

下一代 LEO 卫星网络路由策略分析

罗雪山¹, 李健杰^{1,2}, 易先清¹, 唐 曙¹

(1. 国防科技大学信息系统与管理学院,湖南 长沙 410073;2. 第三军医大学高原军事医学系,重庆 400038)

摘要 鉴于 LEO 卫星网络有限的资源和高昂的建设维护成本,研究有效的 LEO 卫星网络路由策略成为下一代 LEO 卫星网络建设的关键问题。LEO 卫星网络具有不同于传统的地面网络的特性,首先从对路由影响的角度对这些特性进行归纳,随后依据这些特性总结出侧重于网络拓扑结构、路由更新和负载平衡 3 个方面的解决方案,分析了每种方案特点,为进一步设计满足应用需求的、更为有效的下一代卫星网络路由策略奠定基础。

关键词 LEO 卫星网络;路由策略;网络拓扑;路由更新;负载平衡

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.02.015

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)02-0072-04

LEO 卫星通信系统通过星间链路(ISL)构成卫星网络,该网络不同于传统的地面网络,具有有限的线上处理能力和高昂的建设与维护成本,另一方面应用需求的提升要求卫星网络必须达到更好的系统性能,这就要求设计有效的路由策略对卫星网络的信息传输进行规划^[1]。

1 卫星网络特性

卫星网络的拓扑结构具有对称性,不考虑节点失效,卫星网络节点数目有限并且相对固定,卫星节点之间较远的物理距离使得卫星网络中需要考虑延时开销因素。

卫星的轨间 ISL 将随卫星的移动而改变,体现在距离、仰角和方位角的变化上;卫星经过极地地区以及缝隙区域时,轨间 ISL 存在切换与开关的情况;卫星星座的运行具有规律性和确定性,卫星网络拓扑结构的变化也呈现周期性;卫星具有较小的覆盖区域,信息传输业务需求因覆盖区域人口分布密度不同而呈现差异,从而导致网络负载不平衡。

星上设备使用宇航级芯片,CPU 处理能力和存储器容量受到很大限制,卫星节点的升级维护困难、成本高昂;单颗卫星失效不应影响全网运行;星载路由器运行的路由算法应具有较低的实施复杂性。

2 解决方案

基于以上卫星网络的特性,针对影响卫星网络路由问题设计相应的解决方案。

2.1 网络拓扑结构虚拟化方案

2.1.1 时间虚拟化

Seong 等^[2]将星座周期分割为有限时间片,每个时间片对应的网络拓扑看作一个“状态”,将卫星网络动态拓扑结构模型化为一个有限状态机。Gounder 等^[3]将卫星系统在特定时刻的网络拓扑定义为卫星网络的一个“快照”,当增加新的 ISL 或者断开已有的 ISL 时,认为形成新的快照。Bai 等^[4]提出了无连接的紧凑的显式多路径路由策略 CEMR,该策略将系统周期 T 分成 n 个时间间隔,在每个时间间隔 Δt 内, Δt 足够小

* 收稿日期:2010-06-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60972166)

作者简介:罗雪山(1965-),男,湖南祁东人,教授,博士生导师,主要从事指挥信息系统研究。

E-mail: jianjielee@nudt.edu.cn

时,星间链路的代价认为恒定,网络拓扑结构不发生变化,网络状态在路由计算前得到更新。时间虚拟化可对 ISL 预先精确计算,提供优化路由,开销较小,但路由信息需求增加,对于链路拥塞、通信流量变化以及故障实时情况的适应性差。

2.1.2 空间虚拟化

从空间上将星座覆盖区域以及星座本身进行虚拟化,分为覆盖区域虚拟化和星座网络虚拟化。Hashimoto 等^[5]假设地球覆盖基于固定蜂窝状,地表被分割成超级蜂窝(Super Cell),超级蜂窝又划分为若干蜂窝(Cell),超级蜂窝的覆盖数量随纬度增加而减少,距离某超级蜂窝最近的卫星被认为覆盖了该超级蜂窝。覆盖区域虚拟化隐藏了卫星的移动性,无需预先进行路由计算,适应性较强,所需存储空间小,但要求网络拓扑结构非常规则,对星上处理能力要求高,健壮性较差,出现卫星节点失效或链路失效,性能急剧下降。

