

LEO/MEO星座组网设计与分析

妥艳君¹, 刘云¹, 李艳²

(1. 北京交通大学通信与信息系统北京市重点实验室 北京 海淀区 100044; 2. 中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

【摘要】具有星际链路的低轨(LEO)和中轨(MEO)星座组网,对构建卫星信息传送网络至关重要。该文建立了一种具有星际链路的LEO/MEO双层星座模型,对MEO、LEO星座组网进行分析,设计了卫星信息传送网络LEO/MEO星座组网仿真系统。通过STK仿真,得到LEO/MEO双层星座组网的卫星星座结构、星际和星地链路通断时间、链路传输时延等数据,分析得出具有LEO/MEO双层星座组网的卫星信息传送网络拓扑结构变化数据,并应用到卫星信息传送网络的构建中,为卫星信息传送网络综合性能的评价提供支持。

关键词 星座; 星际链路; 卫星通信; 卫星设计; 卫星网络

中图分类号 TN927

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.01.012

Design and Analyses of LEO/MEO Constellation Networking

TUO Yan-jun¹, LIU Yun¹, and LI YAN²

(1. Key Laboratory of Communication and Information Systems Beijing Municipal Commission of Education, Beijing Jiaotong University Haidian Beijing 100044;

2. The 54th Research Institute of CETC Shijiazhuang 050081)

Abstract The low earth orbit (LEO) and medium earth orbit (MEO) constellation network with inter-satellite links(ISL) is a critical element in the satellite information transfer network. A 2-layer LEO/MEO constellation model with ISL is constructed. The MEO and LEO constellation networking is analyzed. The simulation system of the LEO/MEO constellation networking in the satellite information transfer network is designed. With STK simulation, the LEO/MEO constellation structure, connection/disconnection time of links between satellites, links between satellite and ground, and link transmission time delays are obtained. The topology change data of the satellite information transfer network is analyzed. The study achievements are applied into the construction of the satellite information transfer network and provide the foundation for the comprehensive performance evaluation of the satellite information transfer network.

Key words constellation; inter-satellite links; satellite communication; satellite design; satellite networks

美国铱星系统是世界上第一个采用星际链路的卫星信息传送系统,也是唯一有星上处理和星际交换的卫星系统^[1]。铱星系统的星座设计能保证全球任何地区在任何时间至少有一颗卫星覆盖。我国卫星信息传送网络是针对未来我国航天事业发展的需求,由不同轨道上多种类型的卫星系统按照空间信息资源最大有效综合利用的原则,互连互通,有机地构成系统优化、功能完备的智能化体系。此卫星信息传送网络可以看作是各种应用卫星系统、空基通信系统及地面站的信息传送平台。

构建卫星信息传送网络,需首先分析研究卫星网络运行环境需求,进行星座设计。卫星网络星座组网仿真系统根据应用需求设计星座结构,对星座的空间几何结构以及卫星间相互关系进行分析描

述,反映星座中卫星的时空布局。星座组网仿真设计侧重于对卫星网络的星座特性进行仿真建模,如轨道高度、轨道倾角等^[2];通过STK仿真获得星座组网运行数据^[3],得到卫星星座结构、星际和星地链路通断时间、链路传输时延等数据,并分析得到网络拓扑结构变化数据。这些数据提供给卫星网络综合性能仿真系统,在OPNET仿真平台上构建卫星网络模型,进行卫星信息传送网络综合性能仿真。卫星星座在通讯、导航定位、军事侦察、对地观测和数据中继等领域都得到了广泛的应用。

1 星座设计

文献[4]研究了在给定卫星个数的情况下,如何设计星座使得覆盖面积最优的问题,并提出了一系

收稿日期: 2009-09-11; 修回日期: 2009-12-24

基金项目: 国家863计划(2006AA701118)

