

适用于我国天基网络的 GEO/LEO 双层星座的设计与仿真分析^①

张景斌^{②**} 刘 炯^{③*} 康连瑞* 田相轩*

(* 西安通信学院 西安 710106)

(** 73132 部队 漳州 363111)

摘 要 为避免同步地球轨道(GEO)卫星网络的传播时延大、实时业务传输保障能力有限的问题,研究了双层卫星网络的设计。考虑到 GEO 卫星相对地面位置固定,低地球轨道(LEO)卫星功率损耗较低,传输时延较短,根据我国地理位置及未来天基网络建设需要,设计了一种简捷高效的 GEO/LEO 双层卫星星座网络结构。该结构按“弱连接”理论,使 LEO 卫星与通信质量最优的一颗 GEO 卫星建立链路,以保证通信质量的最优化;采用“骨干/接入”模型,使 GEO 层卫星构成骨干网,LEO 层卫星构成接入网,以克服设计的高难度。仿真结果表明,GEO/LEO 双层卫星网络在覆盖特性和星际链路几何特性上更具优势,满足我国未来天基网络建设要求。

关键词 卫星网络,体系设计,STK 仿真

0 引 言

随着卫星网络进入以业务多样化、骨干传输可靠化、覆盖全球化为特征的天基综合信息网络时代^[1],我国现已构建了以同步地球轨道(geosynchronous earth orbit, GEO)卫星为主的卫星通信网络。但 GEO 卫星网络主要存在传播时延大、实时业务传输保障能力有限等问题,难以满足未来天基网络设计需求。随着星间链路(inter satellite link, ISL)和层间链路(inter orbit link, IOL)技术在新型卫星上的应用,立体化多层化卫星网络逐渐成为研究的热点。立体化多层卫星网络具有不同轨道(如低地球轨道(low earth orbit, LEO)、中地球轨道(medium earth orbit, MEO)和高椭圆轨道(highly elliptical orbit, HEO)等)、卫星优势互补、组网灵活及多功能融合等优势,因而是未来天基网络的一种理想组网方式。

多层卫星网络按照分层体系结构可分为:双层卫星网络和三层卫星网络。双层卫星网络有 GEO/LEO、MEO/LEO 和 GEO/MEO 网络等;三层卫星网络有 GEO/MEO/LEO、GEO/HEO/LEO 网络等。三

层卫星网络卫星之间互联关系复杂,星间链路切换频繁,建设成本较高。再看双层卫星网络。MEO/LEO 双层卫星网络层间卫星相对高速运动,可视角变化频繁,受天线对准及跟踪技术限制层间信息传输困难、开销较大,且由于引入大量 MEO 卫星增加了设计难度和建设成本^[2];GEO/MEO 双层卫星网络因 MEO 卫星轨道高度相对较高,星地信息传输时延较长,难以承载实时业务。相比而言,GEO/LEO 双层卫星网络其 GEO 卫星相对地面位置固定,LEO 卫星功率损耗较低,传输时延较短,层间信息传输简捷高效,因而具有星间链路的 GEO/LEO 双层卫星网络较为符合我国未来天基网络建设需求^[3]。因此,本项目结合我国地理位置及未来天基网络建设需求^[3],设计了一种 GEO/LEO 双层卫星网络体系结构,并对其覆盖特性和星际链路特性进行分析。

1 GEO/LEO 双层星座网络结构设计

1.1 GEO/LEO 双层星座网络体系架构

为了克服多层卫星网络中互联关系复杂、设计难度高等问题,本设计采用“骨干/接入”模型^[4],即 GEO 层卫星构成骨干网,LEO 层卫星构成接入网。

① 陕西省科学技术研究发展计划(2013JM8007)和全军军事学研究生课题(2011JY002-253)资助项目。

② 男,1985 年生,硕士,讲师;研究方向:卫星网络协议;E-mail: zhangjingbin198534@163.com

③ 通讯作者,E-mail: liujiong03@mails.tsinghua.edu.cn

(收稿日期:2014-05-25)

