

卫星移动通信网络切换算法的研究

叶晓国 肖 甫 孙力娟 王汝传

(南京邮电大学计算机学院 南京 210003)

摘 要 低轨卫星移动通信网络在实现全球移动通信方面具有很大优势。切换方案对于控制低轨卫星网络通信时延,提高卫星网络服务质量和链路带宽资源利用率具有重要意义。深入分析了星地链路切换和重计算路由问题,提出了一种低轨移动通信卫星链路切换算法。仿真实验表明,提出的卫星链路切换算法有较小的端到端时延、较好的稳定性和可定制性。

关键词 卫星网络,卫星切换,重路由,星间链路

中图法分类号 TN927 **文献标识码** A

Research on Handover Algorithm of Satellite Mobile Communication Network

YE Xiao-guo XIAO Fu SUN Li-juan WANG Ru-chuan

(College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract Low earth orbit(LEO) satellite network has a great advantage for global mobile communications. Handover scheme is very important to control end-to-end communication delay and improve quality of service and utilization of LEO satellite network link. Ground-satellite link handover and recomputing routes problems were analysed in detail. Then, a link handover algorithm for LEO satellite mobile communication network was proposed. Simulation results show that the satellite link handover algorithm proposed has less end-to-end delay, and is stabler and more customizable.

Keywords Satellite network, Satellite handover, Rerouting, Inter-satellite link

1 引言

低轨卫星移动通信网络传输时延低,星间链路组网可实现无缝的全球移动通信,正成为下一代移动通信系统的重要组成部分。低轨卫星的切换方案研究是一个重要的研究课题^[1,2]。

低轨卫星星座中,单颗卫星覆盖面积较小、星地链路持续通信时间较短,如 Iridium 系统,单颗卫星对地面某个用户的最大持续服务时间仅为 10min,从端到端来看,卫星网络链路两端的两颗接入卫星大约每隔 4~5min 要切换一次。

低轨通信卫星的高速轨道运行,引起卫星通信网络地星接入点卫星的频繁变换,导致原有星地链路(ground-satellite link)失效。此时需要用户地面终端及时切换到另一颗卫星,重新建立连接,并按照一定的算法,重新计算卫星通信网络的拓扑和路由,然后,在新建立的星地链路和星间路由上,继续被中断连接。对于轨间越缝星间链路(interplane crossseam intersatellite link),则需要做更频繁的切换处理^[3,4]。

切换方案的基本功能为,在星地链路需要切换时,重新选择地星接入点卫星,重新计算卫星通信网络拓扑,重新计算路由,实现星地链路和星间路由的重构,迅速恢复暂时中断的通信。切换方案的关键问题是,减少切换过程的影响,保证新建切换链路满足一定的带宽和时延等服务质量(QoS)要求,提高卫星通信网络资源利用率。

目前,低轨卫星切换技术已有较多研究,文献[5,6]着重研究低轨卫星移动通信网络中点波束切换和动态信道分配问题。文献[7]提出了一种低轨卫星的切换管理方案,文献[8]提出了卫星星座设计问题,文献[9]提出了针对冗余覆盖的极地星座优化设计方案。

卫星通信网络中,切换与路由是一个有机整体,应该将卫星链路切换和重路由计算结合起来,进行优化设计,以充分利用低轨卫星星座本身的特性。本文着重考虑低轨卫星的运行所引起的链路切换过程中的关键问题,克服切换过程的影响,实现卫星链路切换过程的优化,然后,结合重新计算路由算法,提高卫星移动通信网络的性能。

到稿日期:2008-10-27 返修日期:2008-12-30 本文受国家自然科学基金(60573141 和 60773041),国家高科技 863 项目(2006AA01Z201, 2006AA01Z219, 2007AA701301, 2007AA701302),江苏省高技术研究计划(BG2006001),现代通信国家重点实验室基金(9140C1105040805),江苏省高校自然科学研究计划(07KJB520083),江苏省博士后基金(0801019C)和南京邮电大学引进人才基金项目(TZ206012)资助。

叶晓国(1975—),男,博士,讲师,主要研究方向为高性能网络体系结构及协议等, E-mail: xgye@njupt.edu.cn; 肖 甫(1980—),男,博士,讲师,主要研究方向为卫星通信网络、无线自组织网络、多媒体技术等; 孙力娟(1963—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为演化计算、计算机网络; 王汝传(1943—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机软件、计算机网络和信息安全。