T·H·Chan 等^[6]将极轨星座模型化为规则的曼哈顿街区网络 MSN,将相邻的几个虚拟节点合并为一个路由区域(Zone)。E·Ekici 等^[7]将整个地球表面按照卫星的轨道平面 P 以及其所在轨道的编号 S 的组合来对卫星进行逻辑编址 $\langle P, S \rangle$,而地球表面的逻辑地址固定不变,最靠近区域的卫星被认为其逻辑地址是对于这个区域的逻辑地址,卫星在运动的过程中改变其逻辑地址为同一轨道内前一个卫星的逻辑地址。星座网络虚拟化算法简单,卫星节点路由决策时间短,解决了极地区和仅向缝区域的路由失效问题,但不能保证区域间路由的最优性,从根本上避免拥塞,仅适用于极轨星座,不适用于倾斜星座。

2.1.3 小结

网络拓扑结构的虚拟化屏蔽了卫星系统拓扑结构的动态变化,卫星网络拓扑结构进行虚拟化为卫星网络路由策略的研究奠定基础。

2.2 路由更新方案

LEO 卫星网络拓扑结构的高度动态变化导致卫星网络中通信链路的连接的中断与重建,不可避免地触发路由更新,另一方面,路由更新可能以数据传输作为触发因素。路由更新将产生额外开销,应尽量减少路由更新的次数同时降低路由更新的开销,针对路由更新的解决方案主要依据路由更新的触发因素进行分类,分为卫星节点切换触发、链路切换触发和数据传输触发。

2.2.1 卫星节点切换触发更新

由于有卫星进入或退出正在通信的路径,需要立刻进行重路由(路径重选)。目前已提出完全重路由、部分重路由和组播重路由 3 种重路由方法。

完全重路由方法完全重新计算通信节点间的优化路由,可以整个路径优化,但通信中断时间长、网络开销大,部分重路由由仅改变局部路径,使得在连接建立的确认阶段建立虚拟组播树,通信中断时间短,但整个路径不一定被优化。组播重路由在切换时使用已建立的路由快速完成重路由,速度快,但网络资源利用率低。

2.2.2 通信链路切换触发更新

卫星在接近极地或反向缝区域时,关闭与邻居轨道卫星间的 ISL,经过这些 ISL 的通信连接需要切换到其它链路,这种切换称为链路切换。链路切换期间容易因网络资源不足而造成通信阻塞,重路由的开销比较大,通信中断时间也比较长(较大的时延抖动),因此必须设法减少因链路切换而导致的重路由概率,这就要求最小化连接切换的次数。Jukan 等^[8]提出通过选择具有更长连接时间的 ISL 来降低切换率。Chen 等^[9]提出在满足 QoS 需求的路径集中选择可以最小化切换并且可能性不次于预定义的最佳可能性的路径。另一方面,Uzunaliolu 等^[10]考虑到因卫星移动而导致的星座与地面节点之间的用户数据链路 UDL 的切换问题,提出概率路由策略 PRP,该策略规定尽量剔除在通信生存期(通信使用已经建立的路由的持续时间)内发生切换的 ISL,在新形成的卫星网络拓扑结构的基础上计算路由,这样得到的路由会减少因链路切换引起的重路由次数。

2.2.3 数据传输触发更新

Kuang 等^[11]提出的 DARTING 算法的思想为在必须传输分组之前尽量推迟路由更新,无数据传输时不进行路由更新,各节点所维持的网络拓扑信息保持不变,数据包的到达将触发路由的更新,更新分为两次进行,一次对数据报的上个节点的拓扑信息进行更新,另一次对数据报要送达的下一个节点的拓扑信息进行更新。Papapetrou 等^[12]依据卫星网络与地面 Ad hoc 网络的相似性,将 Ad hoc 网络的按需路由的思想引入卫星网络路由提出辅助定位按需路由策略 LAOR。每对数据源/目的站点独立调用路径发现进程,在非活动路径上不进行路由更新维护。