GEO/LEO 双层星座网络体系架构由 GEO 层星座、LEO 层星座、地面系统以及各类星际链路组成,如图 1 所示。其中 GEO 层卫星承担网络路由计算、运行状态监控、LEO 卫星负载过重时分担部分低时延业务、临时替代失效的 LEO 卫星等任务;采用多波束星下天线,可实现对中低纬度区域全覆盖。LEO 层卫星承担用户接入、信息传输与交换、网络链路状态信息收集等任务,为提高网络抗毁性以及信息传输交换能力,采用具有星间链路的卫星。地面系统主要包括地面控制中心、地面网关和终端用户。

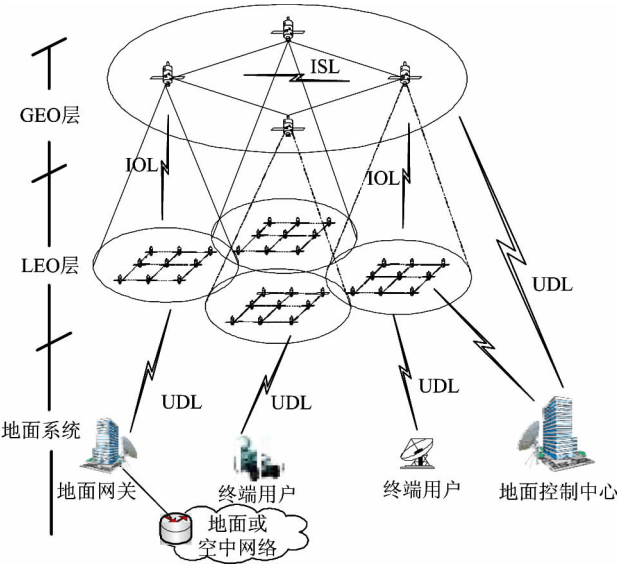


图 1 GEO/LEO 双层卫星网络体系架构

该体系架构中具有三种全双工通信链路:同层卫星之间的星间链路 (ISL),分为轨间 ISL、轨内 ISL;不同层卫星之间的层间链路 (IOL);地面系统与卫星之间的用户数据链路 (user data link, UDL)。

为降低星间链路中冗余度过大等问题,层间链路采用“弱连接”思想^[5],即某一时刻,每颗 LEO 卫星只与覆盖其 GEO 卫星中通信质量最优的一颗建立连接关系。

1.2 GEO/LEO 双层星座网络设计

卫星网络一旦投入运营,后期维护、轨道调整难度较大,因此,发射前需合理设计星座参数。下面结合我国地理位置及未来天基网络建设需求设计 GEO/LEO 双层星座网络。

1.2.1 轨道类型

非静止轨道分为圆轨道和椭圆轨道,其中椭圆轨道为使卫星远地点在扰动条件下保持固定不变,倾角必须为 63.14°,这不利于中低纬度区域覆

盖^[6]。我国国土位于北纬 4°与 54°之间,国家战略拓展区域亦均处于中低纬度,因此,LEO 星座应采用圆轨道卫星。

圆轨道星座又分为类极轨道星座和倾斜轨道星座,从已投入运营的星座运行状态来看,类极轨道星座具有良好的全球覆盖能力,同层卫星之间能够建立稳定的轨内、轨间的星间链接 (ISL),而倾斜轨道星座存在覆盖盲区,层内卫星之间仅能建立稳定的轨内 ISL,轨间 ISL 切换较为频繁。从维护星间链路及空中组网角度来看,类极轨道星座大多数相邻轨道面上的卫星沿同方向飞行,星际链路建立与维护相对容易。综上所述,LEO 层星座采用类极轨道较优。

1.2.2 轨道高度及运行周期

星座轨道高度设计时,应考虑以下两方面因素^[5]:

(1)大气层以及范·艾伦带的影响。若卫星处于大气层内,氧原子将腐蚀星体材料,降低卫星使用寿命,大气阻尼和扰动影响卫星正常工作;范·艾伦带分为内外两层,高度分别为 1500~5000km 和 13000~20000km,表现为强电磁辐射,对卫星通信干扰较大。LEO 卫星轨道高度应选择在 500~1500km。

(2)卫星定位及控制管理。为降低卫星运行中的定位控制难度,LEO 卫星采用回归轨道,其运行周期与 GEO 卫星运行周期的关系为

TL = TG · k / n (1)