2 低轨卫星星座分析

为了在低轨卫星星座中实现全球无缝覆盖,通常基于多重覆盖的思想,设计良好覆盖性能的星座。低轨卫星构成的全球性星座分为两种类型,即极轨道星座(或优化极轨道星座)和玫瑰星座(Walker 倾斜轨道星座)^[8]。极轨道星座,如 Iridium 星座系统,其星座图如图 1 所示。

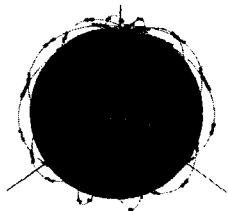


图 1 低轨卫星星座图

极轨道用于设计全球覆盖或者极冠地区覆盖的星座。某时刻的极轨低轨卫星星座多重覆盖平面投影示意图如图 2 所示。

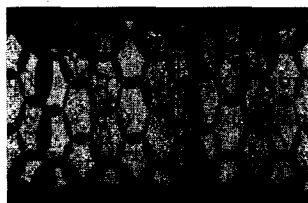


图 2 低轨卫星星座多重覆盖示意图

从图 1,图 2 中可以看出,通过设计良好的卫星星座,可以达到全球覆盖能力。

早在 1961 年,R. D. Luder 提出了用极轨道卫星进行星座设计,但没有考虑卫星之间的相位关系。其他学者在进行深入研究之后,提出了优化极轨道星座。按照优化极轨道星座,Iridium 星座由 66 颗高度为 780km 的低轨卫星组成,分布在 6 个倾角为 86.4° 的轨道平面内,每个轨道平面内均匀地分布 11 颗卫星。除第 1 和第 6 轨道平面间的升节点经度差为 22.0° 外,其余相邻轨道平面间的升节点经度差均为 31.6° 。相邻轨道的相邻卫星间的相差值为 16.36° 。最小覆盖仰角为 8.2° 。有些文献提出类 Iridium 星座仿真,通过增加卫星高度,达到增大卫星多重覆盖重叠度,为具有多个可接入卫星情形下,研究卫星切换策略问题提出了较好的思路^[10]。

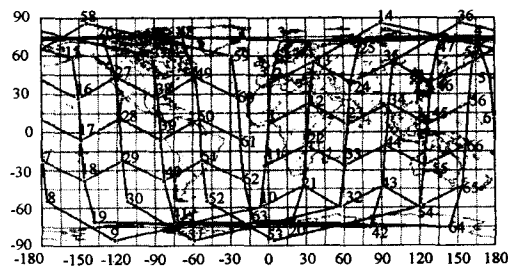


图 3 Iridium 星座的星间链路示意图

在 Iridium 星座中,每颗卫星有 4 条星间链路,前后左右各一条。但是,1 和 6 轨道的相邻卫星之间相对运动速度太快,很难建立星间链路,这些卫星只有 3 条星间链路,从而在 1 和 6 轨道间存在着一条缝隙(seam)。另外,极轨道星座由

于在两极附近区域的卫星过于密集,因此常常关闭一些轨间星间链路,如,当卫星的星下点纬度大于 60° ,或相邻卫星的经度差小于 10° 时,关闭轨间星间链路。以 Iridium 星座为例,某时刻低轨卫星星座的星间链路示意图如图 3 所示。

极地俯视低轨卫星星座的星间链路示意图如图 4 所示。

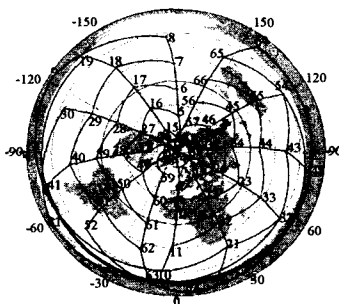


图 4 极地俯视的星间链路示意图

从图中,可以更清晰地分析极轨道低轨卫星星座的星间链路连接状况。

3 卫星链路切换算法

卫星轨道运行或用户终端移动,必然引起星地链路切换。在对卫星运行规律进行分析的基础上,提出了一种卫星链路切换算法,包括星地链路切换算法和重新计算路由算法。

3.1 星地链路切换算法

星地链路切换算法的基本思想是,地面站/卫星移动通信终端,周期性地进行检查,检查星地链路的仰角是否小于指定的最小仰角,通常周期设定为 10s。如果发现地星仰角低于最小仰角(通常设定为 8.2°),或接收信号减弱到某个最小值以下时,开始进行星地链路切换。地面站在进行星地链路切换时,首先判断同轨“下一颗”卫星(用 next_标识)仰角是否满足可接入条件。如果“下一颗”卫星大于最小仰角,则将其作为切换接入卫星。若“下一颗”卫星仰角不满足可接入条件,则在其它卫星中找出地星仰角最大的那颗卫星作为切换接入点。然后,进行卫星网络拓扑更新,重新计算路由。星地链路切换算法的描述如算法 1 所示。

