫星进入簇首管理范围并请求加入星簇时,通过地面站向簇首转发验证信息,簇首验证后建立管理信息链路。新卫星加入星簇后,若 $\alpha_2-\mu_1$ 发生,则新簇首与原簇首进行管理信息同步后,广播簇首变更消息。若 $\alpha_2-\mu_2$ 发生,则新卫星仅仅作为星簇新加入成员,可能改变星簇内通信关系,影响下一次选举的优先级,但对当前运行状态无影响。

c: 在星簇运行中,管理进程以按照周期 T 对每颗卫星的管理开销进行计算,通过比较确定当前簇首的理想程度,若统计结果显示簇首优先级不理想,即判定 α_3 发生,进行星簇簇首的再选举。

d: 事件 α_4 ,簇首在发出探测报文一段时间后未收到回复,在系统的管理组中将该成员标记为抑制状态,屏蔽其一切业务,并向地面报告其详细信息,同时启动任务协调机制^[13],安排其他卫星协作运行代替抑制卫星。

e: 当 α_5 发生即簇首长时间未能探测到备份簇首的存在,在指定时间后,簇首认为备份簇首失效,执行备份簇首再选举进程。

3 仿真及结果分析

为了验证簇首备份机制以及簇首卫星选举算法

在卫星分层网络管理中的性能,构建基于 STK/matlab 的卫星网络仿真环境,以模拟卫星网络簇首被破坏后的恢复情况,同时检验动态选举算法相对于固定簇首策略的性能。假定卫星星簇由 4 颗分布在轨道夹角为 30° 的 3 个轨道平面上、轨道高度为 1 450 km 的 LEO 卫星编队构成,见图 4。下面分别对采用簇首备份机制的必要性和簇首选举算法的有效性进行仿真分析。

仿真 1:簇首卫星备份机制的必要性。当星簇采用簇首备份机制时,星簇根据相应算法选举主备簇首,并定时举行更新选举,簇首和备份簇首之间采用热备份的工作方式,切换时间约为 10 ms。

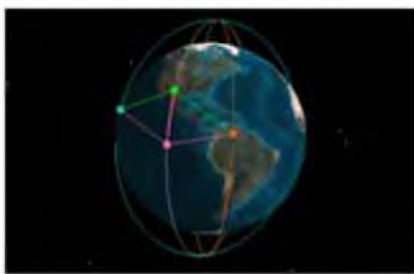


图 4 仿真星簇示意图

Fig. 4 Sketch map of cluster in experiment

选取 4 颗具有协同任务关系的卫星构成星簇,星簇内部由簇首卫星进行管理,并采用簇首备份机制维持星簇的正常运行。为了验证簇首备份机制对于簇首被破坏的恢复效果,在星簇运行过程中,计算不同时刻簇首故障后恢复时间,并与未采用该机制的星簇仿真进行比较。仿真结果见图 5。

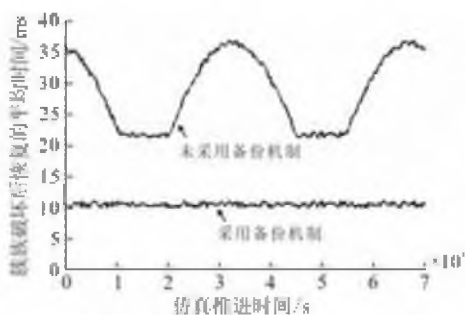


图 5 簇首破坏后星簇恢复工作时间

Fig. 5 Recovery time after destruction of cluster head

由图 5 可知,未采用簇首备份机制的星簇在簇首故障后恢复星簇管理的时间在 22~37 ms 之间,这是因为其簇首再选举过程中,星簇内成员之间必须进行选举信息的交互,其时长主要由星簇中相距最远成员间信息传输时延决定,并随着卫星相对位置变化而改变,在平稳段(如 1 000~2 000 s)编队运行至中高纬度地区,簇内最大距离等于同轨内星间距离,其恢复时间相对稳定;而在变化段(如 2 000~4 500 s),编队运行至赤道附近地区,簇内最大距离