作者简介: 妥艳君(1964-),女,博士生,主要从事卫星信息传送网络、路由交换技术等方面的研究。

列的星座, 经过Ballard的扩充改进, 形成了在轨道设计领域被广泛采用的Walker星座体系。

Walker星座图上共有 T 颗星, 均匀地分布在 P 个轨道平面上, 每个轨道平面上有 S 颗卫星。假定所有轨道平面相对于参考平面(典型的参考平面是地球赤道面)的倾角 i 相同, 且 P 个轨道平面的升交点围绕赤道均匀分布, 其角距为 $360^\circ/P$ 。在每个轨道平面内, S 颗卫星均匀分布, 其角距为 $360^\circ/S$ 。剩下的唯一问题是确定相邻轨道平面卫星间的相对相位(或称相位偏置)。为了使所有的轨道平面彼此具有相同的关系, 相对相位必须是 $360^\circ/T$ 整数倍 F , F 可以是 $0\sim P-1$ 任意整数。只要这个条件成立, 星座图中任一轨道对下一条轨道就保持相同的相位关系, 如果给定轨道倾角 i 和 T 、 P 、 F 三个参数, 就可完全确定星座图的形式。通常用简化符号 $i:T/P/F$ 表示一个星座, 即称为Walker星座。

就轨道类型而言, 有圆轨道和椭圆轨道两大类, 椭圆轨道为了在扰动条件下能保持卫星远地点固定不动, 轨道倾角必须为 63.4° , 这对中低纬度地区的覆盖不利, 而我国正处于中低纬度地区, 因此不选用该轨道进行星座设计。圆轨道则不同, 其轨道倾角可在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 之间任意选择, 为设计带来了方便, 对我国的覆盖而言, 选择圆轨道最为有利。所以采用一种倾斜圆轨道星座, 即Walker Delta星座进行卫星组网设计。

Walker Delta星座因外形形象玫瑰, 又被称作玫瑰星座。玫瑰星座用标志码 $(N, P, m):\beta$ 来标记, 其中 N 为卫星总数, P 为轨道面数目, $m=M/S$ 用以确定卫星的初始相位, $S=N/P$ 为每个轨道面内的卫星数目, M 可在 $0,1,\dots,N-1$ 间取值, β 为轨道面相对于参考平面(通常为赤道平面)的轨道倾角。星座中各卫星依次以 $i=0,1,\dots,N-1$ 标记, 初始时刻第 i 颗卫星在天球上的位置可由以下3个量确定:

$$\alpha_i=2\pi i/P \quad i=0,1,2,\dots,N-1$$

$$\beta_i=\beta$$

$$\gamma_i=m\alpha_i=mS(2\pi i/N) \quad m=(0,1,2,\dots,N-1)/S$$

式中 α_i 为升交点赤经; β_i 为相对参考平面的轨道倾角; γ_i 为初始相位, 是初始时刻从升交点沿卫星运行方向至卫星之间的地心夹角。

由于玫瑰星座的星座设计是以卫星数量最少为目标, 事实上已经对与星际链路的建立有密切关系的相邻卫星间的相位关系、轨道倾角和轨道高度等星座参数进行了最优化。随着星座轨道高度的增加, 全球覆盖需要的卫星数目减少, 相邻卫星间的距离

增大, 距离和方位角的变化趋于平坦, 也易于建立星际链路^[5-6]。

2 星座组网类型分析

卫星信息传送网络的星座组网设计需要满足以下原则:

(1) 实现对高、中、低轨道信息获取系统及其单元的全覆盖, 即在任何时刻, 至少有一颗网络节点卫星能够与之建立星间链路; 实现在我国领土内的任意一点, 在任何时刻, 至少有一颗网络节点卫星能够与之建立星地链路。

(2) 任何时刻、任何地方, 任一骨干网络节点卫星都能与至少其他两颗骨干网络节点卫星建立星间链路。

(3) 网络节点卫星数量应尽可能少; 有较高的路由冗余和路由迂回。

表1为高轨道(GEO)卫星、中轨道(MEO)卫星和低轨道(LEO)卫星星座组网的特性分析。

表1 星座组网特性分析

	全球覆盖 所需卫星数	星际链路 建立难易	传输 时延	抗干 扰	链路 冗余	切换
GEO 组网	最少	容易	大	弱	少	少
MEO 组网	较少	容易	较大	较弱	相对 较少	较少
LEO 组网	多	复杂	较小	强	大	频繁