2.3 网络负载平衡方案

地表用户密度分布不均,信息传输需求不平衡,这些因素使得网络负载平衡成为 LEO 卫星网络路由策

略需要考虑的重要方面。根据路由策略执行位置将网络负载平衡策略分为基于源节点的负载平衡策略、基于中心节点的负载平衡策略和分布式负载平衡策略。

2.3.1 基于源节点的负载平衡

在基于源节点的负载平衡策略中,路由表的计算在源地面站或入口卫星节点处完成,在地面站计算将导致额外信号开销,在入口卫星节点处计算将超过星上存储与处理能力的限制。Frank^[13]等进一步将基于源节点的负载平衡策略划分为孤立式策略和非孤立式策略 2 种。Chen 等^[9]利用每条路线占用信道的最小和平均数目信息提出选择性适应路由算法。孤立式负载平衡策略比较简单,非孤立式负载平衡策略增加了路由架构的计算与信号的复杂性,但是其优于前者之处在于考虑到了全网流量的适应性。

2.3.2 基于中心节点的负载平衡

基于中心节点的负载平衡策略中,路由表在中心节点(可以为地面节点或卫星节点)进行计算然后存储于卫星节点中。在每个状态中都试图最大化网络的最小剩余容量。Papapetrou 等^[14]提出流量偏移算法旨在找到最小化平均网络延时的路由模式,该算法将路径长度定义为流量依赖的衡量标准,根据路径长度划分不同路径的流量负载,路径长度改变时,流量偏移算法通过将一个路径的流量偏移至另一条路径以保证预定义的开销度量最小,从而持续地适应路径长度的改变。

2.3.3 分布式负载平衡

卫星星座的对称性使得 2 个卫星节点之间可能存在多个最小跳路径,在 2 个节点之间建立静态连接不能实现候选路径的最佳利用,另一方面,面向连接的方法会在卫星节点和链路发生切换时遇到问题。分布式负载平衡策略采用分布式下一跳路由简化问题解决,每颗卫星节点独立地决定分组发送的最佳下一跳。

文献[7]和[15]提出的策略只在卫星节点发生某种程度的拥塞时采取行动,属于被动式负载平衡策略。Korcak 等^[16]提出一种主动式负载平衡策略——基于优先权的适应性路由策略 PAR,该策略以跳数作为路径的衡量度量,在路由算法中融入了最小延时的概念,设置通往目的地的分布式路径,考虑了链路利用率和排队历史信息,使用依赖星间链路历史利用率和缓存信息的优先权机制,实现统一的负载分配。对负载平衡方案的深入分析总结见表 3。

表 3 网络负载平衡方案对比

Tab. 3 Comparing of load balancing scheme

负载平衡策略名称	优点	缺点
基于源节点的负载平衡	孤立	简单 缺乏网络全局考虑 利用率低
	非孤立	考虑网络全局 较好的流量适应性 无法保证流量信息的实时性 高信号开销
基于中心节点的负载平衡	考虑网络全局 整个优化过程中 可以使用整体信息	无法保证流量信息的实时性 较高的信号开销
	将计算复杂性由卫星节点 转移至地面节点	产生可伸缩性问题
分布式负载平衡策略	每个节点使用实时 更新的局部信息	未考虑全局流量负载分布
	低信号开销 不用考虑重路由问题 能够快速应变	利用率低

3 总结与展望

本文在分析 LEO 卫星网络特性的基础上对依据这些特性采取的相关路由策略进行了分类。对于现有路由策略主要从网络拓扑结构、路由更新和负载平衡 3 个方面分析归纳了路由解决方案的特点。

