

# 一种新型多层卫星星座组网设计

李连强<sup>1</sup>, 游寒旭<sup>1</sup>, 朱杰<sup>1</sup>, 杨宇涛<sup>2</sup>, 胡珍<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240;

2. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

**摘要:** 随着空间技术需求的不断增多,传统的单层卫星星座组网模式,由于其结构简单,在未来空间技术的发展中受到限制.近年来,采用多层卫星进行星座组网受到业界的普遍关注.鉴于多层卫星星座模型的优点,设计了一种新的基于 GEO/MEO/LEO 的三层卫星星座模型.本模型充分结合高、中、低轨道各自的优势,以尽量少的卫星数量实现了对地球的全面覆盖,较之传统单层模型更为立体化.最后,通过 STK 和 MATLAB 对所提出的多层卫星星座组网模型进行了数字化仿真,从星间链路的长度、链路通信俯仰角以及方位角等方面进行了对比和分析,验证了本模型的合理性和有效性.

**关键词:** 多层卫星星座; 链路长度; 通信俯仰角; 方位角

**中图分类号:** TN 927 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5137(2016)02-0248-05

## 0 引言

地面的因特网已经取得了巨大的成功,人们希望将因特网的模式复制到太空,实现天地一体化网络<sup>[1-2]</sup>.其中,卫星星座组网的设计是关键和基础,它直接决定和影响着天地一体化网络的拓扑结构和路由方案<sup>[3]</sup>.现阶段的卫星星座组网大多是单层模式,虽然不同轨道高度的卫星星座具有不同的优点,但也伴随着相应的局限性<sup>[4]</sup>.随着人们对卫星网络服务质量要求的提高以及空间技术的不断发展和进步,多层卫星星座组网设计已然成为卫星星座设计的主流方向<sup>[5]</sup>.图1分别给出了传统单层卫星星座组网、多层卫星星座组网的简单示意图.

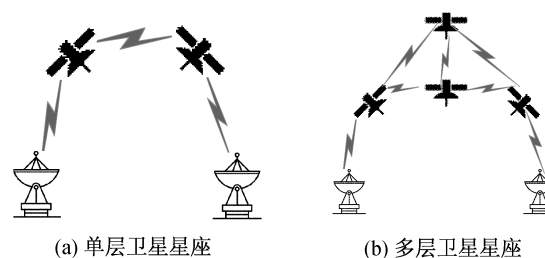


图1 从单层卫星星座到多层卫星星座

## 1 卫星星座组网的关键技术

### 1.1 卫星覆盖范围

卫星星座组网的设计首先要满足一定的覆盖特性<sup>[6]</sup>.随着卫星通信网络用户数量的增大和服务种类的增加,从长远考虑,卫星星座对地球的覆盖应是全球覆盖.理论计算的卫星对地覆盖范围由卫星对地面的切线所限定.实际应用中,假定卫星视角范围内有一地面基站,通常要求它与卫星的通信需要保证一个最小的通信仰角 $E$ ,以避免仰角过小时信号的巨大衰减,影响接受质量,如图2所示.

收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST2015039);国家自然科学基金(61271349,61371147,11433002)

通信作者: 朱杰,中国上海市闵行区东川路800号,上海交通大学电子信息与电气工程学院,邮编:200240,  
E-mail:zhujie@sjtu.edu.cn

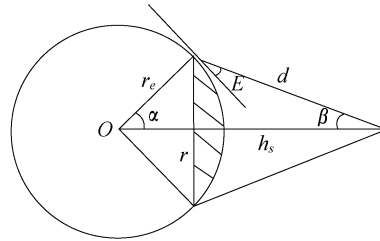


图2 卫星覆盖范围

此时卫星与地面基站之间的最长星地链路  $d$  可表示为:

$$d = \sqrt{(h_s + r_e)^2 - 2r_e r \cos \alpha} \tag{1}$$

式(1)中卫星轨道高度记为  $h_s$ ,  $\alpha$  为覆盖范围对应地心角的一半,定义如下:

$$\alpha = \arccos \left[ \frac{r_e \cos E}{h_s + r_e} \right] - E. \tag{2}$$

$\beta$  为卫星视角的一半,且有  $\alpha + \beta + E = \frac{\pi}{2}$ ,地面覆盖范围的半径记为  $r$ ,则实际卫星对地面的最大覆盖面积表达式为:

$$A = 2\pi r_e^2 (1 - \cos \alpha). \tag{3}$$

### 1.2 星间链路

由于地球的遮挡作用,处于视距之外的两颗卫星无法直接建立通信联系,同时考率到地面基站地理位置的局限性,要实现彼此间的通信必须在中间建立星间链路.星间链路可分为轨内链路、轨间链路和层间链路.

不同类型的星间链路具有相同的评价指标,如链路的长度、链路通信俯仰角以及方位角等<sup>[7]</sup>.星间链路长度决定了传播时延以及方位角和俯仰角的大小,而方位角、俯仰角的大小又影响着星载天线的设计复杂程度和通信质量.可以说这些指标共同决定了卫星通信网络的稳定性和可靠性,在多层卫星星座组网设计中要重点考虑.

## 2 卫星星座组网的设计

综上所述,卫星星座组网的设计不仅要考虑卫星对地面的覆盖范围,还受制于高轨卫星对低轨卫星的覆盖性,以及卫星之间通信链路的稳定性和可靠性.

Walker 星座是目前所知性能最优的全球覆盖星座模式<sup>[8]</sup>,可用4个参数组合: $i, T/P/F$ 表示,其中  $i$  为轨道倾角,  $T$  为卫星数量,  $P$  为轨道数,  $F$  为相位因子,且  $0 \leq F \leq P - 1$ ,  $F$  定义了相邻卫星间的相对位置<sup>[9]</sup>.

本文作者在低地球轨道(LEO)和中地球轨道(MEO)层面均采用 Walker Delta  $2\pi$  星座,在覆盖全球的基础上使得同一层间的卫星彼此可以建立相对稳定的链路关系,这样即使在极地区上空,链路也不会关闭<sup>[10]</sup>.而同步地球轨道(GEO)层面设置等间隔分布的3颗卫星,具体参数指标如表1所示.

表1 多层卫星星座网络参数

轨道类型	LEO	MEO	GEO
轨道高度 ( $h_s$ /km)	1500	10000	35786
轨道倾角	50°	60°	0°
星座类型	Walker 星座 48/8/1	Walker 星座 12/3/1	3 颗对地静止
最小通信仰角	10°	20°	20°

利用式(1)、(2)、(3)可求出在设定的通信仰角下,LEO 实现了对南北纬 $77.1^\circ$ 地区的覆盖,MEO 实现了全球覆盖,而 GEO 实现了对南北纬 $61.8^\circ$ 区域的覆盖,并且低轨卫星总是在高轨卫星的辐射下,符合未来天地一体化网络发展趋势的要求.

### 3 实验仿真与分析

在多层卫星星座组网设计中,为 LEO 层的每个卫星设计了 6 条同层链路,其中 2 条轨内链路,4 条轨间链路.图 3 所示是 LEO11 卫星在 LEO 层内的星间链路通断情况,其他层内星间链路连接情况与此类似.