由于GEO卫星组网具有传输时延较大、易受干扰、链路冗余相对较少、不适合传输实时业务等特点, 所以单层GEO星座不适于作为卫星信息传送网络的骨干网络。

LEO卫星和本轨道面内的前后两颗星是固定连接的, 但和其他轨道面的卫星连接时间较短, 对于经过多个LEO卫星的链路, 其端到端连接时间只有几分钟, 网络拓扑变化较快。

MEO卫星和本轨道面内的前后两颗星以及另一轨道面内的两颗星都可维持固定连接, 对于经过多个MEO卫星的链路, 其端到端连接时间为几小时, 网络拓扑变化相对稳定。

所以, LEO星座作为骨干节点, 虽时延较小, 但拓扑变化快, 不利于寻路和传送大量数据。MEO星座作为骨干节点, 拓扑变化相对较慢, 但对于只有MEO卫星的网络来说, 由于其轨道高度相对较高, 传输时延较大, 支持移动手持用户困难, 不适于支持某些时延敏感的业务。

综合考虑, 为了满足卫星信息传送网络的星座

组网设计要求,本文采用LEO/MEO双层星座组网方式^[7-10]。MEO卫星主要作为路由交换星,为骨干网节点,又可作为接入星,接入应用星和地面站;LEO卫星主要作为接入星,能够接入应用星和地面站等,也可以作为路由交换星。

3 星座组网仿真设计

3.1 星座组网仿真系统设计

星座组网仿真系统设计如图1所示。星座组网仿真系统主要包括仿真场景想定设计、卫星仿真设计、仿真数据分析和仿真结果评价模块等。

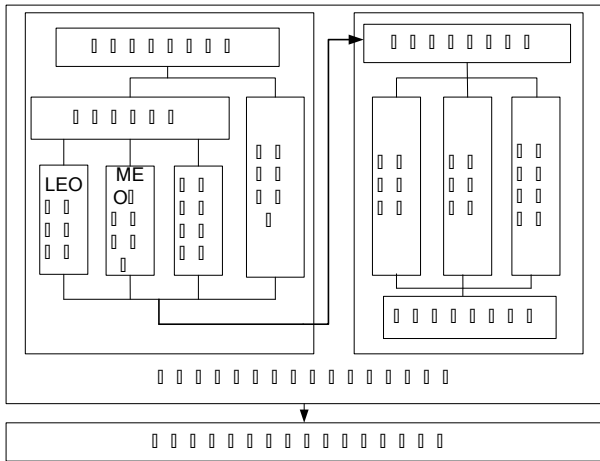


图1 星座组网仿真建模设计图

(1) 仿真场景想定设计,提出星座组网覆盖范围和各种应用卫星、地面站的接入要求等,在考虑不同的应用需求前提下,对星座组网的拓扑结构进行预先想定设置,包括卫星星座结构、地面站的布设等。

(2) 卫星仿真设计,主要是在满足覆盖范围要求条件下对LEO、MEO卫星星座参数(例如轨道面、相位关系和轨道倾角)等进行优化设计。

(3) 仿真数据分析,主要包括星际/星地链路的距离、时延和通断时间等网络拓扑数据输出结果的分析等。

(4) 仿真结果评价,综合比较各种星座组网应用场景下的输出结果,给出相应的评价,为卫星星座设计和选择提供参考。

星座组网仿真系统利用STK卫星仿真工具,构建卫星星座结构、卫星轨道等模型,通过仿真运行得到星际/星地链路通断时间、链路传输时延等数据,并分析得到网络拓扑结构变化数据,为卫星信息传送网络综合性能仿真系统提供卫星网络拓扑特征数据等^[11]。