是异轨星间距离,其恢复时间变化较大。采用簇首备份机制的星簇在簇首被破坏后恢复星簇管理的时间始终保持在 10~11 ms 之间,因为主备簇首采用热备份的方式同步工作,主簇首破坏后只需经过简单的切换即可使星簇恢复正常运行,不用经过长时延的选举信息交互。

因此,簇首备份机制的引入,能解决簇首遭到破坏或故障时消耗较长时间再选举的问题,在备份簇首存在时,即使簇首完全丧失工作能力,仍然能够在极短时间内恢复星簇的管理,相较于单簇首管理方式大大提高了系统的安全性能。

仿真 2:簇首选举算法的有效性。为了检验使用选举算法产生簇首的工作性能,在前一个仿真的基础上设置选举算法实时选举簇首,而设置的对照组的星簇中采用固定簇首(各卫星分别担任簇首)的方式管理卫星。测试 2 组星簇中簇首量化的管理开销及管理信息分发平均时间(簇首与星簇成员通信平均时间),其仿真结果见图 6~图 7。

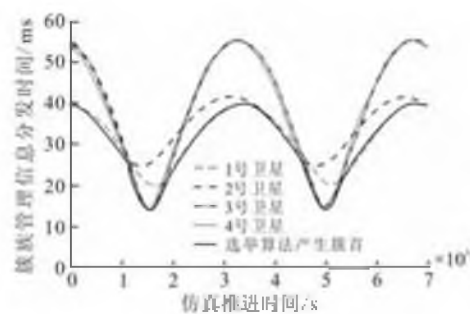


图 6 固定簇首与选举产生簇首量化管理开销

Fig. 6 Management cost of designated head and selected head

图 6 给出了不同卫星的量化管理开销以及采用文中所设计簇首选举算法生成的簇首卫星仿真结果。由图 6 可知,由于相邻轨道卫星运动引起的链路距离变化以及星间链路状态的不稳定,不同卫星的管理开销随着仿真时间的推进也在不断变化,因此采用传统固定簇首的方式所指定的管理卫星并不能保证在每一时刻都是最优的。而根据本文所设计的簇首选举机制,簇首卫星可根据星簇内卫星管理开销的变化进行动态再选举,从而保证任意时刻星簇的簇首始终为管理开销最小的卫星(见图 6 中实线),验证了簇首选举机制的有效性与准确性。

图 7 给出了以链路传播平均时延作为星簇管理的时效性度量标准时,不同卫星作为固定簇首时信息分发时延与采用本文所设计簇首选举机制时信息分发时延的仿真结果对比。由图 7 可知,采用固定簇首方式选择的管理卫星与簇成员之间的信息分发时延是动态变化的。任一卫星作为固定簇首都不能

保证簇内信息分发时延始终最小,而本文所提出的簇首选举机制由于综合考虑了链路时延、带宽等因素的影响,使得簇首卫星能够根据簇内卫星之间信息分发时延的大小动态调整(见图7中实线),从而能够最大限度地保证星簇卫星管理的时效性。图7的仿真结果还可以进一步推广到有多种度量指标的场中。

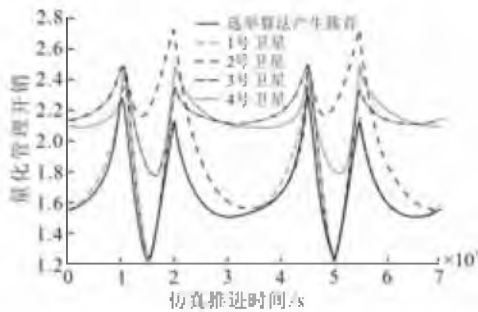


图7 固定簇首与选举产生簇首管理信息分发时间

Fig. 7 Management information distributing time of designated head and selected head