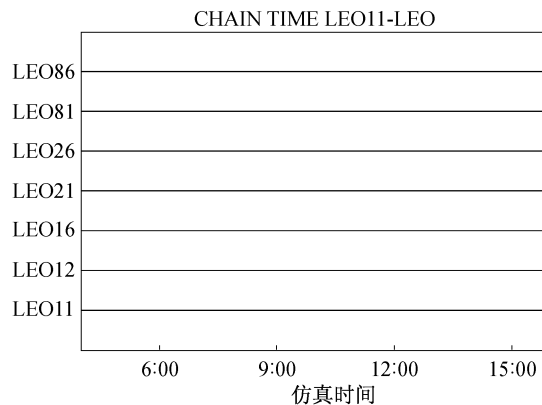


图3 LEO11 与 LEO 层星间链路通信持续时间

图 3 的横坐标为仿真时间,纵坐标表示为 LEO11 与各个 LEO 层卫星的星间链路通断关系.可看出无论是轨内链路还是轨间链路,链路通断关系图一直为实线,说明链路始终保持畅通状态,没有断开.这为用户在任意时刻的全球互联互通提供了基本保证.但需要明确的是,这其中轨内链路中的卫星相对位置保持不变,它们的链路长度、通信俯仰角以及方位角也随之固定.而轨间链路的链路长度、通信俯仰角以及方位角会随着卫星相对位置的变化处于动态变化中.以 LEO11-LEO21 链路为例解释说明,如图 4 所示.

由图 4 可知,LEO 层面的星间链路的长度较短且变化不大,则单跳的传输时延会较小,而且通信俯仰角变化较为平缓,有利于星载天线的追踪.但星间链路的方位角变化范围大且在某些时段变化较为剧烈,会严重加剧信息的传输时延,同时对星载天线的性能也会提出更高的要求.如果考虑到当用户请求过多,业务量很大的情形,数据将无法按时传递,网络将会发生拥塞,卫星通信网络的性能将会急剧下降.这时多层卫星星座组网设计的优点尽显无遗,利用层间链路的分流作用和高轨卫星对低轨卫星的覆盖特性,将数据分组转发到更高的轨道,作为中继点,则可以有效地保证卫星通信网络的稳定性和可靠性.

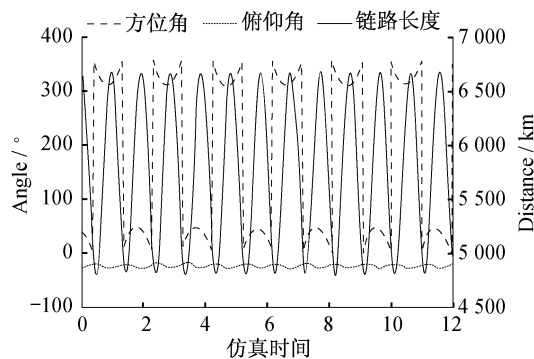


图4 LEO11-LEO21 星间链路关系

LEO-MEO 和 MEO-GEO 层间链路的通信情况和链路关系比较相似,将之放在一起讨论.图 5 和图 6 分别展示的是 LEO11 与 MEO 层间链路以及 MEO11 与 GEO 层间链路的通断情况.图 7 和图 8 分别展示的是 LEO11 与 MEO11 层间链路以及 MEO11 与 GEO1 层间链路的链路关系.

由图 5 和图 6 可以看出,层间链路的通信是间断性的,即层间卫星链路不能够一直保持,断断续续.但是与层内链路相似的是,一个低轨卫星总是可以同时被多个高轨卫星所覆盖,在实际的应用中,可以将累积时延作为标准选择其中的一条链路为主链路,即只选取其中一个高轨卫星作为中继通信卫星,当链路断开时再寻求切换,这样在保证一定性能的前提下又减少了链路的频繁切换.

