

6-6-2020

A Dynamic Routing Protocol which can Achieve Fast Convergence of MEO/LEO Network

Chengsheng Pan

Key Laboratory of Communication and Network, Dalian University, Dalian 116622, China;

Weigeng Lai

Key Laboratory of Communication and Network, Dalian University, Dalian 116622, China;

Huaifeng Shi

Key Laboratory of Communication and Network, Dalian University, Dalian 116622, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

A Dynamic Routing Protocol which can Achieve Fast Convergence of MEO/LEO Network

Abstract

Abstract: In view of the routing convergence slow problem caused by the large delay and the topological structure high dynamic performance of the satellite network, a dynamic routing protocol which can achieve fast convergence of MEO/LEO double-layer satellite network routing is put forward. The protocol based on the combination of Virtual Topology Routing Strategy and link state routing protocol *introduces the idea of network clustering. In the process of satellite network routing convergence, the whole network is divided into cluster management, and a covering clustering algorithm for MEO/LEO double layered satellite networks is proposed, which reduces the spread range of the link state notification LSA(Link-state advertisement), thus the LSA's diffusion overhead and the queuing delay are reduced. In the process of routing table update, a timer scheduling algorithm based on fault type judgment is proposed, which can reduce the time delay of routing table so as to realize the fast convergence of satellite networks.*

Keywords

satellite network, routing convergence, offline routing, link state routing protocol, network clustering

Recommended Citation

Pan Chengsheng, Lai Weigeng, Shi Huaifeng. A Dynamic Routing Protocol which can Achieve Fast Convergence of MEO/LEO Network[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3067-3074.

一种实现 MEO/LEO 网络快速收敛的动态路由协议

潘成胜, 来维庚, 石怀峰

(大连大学通信与网络重点实验室, 大连 116622)

摘要: 针对卫星网络传输时延大、拓扑结构高动态特性所导致路由收敛慢的问题, 提出一种实现 MEO/LEO 双层卫星网络路由快速收敛的动态路由协议, 该协议在将虚拟拓扑路由策略和链路状态路由协议相结合的基础上, 引入网络分簇思想, 在卫星网络路由收敛过程中, 将整个网络分簇管理, 并提出适用于 MEO/LEO 双层卫星网络的覆盖式分簇算法, 缩小了链路状态通告 LSA(Link-state advertisement) 的扩散范围, 从而减少 LSA 的扩散开销及排队时延。同时, 在路由表更新阶段, 提出一种基于故障类型判断的定时器调度算法, 有效减少了路由表更新时延, 实现卫星网络的快速收敛。

关键词: 卫星网络; 路由收敛; 离线路由; 链路状态路由协议; 网络分簇

中图分类号: TP393.02 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 12-3067-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712018

A Dynamic Routing Protocol which can Achieve Fast Convergence of MEO/LEO Network

Pan Chengsheng, Lai Weigeng, Shi Huai Feng

(Key Laboratory of Communication and Network, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: In view of the routing convergence slow problem caused by the large delay and the topological structure high dynamic performance of the satellite network, a dynamic routing protocol which can achieve fast convergence of MEO/LEO double-layer satellite network routing is put forward. The protocol based on the combination of Virtual Topology Routing Strategy and link state routing protocol *introduces the idea of network clustering. In the process of satellite network routing convergence, the whole network is divided into cluster management, and a covering clustering algorithm for MEO/LEO double layered satellite networks is proposed, which reduces the spread range of the link state notification LSA(Link-state advertisement), thus the LSA's diffusion overhead and the queuing delay are reduced. In the process of routing table update, a timer scheduling algorithm based on fault type judgment is proposed, which can reduce the time delay of routing table so as to realize the fast convergence of satellite networks.*

Keywords: satellite network; routing convergence; offline routing; link state routing protocol; network clustering

引言

卫星网络系统是由不同层次、不同轨道上多种



收稿日期: 2015-10-29 修回日期: 2016-02-22;

基金项目: 国家自然科学基金(61301151, 91338104);

作者简介: 潘成胜, (1962-), 男, 江苏无锡, 博士, 教授, 研究方向为一体化网络体系与网络协议研究。

类型的卫星系统按照空间信息资源的最大有效综合利用原则, 有机构成的智能化体系。它不仅是对地面宽带通信的有益补充, 而且具有自身独特的性能和优势, 如通信距离远、覆盖范围广、不受地理环境限制、机动灵活、通信线路稳定可靠、传输质量高等。这些特点使卫星网络在信息基础设施建设中具有极其重要的地位^[1]。