4 结语

分层分簇卫星网络管理模型在空间段呈现星状管理结构,易导致星簇簇首故障时所辖管理域瘫痪,成为卫星网管系统可靠运行的瓶颈。本文提出的星簇簇首备份机制,根据星簇成员的可达性、链路时延、链路可靠性等参数选举理想的主备簇首。主备簇首采用热备份的方式进行工作,在簇首被破坏或发生故障时能够立即完成备份切换,保证网络的正常工作。同时为满足卫星网络变化剧烈的特点,保证主备簇首对星簇的有效管理,在该机制中设置了事件触发的管理机制。仿真结果表明:采用星簇簇首备份机制的分层分簇卫星网管系统,能够明显降低簇首失效后星簇恢复工作的时间,缩减用户受到的影响,大大提高卫星网络的健壮性和安全性。

参考文献(References):

- [1] 杨海涛,杨露,何宇,等.卫星通信网络分布式仿真技术研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(2):67-71.
YANG Haitao, YANG Lu, HE Yu, et al. Research on distributed simulation technology for satellite communication network[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(2): 67-71. (in Chinese)
- [2] 胡谷雨.网络管理技术教程[M].北京:北京希望电子出版社, 2002.
HU Guyu, The principles of network management [M]. Beijing: Beijing hope electronic press, 2002. (in Chinese)
- [3] Todorova P. Network management in ATM LEO satellite networks[C]//Proc of 35th Hawaii international conference on system science. Big Island, HI: [s.n.], 2002: 360-365.
- [4] 张文波,冯永新,姜月秋,等.卫星综合信息网中基于策略的网络管理[J].计算机工程,2009,35(7):96-98.
ZHANG Wenbo, FENG Yongxin, JIANG Yueqiu, et al. Policy based network management in integrated satellites information network[J]. Computer engineering, 2009, 35(7): 96-98. (in Chinese)
- [5] 谭小波,付立冬.基于策略的卫星网络管理体系结构的研究[J].沈阳理工大学学报,2010,29(3):39-43.
TAN Xiaobo, FU Lidong. Research on the architecture of policy-based satellite network management [J]. Journal of shenyang ligong university, 2010, 29(3): 39-43. (in Chinese)
- [6] Senthilnath J, Omkar S, Mani V, et al. Hierarchical clustering algorithm for land cover mapping using satellite image[J]. IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 2012, 5(3): 762-768.
- [7] 江玉洁,姜兴龙,梁旭文.面向移动通信星座网络的自主管理分簇算法[J].系统工程理论与实践,2011,31(2):204-208.
JIANG Yujie, JIANG Xinglong, LIANG Xuwen. A clustering algorithm for self-management in mobile satellite constellation network [J]. Systems engineering-theory & practice, 2011, 31(2): 204-208. (in Chinese)
- [8] 吴迪,魏亿涛,王光兴.一种用于MEO/LEO卫星网络管理的分簇算法[J].计算机工程与应用,2007,43(23):151-154.
WU Di, WEI Yitao, WANG Guangxing. Clustering algorithm for MEO/LEO satellite networks management [J]. Computer engineering and applications, 2007, 43(23): 151-154. (in Chinese)
- [9] Westerinen A. Terminology for policy-based management [R]. RFC3198, 2001.
- [10] Yavatkar R. A framework for policy-based admission control [R]. RFC2753, 2000.
- [11] 叶红.可达矩阵的Warshall算法实现[J].安徽大学学报:自然科学版,2011,35(4):32-35.
YE Hong. Reach ability matrix by Warshall algorithm [J]. Journal of Anhui university: natural science edition, 2011, 35(4): 32-35. (in Chinese)
- [12] 王新华,韦卫,朱震.自适应增量策略的研究与实现[J].计算机应用研究,2006,32(4):35-39.
WANG Xinhua, WEI Wei, ZHU Zhen. Research and implementation on adaptive policy increment processing [J]. Application and research of computers, 2006, 32(4): 35-39. (in Chinese)
- [13] 姜月秋,李凯.卫星综合信息网面向任务的协作机制[J].小型微型计算机系统,2007,28(8):1367-1370.
JIANG Yueqiu, LI Kai. Task-oriented cooperation mechanism for satellite information network[J]. Journal of Chinese computer systems, 2007, 28(8): 1367-1370. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)