式中:TL 为 LEO 卫星运行周期;TG = 86164s,为 GEO 卫星运行周期,即地球自转周期;k、n 均为正整数,为便于星座控制与管理,一般取 k = 1。

依据开普勒第三定律可知,卫星轨道高度 h 与卫星运行周期 T 的关系为

h = T^2/3 * (G * M)^1/3 / (2π)^2/3 - RE (2)

式中:G 为万有引力常数,M 为地球质量,RE 为地球半径,T 为卫星运行周期。

由式(1)、(2)及大气、范·艾伦带对 LEO 卫星的限制可知,当 k = 1 时,n 与 LEO 卫星运行轨道高度、运行周期关系如表 1 所示。

表 1 n 与 LEO 卫星轨道高度、运行周期的关系

	n = 12	n = 13	n = 14	n = 15
运行周期 T(s)	7180	6628	6155	5744
运行高度 h(km)	1666	1248	880	554

卫星轨道越高,其覆盖面积越大,单个轨道面卫星数量越少,链路通信时间越长。因此,为降低未来天基网络建设成本、延长链路通信时间,LEO 卫星根据表 1 选取 $n = 13$, $T_L = 6628\text{s}$, $h = 1248\text{km}$ 。

1.2.3 GEO 层星座设计

圆轨道卫星与地面站几何关系如图 2 所示。

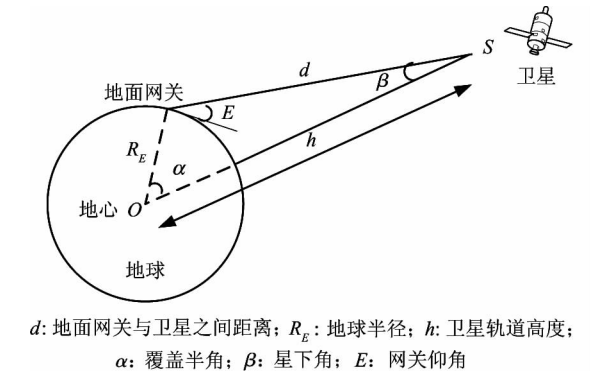


图 2 卫星与地面网关间的几何关系

由余弦定理和正弦定理可得：

$$\begin{cases} (R_E + h)^2 = d^2 + R_E^2 - 2d \cdot R_E \cdot \cos(90^\circ + E) \\ (R_E + h) / \sin(90^\circ + E) = R_E / \sin(90^\circ - \alpha - E) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可得卫星与地面站距离 d 、覆盖半角 α 为

$$\begin{cases} d = \sqrt{h^2 + 2R_E \cdot h + R_E^2 \sin^2 E} - R_E \cdot \sin E \\ \alpha = \arccos\left(\frac{R_E}{R_E + h} \cdot \cos E\right) - E \end{cases} \quad (4)$$

在实际应用中,GEO 卫星要求地面网关仰角不小于 5° ,即 $E_{\min} = 5^\circ$,其轨道高度为 35786km ,代入式(4),可得最小覆盖半角 $\alpha = 76.34^\circ$,因此 GEO 层要达到赤道地区全球覆盖所需 $N_c = \lceil 360^\circ / (2\alpha) \rceil = 3$ 颗。结合我国实际地理位置(位于东经 $73^\circ \sim 135^\circ$)以及 GEO 层在整个卫星网络中担负的重要作用,考虑到天基网络抗毁性能,设计了一种“4 + 1”星座模型,即 GEO 层星座由 5 颗卫星构成(其中 1 颗备用,当我国上空 GEO 卫星失效或者战时启用)。所设计的 GEO 层星座参数如表 2 所示。

表 2 GEO 层星座轨道参数

卫星	轨道高度 (km)	轨道倾角 ($^\circ$)	卫星 数量	升交点经度 ($^\circ$)
GEO	35786	0	4 + 1	10, 100, 190, 280 (备用:110)

1.2.4 LEO 层星座设计

LEO 层作为接入层,具有用户接入、数据转发、链路状态收集等功能,需要对全球无缝覆盖。基于卫星覆盖带^[7,8]设计,极轨道星座中同向面轨道和反向轨道面之间的经度差 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 满足

$$\Delta 1 = \alpha + c; \quad \Delta 2 = 2c \quad (5)$$

式中: $c = \arccos\left[\frac{\cos \alpha}{\cos(\pi/S)}\right]$ 为覆盖带半角宽度; S 为轨道内卫星数量; α 为地心覆盖半角。