<http://www.china-simulation.com>

• 3067 •

具有星间链路和星载路由交换能力的卫星星座,是卫星移动通信的发展趋势。根据该类网络的周期性特点,文献[2]提出了离散时间虚拟拓扑路由(DT-DVTR)算法,该算法将卫星网络运行周期离散成若干个拓扑结构相对静止的时间片,并针对每个独立的时间片计算并生成静态路由表。具有星际链路的 LEO/MEO 卫星网络路由协议^[2-5],均是以该路由算法为基础。但该算法不具备自主运行能力。在星间链路中断或受干扰的情况下,DT-DVTR 算法(Discrete Time Dynamic Virtual Topology Routing)仍按照预先计算的路由表进行数据转发,会造成大量数据丢失,导致卫星网络可靠性和抗毁性差。因此,为保证卫星网络通信质量,具有高适应性的卫星网络动态路由协议^[6-7],将成为未来卫星网络路由协议的主流。

目前地面网络广泛使用链路状态路由协议 OSPF^[8-9],虽然有自主运行能力,但 OSPF 是针对地面静止网络提出的,并不适用于传输时延大和拓扑结构高动态变化的网络,例如,卫星网络。若将 OSPF 协议直接应用于卫星网络,卫星网络拓扑切换会产生大量的链路状态通告 LSA,增加网络开销,导致网络性能下降。因此,若要将 OSPF 协议应用到卫星网络,必须对其相关算法和技术进行改进。

文献[6]提出将虚拟拓扑路由算法和 OSPF 协议相结合的路由协议 RLSR (Satellite Link State Routing)。该协议有效地降低了卫星网络拓扑周期切换时的网络开销,但该类协议没有考虑到链路异常中断时,LSA 泛洪所造成的网络开销。另外,RLSR 协议延用了 OSPF 协议中的定时器技术,这使得卫星节点内部路由表更新的时延较长,从而影响整个网络的收敛时间。

针对 RLSR 协议中存在的问题,本文提出卫星网络自主路由协议 ASRP (Autonomous Satellite Network Routing Protocol)。该协议首先在卫星网络中引入分簇思想^[10-11],提出双层卫星网络覆盖分簇算法,将整个网络划分成若干个簇,LSA 通过簇首传播至整个网络,缩小 LSA 的扩散范围,从而

降低 LSA 的扩散开销和排队时延。在路由表更新阶段,提出一种新的故障类型判断算法,该算法优化了 OSPF 协议中的定时器技术,减少了路由表的更新时延。该路由协议具有自主运行能力,能适应卫星网络拓扑异常变化。

1 卫星网络自主路由协议设计

卫星网络自适应路由协议(ASRP)是一种改进的链路状态路由协议,与 RLSR 协议相比,它做了以下方面的优化:

(1) 针对 LSA 扩散阶段路由开销大的问题,引入网络中分簇的概念,提出适用于 MEO/LEO 卫星网络的覆盖分簇算法。该算法根据 MEO 卫星的覆盖范围进行分簇,簇首由 MEO 卫星担任,然后对重复覆盖节点(Coincidence Node)与游离节点(Free Node)进行进一步处理,完成整个分簇过程。该算法限制了 LSA 扩散的路由跳数,降低了路由开销。

(2) 在路由表更新阶段,提出一种新的卫星网络故障类型判断算法,优化传统定时器调度算法,有效减少了节点内部路由表更新次数及路由表更新时延。

2 双层卫星网络覆盖分簇算法

传统链路状态路由协议使用泛洪的方式传播 LSA,这种扩散方式的路由开销会随着路由的跳数呈指数增加。为解决这一问题,本文引入网络分簇概念,当卫星网络中有异常中断时,簇首对簇内的 LSA 进行收集整理并传递到其他簇首,然后各个簇在本簇内进行 LSA 扩散,这将有效减少路由开销,提高网络稳定性。同时,LSA 数量的减少也降低了网络拥塞的可能。

2.1 卫星分类

给定卫星集合 S ,根据轨道高度,将卫星集合分为两类: $M = \{m_i | i = 1, 2, \dots, m\}$,表示中轨卫星集合。 $L = \{l_j | j = 1, 2, \dots, n\}$,表示低轨卫星集合。用符号 $e(i, j)$ 表示卫星 i 与卫星 j 之间的链路。 $E(i)$ 表示卫星 i 邻居节点集合。

2.2 确定链路权重

令 $d(s_i, s_j)$ 表示卫星 i 与卫星 j 之间的链路权重, 其具体定义如公式(1)所示:

$$d(s_i, s_j) = \frac{1}{\alpha_1 \cdot U_{ij} + \alpha_2 \cdot \frac{D_{ij}}{D_{ave}} + \alpha_3 \cdot G_{ij}} \quad (1)$$

式中: U_{ij} 表示链路 $e(i, j)$ 的带宽利用率; D_{ave} 表示某一时刻卫星网络中所有链路传输时延的平均值。

D_{ij} 表示链路 $e(i, j)$ 的时延; G_{ij} 表示链路 $e(i, j)$ 的丢包率; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为链路权重调节因子, 分别用于调节带宽利用率、时延, 丢包率对权重的贡献。