算法 1 星地链路切换算法

```

1 Algorithm GSL_Handover()
2 { found 标志置为 false; // 用于表示是否找到切换接入卫星
3   for 地面站结点 node 连接到低轨卫星星座的星间链路 sl do
4     得到链路 sl 另一端的卫星 peer;
5     if 地面站 node 与卫星 peer 之间的链路仰角不大于最小仰角
6       撤销 node 与 peer 之间的链路;
7       置链路状态改变标志为 true; // 链路状态改变标志初始
8 值为 false
9     endif
10    if node 与 peer 之间的链路被撤销
11      if ((handover_optimization_next_为 true) // 若 next 切
12        换
13        and (node 与 next 间的仰角大于最小仰角))
14        置 found 标志为 true;
15        将 next 赋值给 peer; // 令 peer 指针指向 next
16      endif
17      if found 标志为 false // next 卫星不满足仰角要求

```

```

18     从其余卫星中找到地星仰角最大的卫星 peer;
19     置 found 标志为 true;
20   endif
21   if found 标志为 true // 找到切换接入卫星
22     建立 node 与 peer 之间的星间链路;
23     配置并启动链路接口的协议栈;
24     置链路状态改变标志为 true;
25   endif
26 endif
27 endfor
28 if 重新计算路由标志 recompute_choice 为 true
29   // 星地链路切换检查时,总是重新计算路由,
30   // 便于时延为代价情形下链路状态的及时更新
31   重新计算路由;
32 else if 链路状态改变标志为 true
33   重新计算路由; // 若发生星地链路切换,则重新计算路由
34 endif
    为下次星地链路切换检查启动定时器;
}

```

3.2 重新计算路由算法

重新计算路由算法基本思想是,重新计算卫星星座网络中各链路的代价,更新拓扑状态信息,进行路由计算,最后,更新路由表。重新计算路由的算法如算法 2 所示。

算法 2 重新计算路由算法

```

1 Algorithm Recomp_Route(algorithm_choice)
2 { // 进行拓扑更新计算
3   for 每个卫星结点 node do
4     for 每条与 node 相连的链路 sl do
5       if 链路 sl 的状态为 UP
6         // 计算链路传输带宽
7         // slp->mac()->bandwidth()
8         bandwidth = get_bandwidth(node_tx,node_rx);
9         链路 sl 的两端结点分别为 node_tx,node_rx;
10        if flag_m_delay 为 true // 以时延尺度标志为 true
11          //计算链路传播时延
12          delay = prop_delay(node_tx,node_rx);
13        else
14          delay = 1;
15        endif
16        if algorithm_choice == 0 // 时延
17          cost = delay;
18        else if algorithm_choice() == 1 // 带宽
19          cost = 1/ bandwidth;
20        endif
21        更新链路 sl 的代价 cost;
22      endif
23    endfor
24  endfor
25  // 重新计算路由
26  compute_routes();
27  // 更新路由表
28  update_rt_tables();
29 }

```

4 仿真实验

4.1 仿真环境

对网络仿真器 NS-2^[11] 的卫星网络仿真模块进行了扩展,对本文提出的星地链路切换算法和重新计算路由算法进行了仿真实验。仿真环境包括 66 颗低轨卫星的铱星星座和若干个卫星移动通信终端/地面站。卫星通信双方分别位于北京(E116. 39°, N39. 91°)、纽约 New York(W73. 94°, N40. 67°)。卫星轨道高度为 780km,轨道倾角 86. 4°,6 个轨道平面相对相差为 16. 36°,最小覆盖仰角为 8. 2°。我们设定,位于北京的发送端 T0 向位于纽约的接收端 T1 发送 CBR/UDP 流量,分组大小为 500 字节,分组间隔 5s。仿真时长 86400s,即 24h。着重分析切换算法的端到端平均延时、时延抖动、切换频次等性能特性。