为避免 LEO 卫星在极点碰撞,采用类极轨星座,即轨道倾角在 80° 与 100° 之间,参数调整^[7]为

$$\begin{cases} \Delta'_1 = \arcsin(\sin \Delta_1 / \sin i) \\ \Delta'_2 = \arccos\left(\frac{\cos \Delta 2 - \cos^2 i}{\sin^2 i}\right) \\ (n - 1)\Delta'_1 + \Delta'_2 = \pi \\ \Delta \gamma = \pi/S - \arctan[\cos(i) \cdot \tan(\Delta'_1)] \end{cases} \quad (6)$$

式中 n 为轨道面数,设置轨道倾角 $i = 86.4^\circ$,LEO 地面网关最小仰角为 10° ,轨道高度为 1248km 。由式(4)可知 $\alpha = 24.55^\circ$,由式(6)可得,构建不同轨道面数星座所需的卫星数量如表 3 所示。

表 3 不同轨道面数星座所需卫星数量

轨道面数	单轨卫星数 S	覆盖带半角 c ($^\circ$)	卫星总数
5	10	16.98	5 * 10
5	9	14.54	5 * 9
6	8	10.09	6 * 8

由表 3 可知,在设计轨道高度与倾角条件下实现全球覆盖至少需要 45 颗卫星。利用 STK 仿真软件对轨道参数进行仿真优化,结果如表 4 所示。

表 4 LEO 星座轨道参数优化

轨道参数	同向轨道 间隔	反向轨道 间隔	相邻轨道 卫星相位差	初始 RAAN
理论值	37.72	29.14	20	0
优化值	38	28	20	180E

1.2.5 GEO/LEO 双层卫星星座参数设计

结合 GEO 层、LEO 层卫星星座,设计了一种 GEO/LEO 双层网络,参数如表 5 所示。

表 5 GEO/LEO 星座模型参数

	轨道高度 (km)	运行周期 (s)	卫星数量	轨道倾角 ($^\circ$)
LEO	1248	6628	5 * 9	86.4
GEO	35786	86164	4 + 1	0

2 GEO/LEO 双层星座性能分析

使用 STK 仿真软件构建了本文提出的 GEO/LEO 双层星座网络,并对其覆盖特性、链路几何特性进行了仿真与性能分析。STK 仿真软件操作界面如图 3 所示。

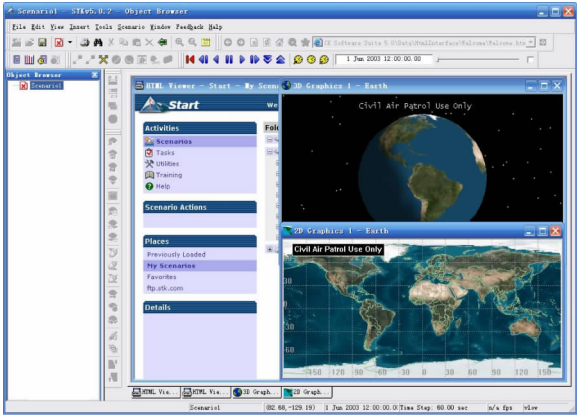


图 3 STK 仿真软件操作界面

2.1 覆盖特性仿真分析

分别对 GEO 星座、LEO 星座、GEO/LEO 双层星座覆盖性能进行了仿真,仿真结果如图 4 至图 6 所示。

(1)GEO 星座对地覆盖特性

由图 4 可知,GEO 星座可对我国疆域及地球南北纬 75°之间区域实现完全覆盖。其中,GEO-2、备用 GEO-5 卫星可对我国疆域及周边地区实现 24 小时全域覆盖,GEO-1、GEO-3 卫星对我国疆域覆盖,覆盖率分别为 27.12% 和 40.17%。