公式(1)通过去除量纲, 将带宽利用率、时延、丢包率三个参数处理为相同数量级后加权相加, 使得 $d(s_i, s_j)$ 成为受带宽、时延、丢包率三个因素影响的链路总权重。 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为调节因子, $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ 。在实际应用中可根据业务要求动态设置, 本文并不考虑发送业务, 故将 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 统一设置为 $1/3$ 。

$d(s_i, s_j)$ 作为影响链路的综合性能, 在 2.4 节中, 为重复覆盖节点的归属提供比较的依据。

2.3 初始簇的划分

如图 1 所示, 遍历集合 M , 计算被 m_i 覆盖的卫星集合 $L_{m_i} = \{l_j | l_j \in L\}$ 。 C_{m_i} 是以 m_i 为簇首的簇, 令 $C_{m_i} = L_{m_i}$ 最终得到簇集合 $N = \{C_{m_i} | m_i \in M\}$ 。

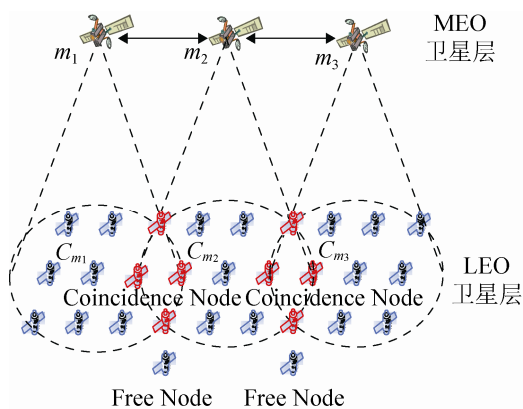


图 1 双层卫星网络图

Fig.1 Double-layer satellite network graph

2.4 重复覆盖节点处理

如图 1 所示, 由于簇首的覆盖区域的重合问题,

会存在同一颗 LEO 卫星被多个簇首覆盖的情况, 因此需要对重复覆盖节点进一步处理。处理方法如下:

1. 遍历集合 N , 设重复覆盖节点集 $L_{ij} = C_{m_i} \cap C_{m_j}$ 表示簇 C_{m_i} 与 C_{m_j} 的交集,

(1) 若 $L_{ij} = C_{m_i} \subset C_{m_j}$, 则更新 N 为 $N \setminus C_{m_i}$ 。

(2) 若 $L_{ij} = C_{m_j} \subset C_{m_i}$, 则更新 N 为 $N \setminus C_{m_j}$ 。

(3) 若 $L_{ij} = C_{m_i} = C_{m_j}$, 设 $d_{m_i} = \min d(m_i, l_k)$, $d_{m_j} = \min d(m_j, l_k)$, 其中 $l_k \in L_{ij}$ 。若 $d_{m_i} > d_{m_j}$, 则更新 N 为 $N \setminus C_{m_i}$ 。若 $d_{m_i} < d_{m_j}$, 则更新 N 为 $N \setminus C_{m_j}$ 。若 $d_{m_i} = d_{m_j}$, 则更新 N , $N = \{N \setminus C_{m_i}, N \setminus C_{m_j}\}$ 。

(4) 若 $L_{ij} \neq C_{m_i}$ 且 $L_{ij} \neq C_{m_j}$ 遍历 L_{ij} 分别计算 $d(m_i, l_k)$ 与 $d(m_j, l_k)$, 其中 $l_k \in L_{ij}$ 。若 $d(m_i, l_k) > d(m_j, l_k)$, 则 $C_{m_j} = C_{m_j} \setminus l_k$ 。若 $d(m_i, l_k) < d(m_j, l_k)$, 则 $C_{m_i} = C_{m_i} \setminus l_k$ 。若 $d(m_i, l_k) = d(m_j, l_k)$, 设 $|C_{m_i}|$ 表示 C_{m_i} 中的元素个数。若 $|C_{m_i}| > |C_{m_j}|$, 则更新簇 C_{m_j} 为 $C_{m_j} \setminus l_k$ 。若 $|C_{m_i}| < |C_{m_j}|$, 则更新簇 C_{m_i} 为 $C_{m_i} \setminus l_k$ 。若 $|C_{m_i}| = |C_{m_j}|$, 则更新簇 C_{m_j} 为 $C_{m_j} \setminus l_k$ 或 $C_{m_i} \setminus l_k$ 。

2. 经过第一步处理后, 集合 N 中可能会出现元素为空, 需要将 N 中的空元素删除。遍历集合 N , 若 $C_{m_i} = \phi$, 更新簇集合 N 为 $N \setminus C_{m_i}$ 。

2.5 游离节点处理

如图 1 所示, 当 MEO 卫星无法覆盖全球时, 可能会出现 LEO 卫星游离于 MEO 卫星的覆盖范围之外, 此时需要对游离节点进行进一步处理。处理步骤如下:

1. 设游离节点集 $L_s = L \cap \sum_{i=0}^n C_{m_i}$, 若 $L_s = \phi$, 分簇完成。

2. 若 $L_s \neq \phi$, 遍历 L_s 集合, $l_a \in L_s (a=1, 2, \dots, n)$, 设 l_k 为 l_a 的同轨道节点, 且 $l_k \notin L_s$, 根据 l_k 到 l_a 跳数由小到大的顺序, 依次选择 l_k 。若 $l_k = \phi$ 且 $l_k \in C_{m_i}$, 则 $l_a \in C_{m_i}$, 更新 L_s 集合为 $L_s \setminus l_a$ 。

3. 若 $l_k = \phi$, 设 l_v 为 l_a 的异轨道节点, 根据到 l_a 跳数由小到大的顺序, 依次选择 l_v 。若 $l_v \in C_{m_i}$, 则 $l_a \in C_{m_i}$, 更新 L_s 集合为 $L_s \setminus l_a$ 。

4. 重复 2-3 步, 若 $L_s = \phi$, 则分簇完成。

3 故障类型判断法

在 OSPF 协议中, 为限制路由表的更新频率, 路由器内部会设置两个定时器, 通过相关算法对两个定时器进行调度, 从而达到对多个 LSA 批量处理的目的。

目前最常用的定时器调度算法有指数规避算法和固定保持时间算法。这两种算法将定时器延迟的时间作为判断路由表更新的唯一标准, 因此会产生不必要时延, 影响整个网络的收敛速度。

为解决这一问题, 本文提出卫星网络故障类型判断算法 SFTJM(Satellite Network Fault Type Judging Method), 该算法在指数规避算法中加入故障类型判断机制, 使网络的故障类型作为判断路由表是否更新的标准之一。

3.1 故障类型的判断方法

卫星网络中的故障可分为两种: 链路故障(LinkDown)和节点故障(NodeDown)。

链路故障: 当链路 $e(i, j)$ 出现故障时, 卫星节点 i 和 j 分别产生相应的 LSA, 网络中的其他节点通过接收并读取两个节点产生的 LSA 信息来判断出链路 $e(i, j)$ 出现故障。

以图 2(a)为例, E 点为路由更新节点, 当 A-B 间链路断开时, 节点 A、B 会分别产生描述 A-B 间链路状态的 LSA。当节点 E 收到来自节点 A、B 的两个 LSA 时, 即可判断故障类型为 A-B 间的链路故障。

节点故障: 当节点 i 出现故障时, 网络中的其他节点通过接收并读取集合 $E(i)$ 中所有节点产生的 LSA 信息来判断节点 i 出现故障。

以图 2(b)为例, 当节点 A 发生故障时, A 与所有邻居节点的链路断开, 即除节点 A 之外, 所有的邻居节点都会产生描述自身与节点 A 链路状态的 LSA, E 节点只能收到来自节点 B、C、D 的 LSA, 无法接收节点 A 的 LSA, 依此判断故障类型为节点 A 的故障。

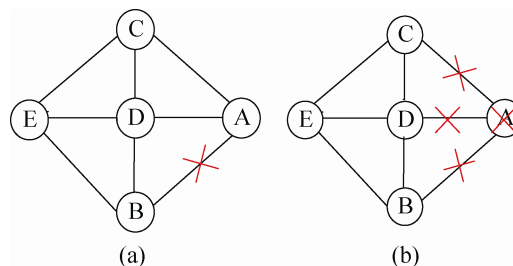


图 2 链路及节点故障图

Fig.2 Link and node fault graph

3.2 故障类型判断函数

根据 3.1 节中的判断方法, 创建故障类型判断函数 $Judge()$, 函数通过比较 LSA 中的链路状态信息, 判断网络故障类型。 $Judge()$ 执行过程如下:

- (1) 每个卫星节点内部维护一个用于存储链路状态通告(LSA)的数组 $lsaArr$ 。(Line1)
- (2) 当节点接收到一个链路状态通告(lsa)时, 首先判断 $lsaArr$ 数组中是否已经包含该 lsa , 若包含则丢弃, 若不包含则执行下一步。(Line2-Line5)
- (3) 读取 lsa 信息, 获得 lsa 中的中断链路两端节点地址, 包括 lsa 的源节点地址($IPfrom$)和对端节点的地址($IPto$)。(Line6-Line7)
- (4) 遍历 $lsaArr$ 数组, 若数组中的有 $lsaArr[i]$ 描述的链路与 lsa 相同, 则判断网络中有链路故障发生, $Judge()$ 函数返回 1。(Line9-Line12)

若 $lsaArr$ 中存在多个成员的 $IPto$ 与 $lsa.IPto$ 相等且成员个数等于 $IPto$ 所代表节点的邻居数量($neighborNum$), 则可以判断网络发生节点故障, $Judge()$ 函数返回 2(Line13-Line15)。