3.2 建立星座仿真模型

LEO/MEO卫星星座的设计主要是在满足覆盖

范围要求条件下对卫星星座参数进行优化设计。优化星座设计的主要原则是通过选取最佳的轨道倾角和升交点的位置,从而在高度尽可能低的轨道上,采用数量尽可能少的卫星,使最小仰角尽可能大,并对指定区域进行全天候的持续性覆盖。

(1) MEO星座模型设计。

覆盖要求:设计范围覆盖全球,而且能够对我国进行连续覆盖。表2给出了在不同轨道高度情况下单重覆盖MEO星座的部分设计方案结果。表2中,方案1、2和3的最小仰角小于 10° ,不能满足一般地面用户接入的通信要求。方案6的7颗卫星分处于7个轨道平面,该星座难以实用。方案4、5和7即为在3种轨道高度下的最小优化星座,它们能够满足一般地面用户接入的最小仰角要求;考虑到实时性业务的通信要求^[12]、星座复杂度以及经费预算,最后选用方案4。因此,设计了8颗MEO卫星,2个轨道面,每个轨道均匀分布4颗卫星,轨道高度10 354 km,轨道倾角 39.4° ,轨道周期6 h,可以在覆盖要求范围内为用户提供最小仰角为 17.5° 的通信服务。

(2) LEO星座模型设计。

覆盖要求:LEO卫星之间有链路时,覆盖我国及周边地区,并能兼顾覆盖全球的需要;LEO卫星之间无链路时,覆盖我国及周边地区。

表2 部分单重覆盖MEO星座设计结果

设计 方案	卫星 总数 N	轨道 面数 P	相位 关系 M	倾角 $\beta/^\circ$	轨道高度 /km	轨道周期 /h	覆盖最小 仰角/ $^\circ$
1	6	2	1	44.7	10 354	6	4.2
2	5	5	1	43.6	13 929	8	2.5
3	5	5	1	43.5	20 232	12	7.0
4	8	2	1	39.4	10 354	6	17.5
5	8	2	1	39.4	13 929	8	21.8
6	7	7	1	46.1	20 232	12	17.5
7	8	2	1	39.3	20 232	12	26.3

LEO卫星的轨道高度 h 一般在700~1 500 km之间,由此条件可得出 $98.771 4 < T < 115.981 3$ (T 为卫星运行周期,单位为min)。为了便于进行轨道控制,通常选择准回归轨道,即卫星运行周期与地球自转周期成整数比。在此考虑的是地球自转一圈时卫星运转的圈数 K 。 $K=12$, $h=1 666$ km,超出范围; $K=13$, $h=1 248$ km; $K=14$, $h=880$ km,所需卫星数较多。因此,选择LEO卫星的轨道高度为1 248 km。

LEO星座作为区域性覆盖时,采用Walker星座,对于1 248 km高度,在最小仰角 10° 的情况下,卫星覆盖区地心角约为 49.1° ,轨道数 $P=180/49.1 \approx 3.66$,

每轨道卫星数=360/49.1≈7.33。因此设计了24颗LEO卫星, 3个轨道面, 每个轨道面均匀分布8颗卫星, 轨道高度为1 248 km, 轨道倾角为42°。

4 仿真结果及分析

星座组网仿真系统设计了8颗MEO卫星, 2个轨道面, 每个轨道面上4颗卫星, 轨道高度为10 354 km, 轨道倾角39.4°; 设计了24颗LEO卫星, 3个轨道面, 每个轨道面上8颗卫星, 轨道高度为1 248 km, 轨道倾角为42°。