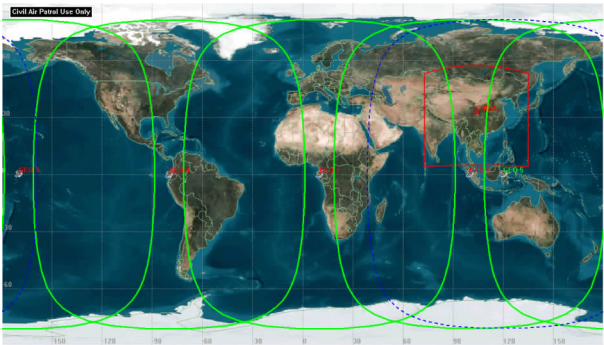


图 4 GEO 星座覆盖情况

(2)LEO 星座对地覆盖特性

由图 5 可知,LEO 星座可对我国疆域及地球实

现 24 小时完全不间断覆盖。

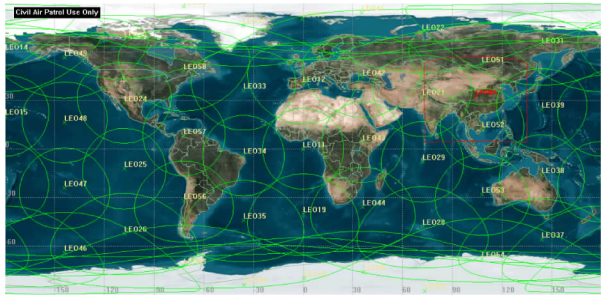


图 5 LEO 星座覆盖情况

(3)GEO/LEO 双层星座对地覆盖特性

由图 6 可知,GEO/LEO 双层星座可对我国疆域及全球实现 24 小时完全不间断覆盖。

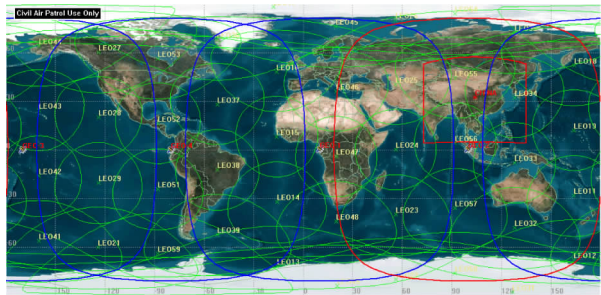


图 6 GEO/LEO 星座覆盖情况

(4)GEO 星座对 LEO 星座覆盖特性

图 7 为 GEO-2 卫星对 LEO 层卫星覆盖情况。由图可知,在任意时刻,单颗 GEO 卫星可覆盖 21 ~ 25 颗 LEO 卫星。



图 7 GEO-2 卫星覆盖 LEO 层卫星数量

综上所述,本文所设计的 GEO/LEO 双层星座可对我国疆域及地球南北纬 75°之间区域实现 24 小时完全不间断覆盖,具有良好的覆盖性能,满足我国未来天基网络建设需求。

2.2 链路特性分析

方位角、俯仰角、链路长度是判断链路质量的重要指标^[9]。下面分别对双层星座中三种星际链路进行仿真与性能分析。

2.2.1 IOL 性能分析

图 8 为 GEO-2 与 LEO 层卫星建立层间链路(IOL)时间的仿真结果,图 9 为 GEO-2 卫星与 LEO-11 卫星建立 IOL 的仰角、方位角以及链路长度的仿真结果。