若无法判断故障类型, 将 lsa 放入 $lsaArr$ 数组中, $Judge()$ 函数返回 0。(Line16- Line17)

$Judge()$ 函数核心代码如下:

```

Line1: LSA[] lsaArr;
Line2: accept(lsa);
Line3: if(lsaArr.countain(lsa)){
Line4:     remove(lsa);
Line5:     return;}
Line6: IPfrom =lsa.IPfrom;
Line7: IPto = lsa.IPfrom;

```

```

Line8: for(int i=0,j=0;i<lsaArr.length-1;i++)
Line9: { if(lsaArr [i].IPfrom== IPto
Line10:    &&lsaArr [i].IPto== IPfrom)
Line11:    return 1;
Line12:    if(lsaArr[i].IPto==IPto)
Line13:    { j++;
Line14:    if(j== neighborNum)
Line15:    return 2;}
Line16:    add(lsaArr, lsa);

```

```

Line17:    return 0; }

```

3.3 SFTJM 过程描述

SFTJM 是在指数规避算法中加入 *Judge()* 函数, 使网络的故障类型作为判断路由表是否更新的标准之一。SFTJM 的节点状态如图 3 所示, 最初, 路由器处于 INIT 状态。在接收到第一个 LSA 后, 执行路由表更新操作 (Perform SPF) 并启动 *spfDelaytimer*, 同时路由器转移到 Judgement 状态。

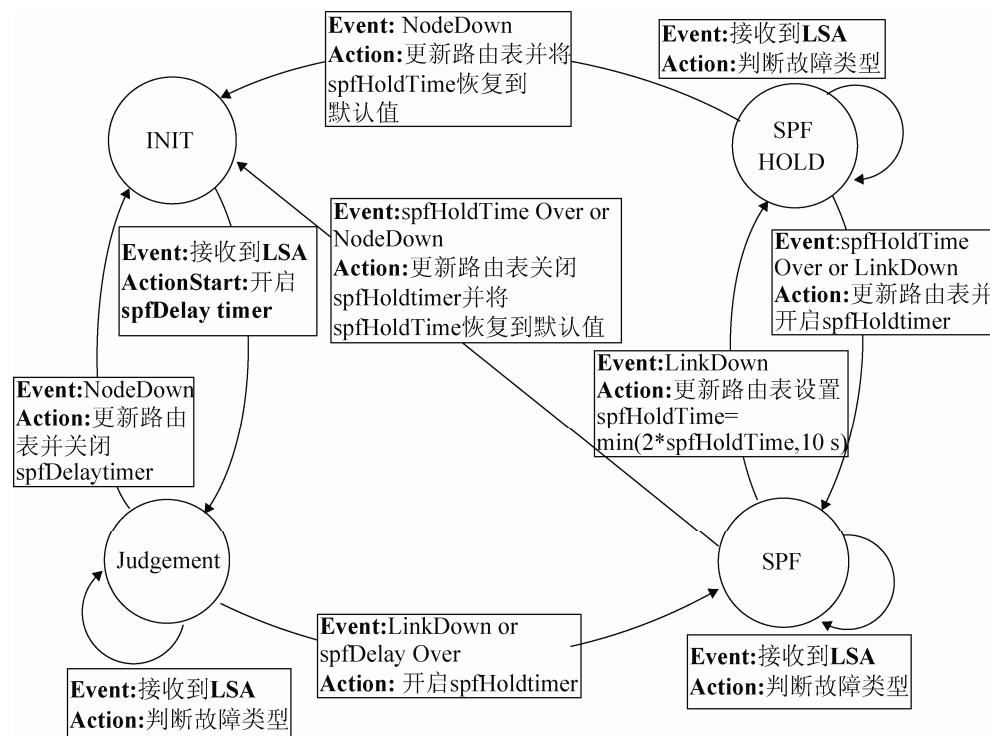


图 3 SFTJM 的节点状态图

Fig.3 Node state graph of SFTJM

在 Judgement 状态收到 LSA 时, 路由器通过 *Judge()* 函数判断故障类型, 如果故障类型为 NodeDown, 执行路由表更新操作 (Perform SPF) 并关闭 *spfDelaytimer*, 路由器状态转移到 INIT; 如果故障类型为 LinkDown, 或在 *spfDelay* 期间无法判断故障类型, 路由器状态转移到 SPF 状态, 并开启 *spfHoldtimer*。

在 SPF 状态收到 LSA 时, 路由器通过 *Judge()* 函数判断故障类型, 如果故障类型为 NodeDown, 或 *spfHoldTime* 期间没有收到 LSA, 执行路由表更

新操作 (Perform SPF), 关闭 *spfHoldtimer*, 将 *spfHoldTime* 恢复为默认值, 路由器状态转移到 INIT 状态; 如果故障类型为 LinkDown, 执行路由表更新, *spfHoldTime* 增加一倍 (上限 10s), 路由器状态转移到 SPF HOLD 状态。