此外, 仿真系统设计了接入LEO星座的8颗应用卫星和接入MEO星座的30颗应用卫星, 还设计了10架飞机、10辆通信车、4艘舰船、45个地面测控站和手持机等。

图2为8颗MEO卫星和24颗LEO卫星组网的空间图。空间图主要显示星座结构和轨道轨迹等内容。

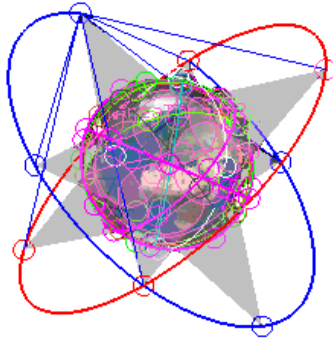


图2 LEO/MEO星座组网的空间图

图3为卫星覆盖特性的仿真结果, 从图中可以看出, MEO星座组网设计可以覆盖全球地区, 满足设计需求。

Coverage Properties		
Custom Regions Coverage		
Resolution: 3.0000 (deg)		
Number of Points: 305		
Assigned Assets:		
Satellite/1_00_7:	Active	
Satellite/1_00_0:	Active	
Satellite/1_00_1:	Active	
Satellite/1_00_2:	Active	
Satellite/1_00_3:	Active	
Satellite/1_00_4:	Active	
Satellite/1_00_5:	Active	
Satellite/1_00_6:	Active	
Access Interval: 1 Jun 2008 12:00:00.00 to 2 Jun 2008 12:00:00.00		
Duration (sec)	% Coverage	% Accum Coverage
86400.000	100.00	100.00

图3 MEO卫星覆盖特性

图4为地面站对MEO星座的仰角变化特性仿真结果。从图中可以得出, 仰角大部分集中在20°~80°之间, 地面用户容易接入MEO星座。

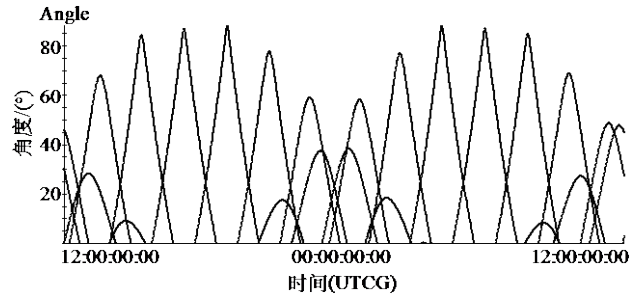


图4 地面站对MEO星座仰角特性

图5为地面站对LEO星座的仰角特性仿真结果。从图中可以得出, 仰角大部分在20°以上, 地面用户容易接入LEO星座。

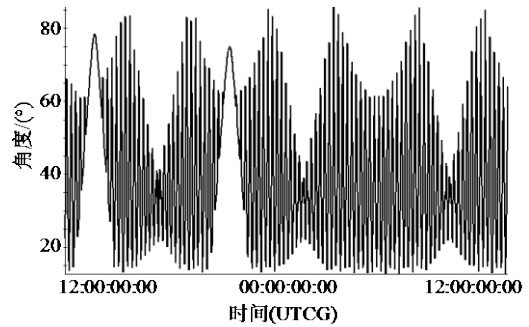


图5 地面站对LEO星座仰角特性

通过STK仿真, 得到一颗LEO卫星与8颗MEO卫星的可见连接时间示例图, 如图6所示。

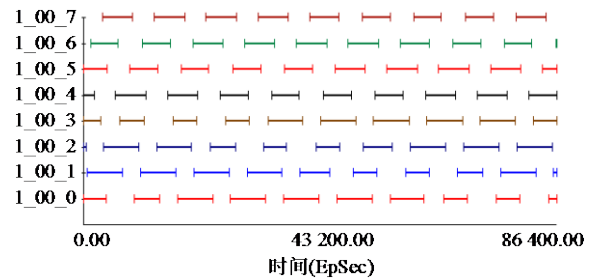


图6 LEO和MEO连接关系示例图

通过对大量仿真输出的数据进行统计和分析, 得到8颗MEO卫星和24颗LEO卫星组网拓扑结构下的传输时延与可见时间表, 如表3所示。

表3 LEO/MEO星座组网的时延与可见时间表

链路类型	时延/ms	24 小时内可见时间/s
MEO-MEO	33~103	8 105, 86 400
LEO-LEO	6~27	922~86 400
MEO-LEO	31~65	773~6 840
MEO-地面站	35~52	16 975~17 020
应用星-MEO	32~63	3 970~5 480
LEO-地面站	4~8	366~2 815
应用星-LEO	2~23	391~1 990