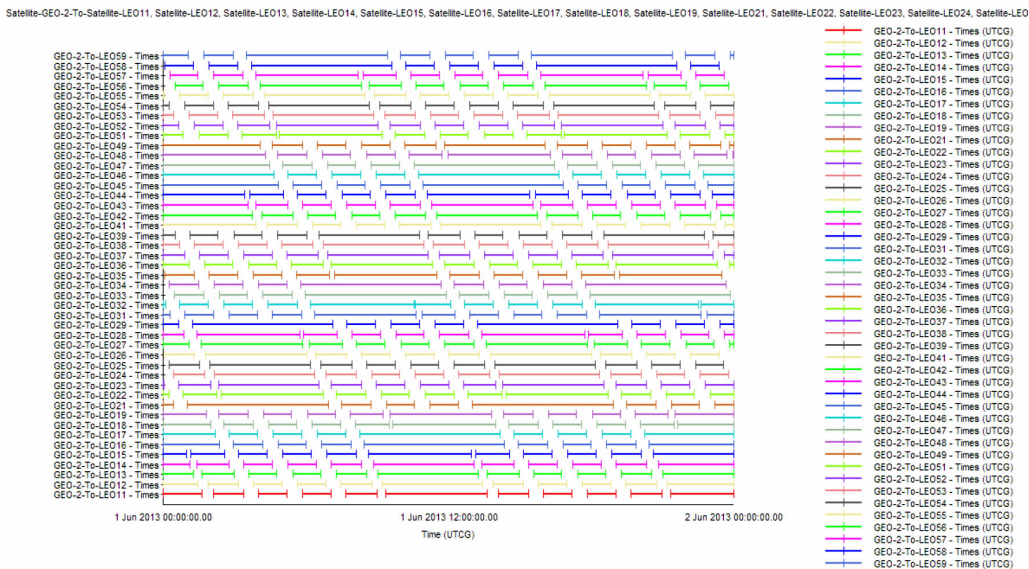


图 8 GEO-2 卫星与 LEO 层卫星建立 IOL 的时间

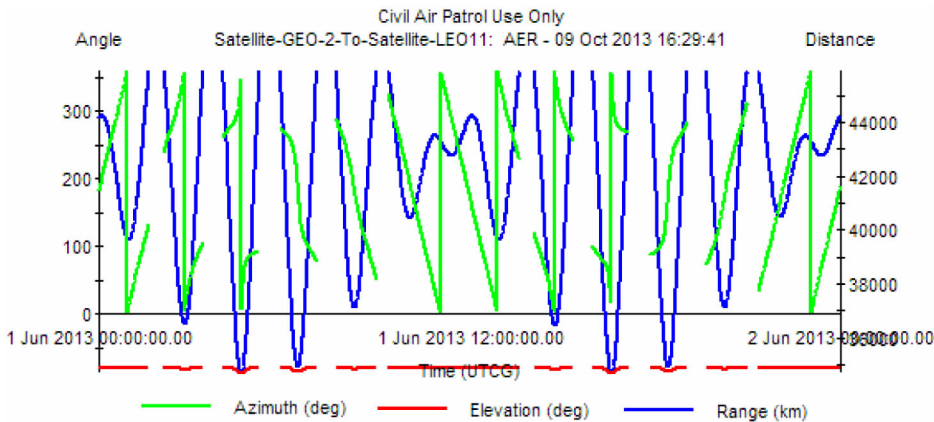


图 9 GEO-2 卫星与 LEO-11 卫星建立 IOL 时的链路特性

由图可知,因 LEO 卫星高速运动,GEO 卫星无法与单颗 LEO 卫星建立永久的 IOL 链路,但 GEO 卫星可与其覆盖域内的任意 LEO 卫星建立 IOL 链路,且保持时间较长。

图 10 分别为 LEO-11 卫星与 GEO 层卫星建立 IOL 的时间的仿真结果。

由图 10 可知,LEO 卫星虽然在高纬度区域无法与 GEO 层卫星建立 IOL,但是在南北纬 75°区域,每颗 LEO 卫星至少可与两颗 GEO 卫星建立 IOL。按照“弱连接”原则,LEO 卫星可选择其中一颗通信质

量最优的 GEO 卫星与之建立链路,从而保证了通信质量的最优化。

2.2.2 ISL 性能分析

GEO 层内卫星具有两条星间链路 (ISL),分别与相邻 GEO 卫星建立链接。LEO 层星座中每颗卫星保持 4 条 ISL。其中,两条 ISL 为同一轨道内前后两颗卫星之间的链路,另外两条 ISL 为相邻轨道卫星之间的链路,在穿越极区时会暂时关闭。另外,反向缝一侧相邻轨道内的卫星高速反向运动,反向缝两侧的卫星只保持 3 条 ISL。