在 SPF HOLD 状态接收 LSA 时, 路由器通过 *Judge()* 函数判断故障类型, 如果故障类型为 NodeDown, 执行路由表更新 (Perform SPF), 关闭 *spfHoldtimer* 并恢复 *spfHoldTime* 默认值, 路由器状态转移到 INIT; 如果故障类型为 LinkDown, 或

spfHoldTime 超时，路由器状态转移到 SPF 状态。

4 仿真分析

为对 ASRP 协议进行仿真实验。本文构造了一个包含 LEO /MEO 双层卫星网络，在星上运行 ASRP 协议，收集表现 ASRP 协议的相关特性，对 ASRP 协议进行分析。

4.1 仿真场景的建立

LEO 卫星层次采用铱星卫星系统，多层卫星网络中 MEO 卫星层次高度为 10 355 km，共有三个轨道平面，每个轨道面平面之间的夹角为 60 度，每个轨道平面包含 6 颗卫星。仿真所用星座参数如表 1 所示，通过 STK 仿真运行，得到卫星网络拓扑参数即卫星网环境特征数据(卫星节点个数、链路通断时间、位置距离关系和时延等)。

表 1 LEO/MEO 星座的基本参数

序号	参数	数量
1	LEO orbital plane number	6
2	Number of satellites in orbit LEO	11
3	LEO satellite orbit inclination	30°
4	LEO satellite orbit altitude	780 km
5	MEO orbital plane number	3
6	Number of satellites in orbit MEO	6
7	MEO satellite orbit inclination	60°
8	MEO satellite orbit altitude	10 355 km

4.2 覆盖式分簇算法性能仿真

本节通过对卫星网络路由开销的仿真，分析分簇算法的性能。仿真将卫星网络分为稳定状态和不稳定状态，稳定状态下网络中不存在链路异常中断，不稳定状态下存在链路异常中断。在两种状态下分别对 ASRP、OSPF 及 RLSR 路由协议进行路由开销的仿真。仿真中，设定 *spfDelay* 设为默认值 5 s，*spfHoldTime* 为固定值 10 s。hello 发送周期为 10 s，仿真时间为 300 s。不稳定状态时，设定 140 s 时随机中断 4 条低轨链路。仿真结果如图 4~5 所示。

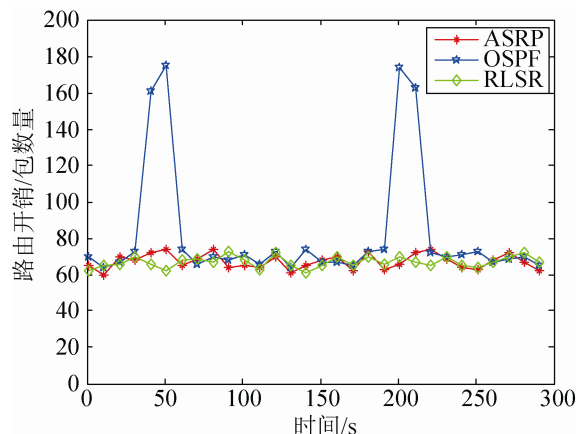


图 4 稳定状态下路由开销对比

Fig.4 Comparison of routing overhead in stable state

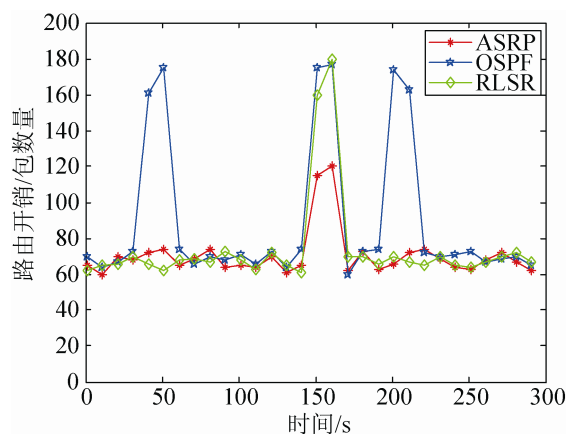


图 5 不稳定状态下路由开销对比

Fig.5 Comparison of routing overhead in unstable state

稳定状态下，30 s 和 190 s 处发生拓扑切换，如图 4 所示，ASRP 和 RLSR 协议没有突起的部分，路由开销是最小的。这是因为在卫星拓扑正常切换的情况下 ASRP 和 RLSR 协议使用已经计算好的路由表进行更新，不需要产生新 LSA。

如图 5 所示，三种协议仿真图会同时产生突起，其中 ASRP 的路由开销约为 OSPF 和 RLSR 的 2/3，这是因为采用网络分簇后，对于簇内的链路故障，产生的 LSA 只需要在本簇内进行扩散，簇间由簇首转发，不需要进行整个网络的泛洪，从而降低了网络的路由开销。