4.2 仿真结果及分析

仿真得到地面站结点 T0 与地面站结点 T1 之间的 CBR 流量的时延性能。当采用跳数作为重新计算路由的尺度时,得到有切换优化和无切换优化策略下的时延性能分别如图 5、图 6 所示。

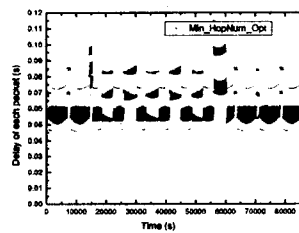


图 5 跳数最少、切换优化下的时延性能

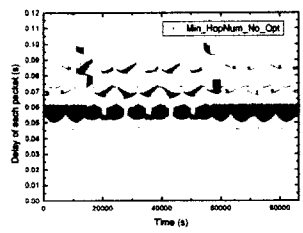


图 6 跳数最少、无切换优化下的时延性能

仿真结果表明,当采用跳数作为重新计算路由的尺度时,采用切换优化策略的总平均时延为 0.06235,略大于无切换优化策略的平均时延。其时延抖动略大于无切换优化策略的情形。采用切换优化策略的星地链路切换和星间链路切换的次数低于无切换优化策略。这是因为,卫星移动通信终端的移动速度,相对卫星高速轨道运行来说,可以忽略不计。因此,在当前接入卫星飞离后,一般由同一轨道平面内的下一颗卫星接替其完成通信任务。当星地链路仰角不满足最小仰角要求时,采用“下一颗”卫星的切换优化策略,能大大降低星地链路和星间链路切换次数。链路切换次数和地面站 T0、T1 之间的平均时延性能如表 1 所列。

表 1 跳数最少切换策略下的性能

	切换次数		平均时延 (s)	时延抖动/ 方差
	星地链路	星间链路		
切换优化情形	327	2576	0.06235	0.01170
无切换优化情形	429	3155	0.06208	0.01119

当采用时延作为重新计算路由的尺度时,采用切换优化策略或无切换优化策略下的时延性能分别如图 7、图 8 所示。

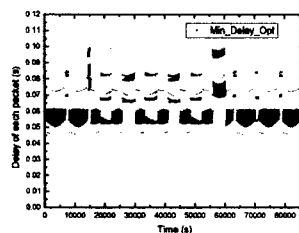


图 7 时延最小、切换优化下的时延性能

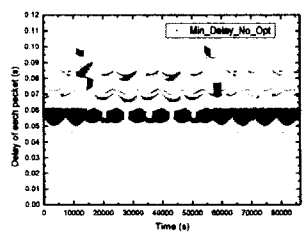


图 8 时延最小、无切换优化下的时延性能

仿真结果表明,采用时延作为重新计算路由的尺度时,采用切换优化策略下的时延大于无切换优化策略下的时延。这是因为,切换优化以减少切换次数为目标,而无切换优化的情形下,切换时,总是以最大仰角的星地链路的卫星为接入卫星,因此,无切换优化的情形下的总平均时延为 0.06193s,优于有切换优化的情形下的时延 0.06218s。

采用时延作为重新计算路由的尺度时,链路切换次数和时延性能如表 2 所列。

表 2 时延最小切换策略下的性能

	切换次数		平均时延 (s)	时延抖动/ 方差
	星地链路	星间链路		
切换优化情形	327	2576	0.06218	0.01152
无切换优化情形	429	3155	0.06193	0.01102

采用时延作为重新计算路由的尺度时,有切换优化和无切换优化的时延性能均优于跳数最少切换策略下,这两种情形的性能。这是因为在无切换优化策略下,切换时,以仰角最大的卫星为接入卫星,客观上是选择离终端最近的卫星。同时,又以时延为重新计算路由时的代价尺度,在此情形下可以达到时延最小的目标。另一方面,星地链路、星间链路的切换次数与跳数最小时的切换次数相当。而且,以时延为重路由尺度时,采用切换优化时的切换次数也小于无切换优化策略的情形。

仿真实验还表明,该算法具有较好的可定制特性,通过配置切换优化参数、算法策略选择参数,能够方便地实现不同策略的配置,以便对跳数最少策略、传播时延最小策略以及单分组传输时延最小策略(即大带宽链路优先选择)、“下一颗”卫星切换优化策略等进行灵活配置和仿真分析比较。