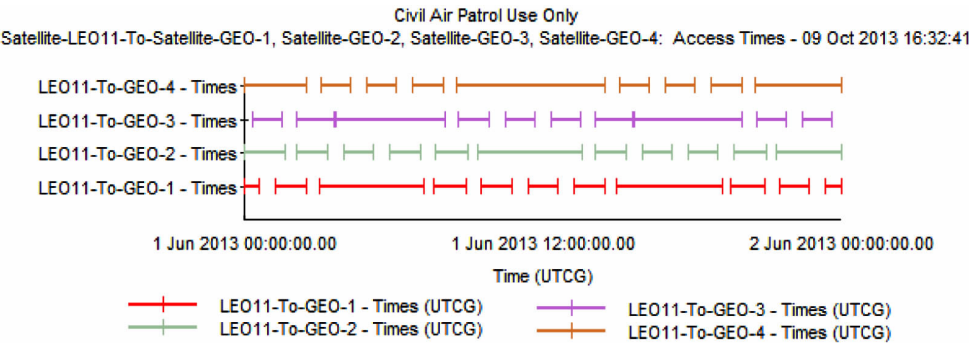


图 10 LEO-11 卫星与 GEO 层卫星建立 IOL 的时间

由于轨内卫星间的两条 ISL 会永久保持连接,属于永久链路,因此在 ISL 性能分析中,仅对轨间 ISL 的连通情况进行仿真分析。

图 11 为处于不同轨道的 LEO-21 和 LEO-31 两

颗卫星之间轨间 ISL 建立时的仰角、方位角以及链路长度的仿真结果。由图可知,LEO 层卫星建立的轨间链路时仰角、方位角、链路长度都在一个较小幅度内周期性变化。

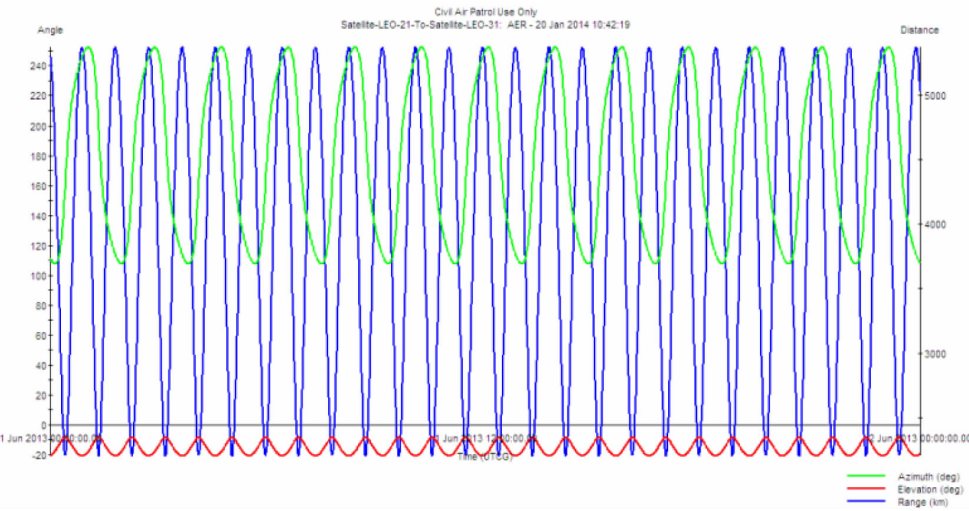


图 11 LEO-21 与 LEO-31 卫星间 ISL 链路几何特性

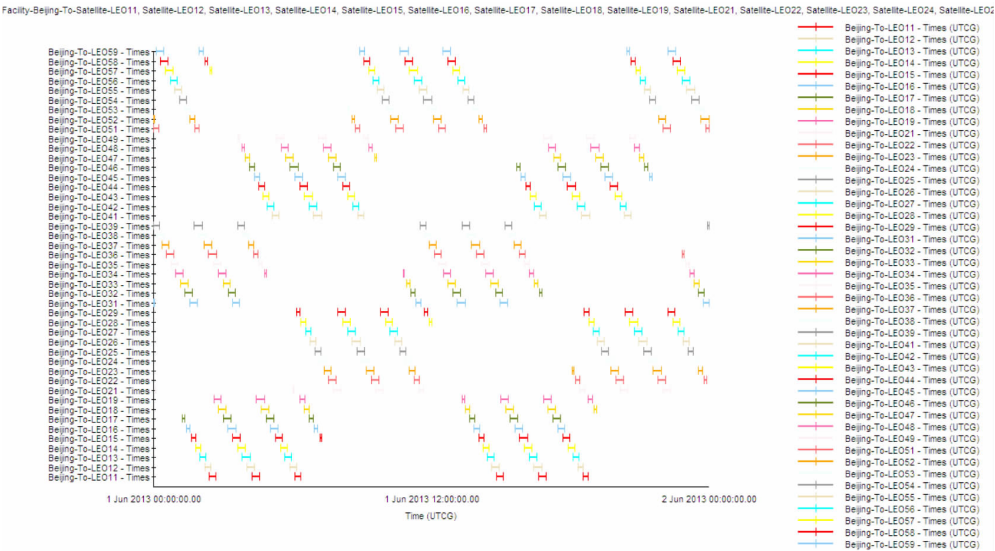


图 12 LEO 层卫星对北京地面网关覆盖时间

2.2.3 UDL 性能分析

图 12 为 LEO 层卫星对北京地面网关的连续覆盖时间的仿真结果。由图可知,一天之内任意时刻,至少有 3 颗 LEO 卫星覆盖地面网关,最多时为 7 颗。结合仿真生成的数据图表可知,LEO 卫星对北京站的最短连续覆盖时间为451.8s。

综上所述,本文所设计的 GEO/LEO 双层星座网络的星际链路具有良好的几何特性,为信息传输提供了良好的信道支持。

3 结 论

针对 GEO 卫星网络主要存在传播时延大、实时业务传输保障能力有限等问题,结合我国地理位置及未来军事需求,设计了一种简捷高效的 GEO/LEO 双层卫星网络,并对其覆盖特性、链路特性进行了仿真分析,为我国未来天基网络研究提供理论依据与参考。下一步工作是在 GEO/LEO 双层星座网络基础上,研究天基网络路由协议。

参考文献

[1] 尹志忠,张龙,周贤伟. LEO/HEO/GEO 三层卫星网络层间 ISL 性能分析. 计算机工程与应用,2010,46(12): 9-13

[2] 白建军. 天基网路由技术研究:[博士学位论文]. 长沙:国防科学技术大学研究生院,2005. 10-13

[3] 肖楠,梁俊,张基伟. 中国低轨卫星星座组网设计与规划. 电讯技术,2010,50(12):14-18

[4] 何俊,易先清. 基于 GEO/LEO 两层星座的卫星组网结构分析. 火力与指挥控制,2009,34(03):47-50

[5] 代坤. 天基信息网体系结构及路由交换技术研究:[硕士学位论文]. 北京:中国科学院计算技术研究所, 2005. 40-44

[6] 龙飞. 卫星网络鲁棒 QoS 路由技术研究. 北京:国防工业出版社, 2010. 30-36

[7] 吴诗其,吴廷勇,卓永宁. 卫星通信导论. 北京:电子工业出版社, 2006. 112-115

[8] 张基伟,梁俊,肖楠等. LEO/MEO 双层卫星网络设计及仿真. 现代防御技术,2011,39(3):103-108

[9] 蒙波,叶立军,韩潮. 卫星星座组网的策略规划. 宇航学报,2009,30(01):150-154

Design and simulation analysis of a double-layered GEO/LEO satellite constellation for China’s future space-based networks

Zhang Jingbin^{***}, Liu Jiong^{*}, Kang Lianrui^{*}, Tian Xiangxuan^{*}
(^{*} Xi’an communications Institute, Xi’an 710106)
(^{**} Army Unit 73132, Zhangzhou 363111)

Abstract

To avoid geosynchronous earth orbit (GEO) satellite networks’ problems of long transmission delay and weak ability in real-time traffic transferring, the design of double-layered satellite networks was studied. Considering that GEO satellites’ position relative to the ground is fixed, and low earth orbit (LEO) satellites have the advantages of lower power loss and shorter transmission delay, a simple and efficient double-layered GEO/LEO satellite network was designed according to China’s geographical position and demands of future space-based network construction. The design follows the weekness connection theory to make the LEO satellite establish the link with a GEO satellite with the optimum communication quality to guarantee the best communication of the system, and obeys the backbone/access model to make the GEO layer construct the backbone network while the LEO layer construct the access network to overcome the high design difficulty. The simulation results show that the double-layered GEO/LEO satellite network has more advantages in coverage characteristics and the inter satellite link (ISL) geometric characteristics, meeting the requirements of China’s future space-based network construction.

Key words: satellite network, architecture design, STK simulation