4.3 SFTJM 仿真分析

本节通过对单个卫星节点内部路由表更新时延和路由表更新次数两个参数的仿真，比较固定时

间法、指数规避法以及 SFTJM 的性能。

仿真设置 30 个 LSA, 所有 LSA 在时间 T 内均匀分布, 第一个 LSA 到达时间为 0 时刻。仿真设置 $spfDelay$ 为 100 ms, T 为 300 ms, $spfHoldTime$ 的初始值 H 为 500 ms。

如图 6 所示, 使用 SFTJM 的路由收敛时间明显小于指数规避法和固定保持时间法, 仿真显示, 在开始时, 由于 LSA 数量少, 故障类型判断法作用很小, 但随着 LSA 数量的增多, 故障类型判断的优势也越来越明显。

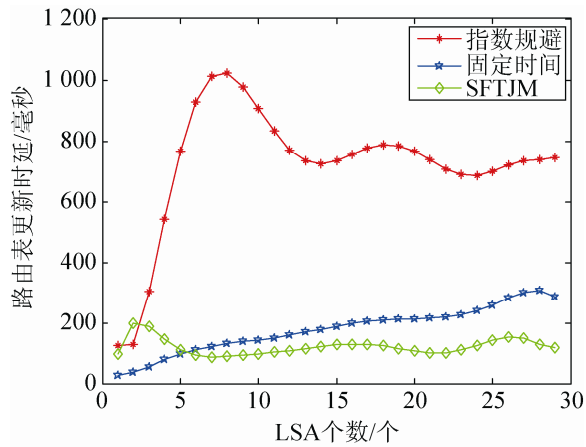


图 6 单节点路由表更新时延图

Fig.6 Single node routing table update time delay graph

如图 7 所示, 在卫星节点的一次收敛中, 固定保持时间法的路由表更新次数最多, 指数规避法最少, SFTJM 居中。

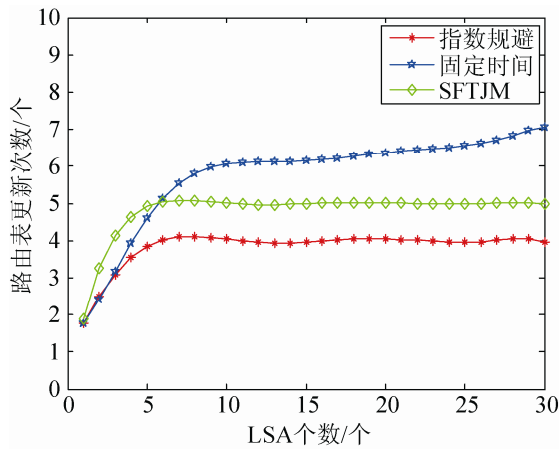


图 7 单节点路由表更新次数图

Fig.7 Single node routing table update times graph

仿真数据表明, 故障类型判断法以增加一次路由表更新次数为代价, 换取了路由表更新时延的大幅减小, 这对实现整个网络的快速收敛具有重要的作用。

4.4 卫星网络收敛时间仿真分析

本节通过对卫星网络的收敛时间和收敛时间复杂度仿真, 比较 ASRP、OSPF 及 RLSR 三种路由协议的收敛性能。仿真中, 设定 $spfDelay$ 设为默认值 5 s, $spfHoldTime$ 的初始值 H 为 1 s, $spfHoldTime$ 上限值为 10 s。仿真结果如图 8 和图 9 所示