总之, 卫星信息传送网络星座组网仿真系统, 通过对MEO和LEO星座组网设计并进行STK仿真和分析, 可以得到卫星节点个数、卫星节点相互的位置关系、星际/星地链路的通断次数和连接时间、星际/星地链路的传输时延等。这些结果数据导入网络仿真工具OPNET里, 构建卫星信息传送网络, 为卫星信息传送网络综合性能仿真提供支撑。

5 结束语

本文研究Waker Delta星座设计方法, 并对MEO、LEO星座组网进行分析, 设计了卫星信息传送网络LEO/MEO星座组网仿真系统。首先构建星座仿真模型, 对LEO/MEO星座模型进行设计和分析, 并通过STK仿真验证。结果表明, 设计的LEO/MEO星座可以实现对中国及其周边地区全覆盖的需求, 而且地面用户容易接入。最后, 通过LEO/MEO星座组网仿真, 得到MEO和LEO星座组网卫星星座结构、星际和星地链路通断时间、链路传输时延等数据, 并分析得到网络拓扑结构变化数据, 这些对卫星信息传送网络的综合性能的评价非常重要。具有星际链路的双层LEO/MEO卫星星座, 构成一个独立的空间卫星网络信息传送平台, 具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] KELLER H, SALZWEDEL H. Link strategy for the mobile satellite system iridium[C]//Proceedings of the 46th IEEE Vehicular Technology Conference on Mobile Technology for the Human Race. Atlanta: IEEE, 1996, 2: 1220-1224.
- [2] MELIN A, ERWIN R S, CHELLABOINA V. Optimal dynamic assignment for low earth orbit satellite constellations[C]//Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control. San Diego: IEEE, 2006: 3204-3209.
- [3] NICOLAI V, LUCENTE M, PIANTIERI G, et al. Multi-purpose satellites constellations propagator toolkit[C]//Proceedings of the 2007 IEEE Aerospace Conference. Montana: IEEE, 2007: 1-9.
- [4] WALKER J G. Satellite constellations[J]. Journal of the British Interplanetary Society, 1984, 38:559-571.
- [5] BESTE D C. Design of satellite constellations for optimal continuous coverage[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1978, 3: 466-473.
- [6] WU Ting-yong, WU Shi-qi, ZHU Li-dong. Design of common track satellite constellations for optimal regional coverage[C]//Proceedings of 6th International Conference on ITS Telecommunications. [S.l.]: IEEE, 2006: 1253-1255.
- [7] HE Jun, YI Xian-qing. Analysis of satellite network architecture based on GEO/LEO constellation[J]. Fire Control, 2009, 34(3): 47-50.
- [8] 杜耀珂. 基于STK的卫星实时视景仿真系统设计[J]. 空间控制与应用, 2009, 35(2): 60-64.
DU Yao-ke. Design of STK-based realtime visualization simulation system for satellites[J]. Aerospace Control and Application, 2009, 35(2): 60-64.
- [9] WERNER M, DELUCCHI C, VOGEL H, et al. ATM-based routing in LEO/MEO satellite networks with intersatellite links[J]. IEEE Journal on Selected Areas of Communications, 1997, 15(1): 69-82.
- [10] HORSTEIN M. Odyssey a satellite-based personal communication system[C]//The 2nd International Conference on Universal Personal Communication Personal Communications: Gateway to the 21st Century. Ottawa: IEEE, 1993, 1:291-298.
- [11] LEE J, SUN Kang. Satellite over satellite (SOS) network: a novel architecture for satellite network[C]//Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Tel-Aviv: IEEE, 2000: 315-321.
- [12] TRUCHLY P, MAREK O. End-to-end packet delays in LEO satellite constellations[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Systems, Signals and Image. Bratislava: IEEE, 2008: 515-519.

编辑 税红