结束语 本文对低轨移动通信卫星星座进行了深入分析,研究了移动卫星通信网络中的切换问题,提出了低轨移动卫星切换方案,包括星地链路切换算法和重新计算路由算法。仿真实验表明,时延最小策略下的无切换优化策略具有最优的时延性能。而从减少切换次数的角度考虑,可采用切换优

化策略。仿真实验还表明,本文提出的链路切换算法具有良好的可定制性和灵活性。

参考文献

- [1] Deler A, Pierucci L. Next-generation mobile satellite networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(9): 150-159
- [2] Zahariadis T, Vaxevanakis K G, Tsantilas C P, et al. Global roaming in next-generation networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002(2): 145-151
- [3] Gkizeli M, Tafazolli R, Evans B. Performance analysis of handover mechanisms for non-geo satellite diversity based Systems[C]//IEEE GLOBECOM'01. 2001: 2744-2748
- [4] Bottcher A, Werner B. Strategies for handover control in low earth orbit satellite systems[C]// Vehicular Technology Conference, 1994 IEEE 44th. 1994: 1616-1620
- [5] Cho S, Akyildiz I F, Bender M D, et al. A new spotbeam handover management technique for LEO satellite networks[C]//IEEE GLOBECOM '00. 2000: 1156-1160
- [6] Cho S. Adaptive dynamic channel allocation scheme for spot-beam handover in LEO satellite networks[C]//IEEE VTS-Fall VTC 2000. 52nd. 2000: 1925-1929
- [7] Nguyen H N, Lepaja S. Handover management in low earth orbit satellite IP networks[C]//IEEE GLOBECOM '01. 2001: 2730-2734
- [8] Walker J G. Satellite constellations[J]. J British Interplanetary Soc, 1984, 37: 559-571
- [9] Rider L. Optimized polar constellation for redundant earth coverage[J]. Journal of the Astronautical Sciences, 1985, 33(2): 147-161
- [10] 刘刚, 苟定勇, 吴诗其. 低轨卫星星座网的切换研究[J]. 通信学报, 2004, 25(4): 151-159
- [11] McCanne S, Floyd S. The LBNL network simulator, ns-2[OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>. 1997-10-01/ 2007-05-18

(上接第 45 页)

- [2] Tanachaiwiwat S, Dave P, Bhindwale R, et al. Secure locations: routing on trust and isolating compromised sensors in location-aware sensor networks[C]// Proceedings of the SenSys 2003. New York: ACM Press, 2003: 24-32
- [3] Cheng W F, Liao X K, Shen C X, et al. A trust-based routing framework in energy-constrained wireless sensor networks[C]//Cheng X Z, Li W, Znati T. eds. Proc. of the WASA 2006. LNCS 4138. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006: 478-489
- [4] Tanachaiwiwat S, Dave P, Bhindwale R, et al. Location-Centric isolation of misbehavior and trust routing in energy-constrained sensor networks[C]//Hassanein H, Olive R L, Richard III G G, et al., eds. Proc. of the IEEE Workshop on Energy-Efficient Wireless Communications and Networks (EWCN). Piscataway: IEEE Computer Society, 2004: 463-469
- [5] Srinivasan A, Teitelbaum J, Wu J. Distributed Reputation-based Beacon Trust System[C]// Proceedings of 2nd IEEE International Symposium on Dependable, Autonomic and Secure Computing. 2006: 277-283

- [6] Josang A, Ismail R, Boyd C. A Survey of Trust and Reputation Systems for Online Service Provision[J]. Decision Support Systems, March 2007: 618-644
- [7] Wagner D. Resilient Aggregation in Sensor Networks[C]//Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Security of Ad hoc and Sensor Networks. Washington DC, 2004: 78-87
- [8] Krasniewski MD, Varadharajan P, Rabeler B, et al. Trust index based fault tolerance for ability data faults in sensor[C]//Werner B, ed. Proc. of the Int'l Conf. on Dependable Systems and Networks (DSN). Piscataway: IEEE Computer Society, 2005: 672-681
- [9] Hur J, Lee Y, Hong S M, et al. Trust management for resilient wireless sensor networks[C]//Won D H, Kim S J, eds. Proc. of the ICISC 2005. LNCS 3935. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006: 56-68
- [11] Hur J, Lee Y, Yoon H, et al. Trust evaluation model for wireless sensor networks[C]//Proc. of the ICACT 2005. Piscataway: IEEE Computer Society, 2005: 491-496