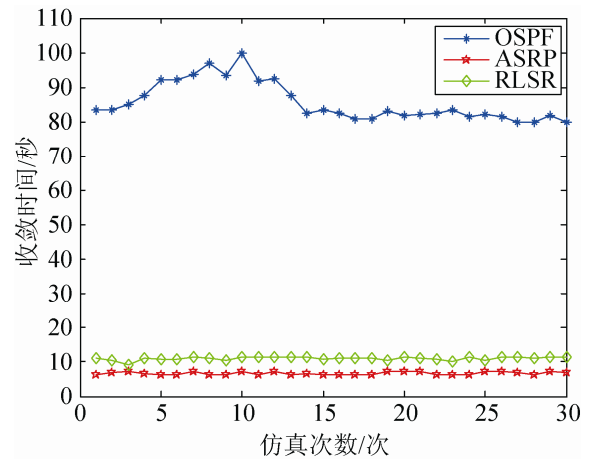


图 8 三种协议收敛时间图

Fig.8 Graph of the convergence time of three protocols

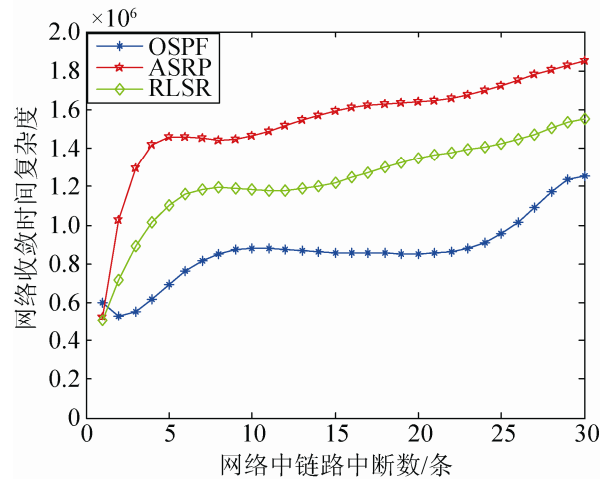


图 9 三种协议收敛时间复杂度图

Fig.9 Graph of the time complexity of the convergence of three protocols

如图 8 和 9 所示, ASRP 的收敛时间约为 OSPF

的 1/10, 约为 RLSR 的 2/3, 收敛时间复杂度约为 RLSR 的 7/6, 这是由于本文提出的分簇算法和故障类型判断算法, 减少了 LSA 扩散阶段排队时延和单节点路由表更新时延, 从而有效缩短了整个网络的收敛时间。

5 结论

卫星网络自主路由协议 (ASRP) 是针对 LEO/MEO 卫星网络设计的 1 种动态路由协议。该协议在 RLSR 基础上, 引入了网络分簇的思想, 提出适用于 LEO/MEO 卫星网络的覆盖式分簇算法, 有效的解决了 RLSR 在 LSA 扩散阶段路由开销大的问题。同时提出 1 种新的故障类型判断算法, 减少卫星节点中路由表的更新时延, 最终实现卫星网络的快速收敛。

仿真结果表明, ASRP 的平均路由收敛时间是 OSPF 的 1/10, 是 RLSR 的 2/3, 不稳定状态下的路由开销约为 OSPF 和 RLSR 的 2/3。ASRP 能够为卫星信息传送网络的建设提供技术支持。

参考文献:

- [1] 卢勇, 赵有健, 孙福春. 卫星网络路由技术[J]. 软件学报. 2014, 25(5): 1085-1100.
LU Yong, Zhao Youjian, Sun Fuchun. Routing Techniques on Satellite Networks[J]. Journal Of Software. 2014, 25(5): 1085-1100.
- [2] Markus Werner. A Dynamic Routing Concept for ATM-Based Satellite Personal Communication Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (S0733-8716), 1997, 15(8): 1636-1648.
- [3] SHI Haoshan, DONG Xiangjun. A Shortest Path Algorithm Based on Mobile Agent in LEO Satellite Network[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing(WiCOM 2008). Dalian, China, 2008: 1-5.
- [4] Ian Akyildiz, Eylem Ekici, Michael Bender. MLSR: A Novel Routing Algorithm for Multilayered Satellite IP Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (S1063-6692), 2002, 10(3): 411-424.
- [5] Derya Yiltas, Zaim A Halim. A Dynamic Routing Algorithm in LEO Satellite Systems Estimating Call Blocking Probabilities[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Recent Advances in Space Technologies. Istanbul, Turkey, 2007: 541-545.
- [6] 李德. 一个卫星网络链路状态路由协议的设计与仿真[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010:1-55.
LI De. Design and Emulation of a Link-State Routing Protocol for Satellite Networks[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010:1-55.
- [7] Daniel Fischer, David Basin, Knut Eckstein, Thomas Engel. Predictable Mobile Routing for Spacecraft Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing (S1536-1233), 2013, 12(6): 1174-1187.
- [8] OSPF 路由协议概念及工作原理 [EB/OL]. <http://www.cnpar.net/Class/OSPF/05121513185417646847>. Html, 2005.12.
Concept and Working Principle of OSPF Routing Protocol[EB/OL]. <http://www.cnpar.net/Class/OSPF/05121513185417646847>. Html, 2005.12.
- [9] Ting HAN, LUO Shoushan, Zhu Hongliang, Xin Yang. Trust Routing Algorithm based on Multiple Decision Factor Theory in OSPF Protocol[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications (S1005-8885), 2013, 20(5): 104-109.
- [10] 林琳. 基于分簇的 GEO_LEO 双层卫星网络故障发现策略研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2014:1-58.
Lin Lin. Research on Fault Detection Strategy based on Clustering of GEO/LEO Double Layer Satellite Network[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014:1-58.
- [11] 李飞龙, 李广侠, 李志强, 等. 基于多层分簇的北斗卫星导航系统拓扑结构与路由策略[J]. 通信学报, 2014, 35(10): 31-41.
LI Feilong, LI Guangxia, LI Zhiqiang, et al. Topology Structure and Routing Policy based on Multilayered Clusters in Beidou Satellite Navigation System[J]. Journal on Communications, 2014, 35(10): 31-41.