下一代 LEO 卫星通信系统将为地面用户提供高质量的宽带服务,这就要求设计合适的路由策略以保证应用需求,在下一代 LEO 卫星网络中将根据具体需求将小粒度的路由解决方案优化组合,设计满足应用需求的路由策略,以发挥综合效益。

参考文献:

- [1] Alagoz F. Exploring the routing strategies in next – generation satellite networks[J]. IEEE wireless communications, 2007,14(3): 79 – 88.
- [2] Seong Chang Hong. FSA – based link assignment and routing in low – earth orbit satellite networks[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 1998,47(3): 1037 – 1048.
- [3] Gounder V V, Prakash R, Abu – Amara H. Routing in LEO – based satellite networks[C]//Emerging technologies symposium 99. Richardson, TX: IEEE, 1999: 1 – 6.
- [4] Bai J, Lu X, Lu Z, Peng W. Compact explicit multi – path routing for LEO satellite networks[C]//HPSR 05. Hong Kong: IEEE press, 2005: 386 – 390.
- [5] Hashimoto Y. Design of Ip – based routing in a LEO satellite network[C]//The 3rd international workshop on satellite – based information services. Dallas, Texas: ACM/IEEE, 1998:81 – 88.
- [6] Chan T H. A localized routing scheme for LEO satellite networks[C]//ICSSC 03. Yokohama: AIAA, 2003: 2357 – 2364.
- [7] Ekici E. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. IEEE/ACM transactions on networking, 2001,9: 137 – 147.
- [8] Admela Jukan. An approach to QoS – based routing for LEO satellite networks[C]//ICCT 2000. Beijing: IEEE, 2000, 1:922 – 929.
- [9] Chen Jing, J Abbas Amalipour. An adaptive path routing scheme for satellite IP networks[J]. International journal of communication systems, 2003,16(1): 5 – 21.
- [10] Hüseyin Uzunaliolu. A routing algorithm for connection – oriented low earth orbit (LEO) satellite networks with dynamic connectivity[J]. Wireless networks, 2000,6(3): 181 – 190.
- [11] Kuang T, Ma R P. Darting: a cost – effective routing alternative for large space – based dynamic – topology networks[C]//MILCOM 95. San Diego, CA: IEEE press, 1995: 682 – 686.
- [12] Papapetrou E. Distributed on – demand routing for LEO satellite systems[J]. Computer networks, 2007,51(15): 4356 – 4376.
- [13] Laurent Franck, Maral Gerard. Static and adaptive routing in ISL networks from a constellation perspective[J]. International journal of satellite communications, 2002,20: 455 – 475.
- [14] Papapetrou Evangelos. Performance study of adaptive routing algorithms for LEO satellite constellations under self – similar and poisson traffic[J]. Space communications, 2000, 16: 15 – 22.
- [15] Taleb T. ELB: an explicit load balancing routing protocol for multi – hop N GEO satellite constellations [C]//IEEE GLOBE – COM 06. San Francisco, CA:IEEE press, 2007: 1 – 5.
- [16] Omer Korcak. Priority – based adaptive routing in N GEO satellite networks[J]. International journal of communication systems, 2007,20: 313 – 333.

(编辑:徐楠楠)

Analysis of routing strategies in next – generation LEO satellite networks

LUO Xue – shan¹, LI Jian – jie^{1,2}, YI Xian – qing¹, TANG Shu¹

(1. School Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Department of High Altitude Military Medicine, Third Military Medical University, Chongqing 400038, China)

Abstract: Studying effective routing strategies has become a critical issue in construction of LEO satellite networks because satellite network resources are very limited and maintenance costs are very great. Firstly, features of LEO satellite networks distinct from terrestrial networks are summed up according to their effects on routing issues. Subsequently, a survey of various routing strategies paying particular attention to these problems from aspects of topology, routing refreshment and load balancing is provided. By analyzing the characteristic of routing schemes in their various aspects, a foundation of designing more effective routing strategies to meet the needs of future applications is laid.

Key words: LEO satellite networks; routing strategies; network topology; routing refreshment; load balancing