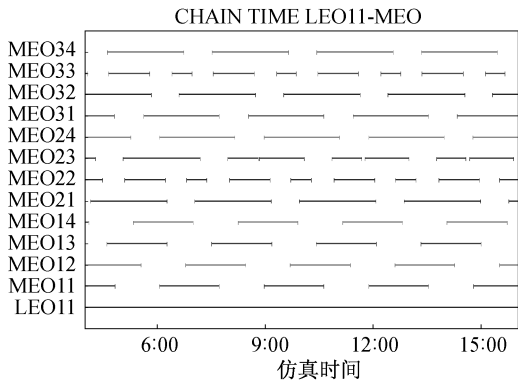


图 5 LEO11 与 MEO 层星间链路通信持续时间

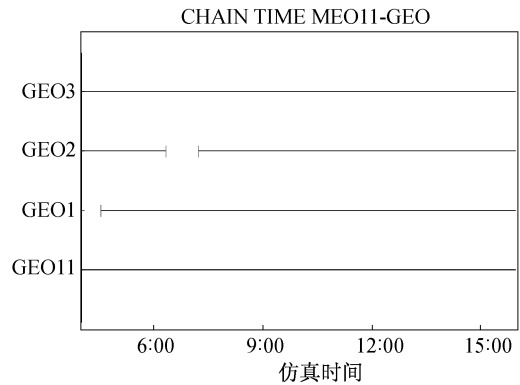


图 6 MEO11 与 GEO 层星间链路通信持续时间

根据图 7 和图 8,可以观察到随着轨道高度的增加,层间链路的距离会变长,进而传输时延会很大,所以一般不能将 MEO 层和 GEO 层作为卫星骨干网络.但是随着高度的增加,星间链路方位角无论是变化范围还是变化率都明显降低,这有利于星载天线的跟踪指向,可以更高效地传输数据,在保证通信的连续性同时还减小了卫星的设计难度.

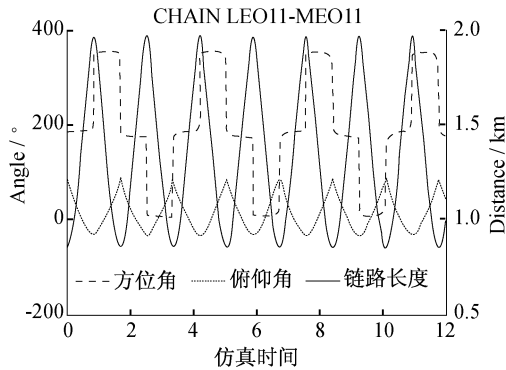


图 7 LEO11-MEO11 星间链路关系

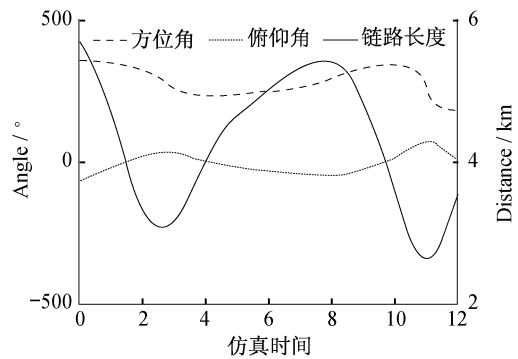


图 8 MEO11-GEO1 星间链路关系

## 4 结 论

本文作者采用了基于 GEO/MEO/LEO 的三层卫星星座的组网设计,并对该方案进行了数字化仿真,通过对实验结果的分析,取得了预想的实验结果,验证了该方案的合理性.

该方案的出发点是利用多层卫星星座的优点以尽量少的卫星数量实现对地球的全面覆盖,同时利用不同层次间的星间链路切换等优点规避了单层卫星星座的缺点,充分结合了高、中、低轨道各自的优势,形成了一个立体结构的卫星通信网络,符合天地一体化网络的发展要求.

## 参考文献:

- [ 1 ] Akyildiz I F, Özgür B, Akan, Chen C, et al. Inter Planetary internet: state-of-the-art and research challenges [ J ]. Computer Networks the International Journal of Computer & Telecommunications Networking, 2003, 43(2): 75 – 112.
- [ 2 ] Chen Y Y, Zheng Z W. Overview: development of communication protocol of interplanetary Internet [ J ]. Application Research of Computers, 2011, 28(2): 406 – 412.
- [ 3 ] Wang Y. Research on inter-satellite routing algorithm for navigation constellation [ D ]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [ 4 ] Wang J, Hu Y, Zhou H, et al. Topological dynamics characterization for layered satellite networks [ C ]//Performance, Computing, and Communications, 25th IEEE International Conference on. IEEE, 2006.
- [ 5 ] Wang Z Y. Architecture design and analysis of multi-layer satellite networks [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [ 6 ] Yang K. Simulation of satellite constellation coverage and performance simulation of satellite communication core network [ D ]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005.
- [ 7 ] Zhang J. Space-based mobile communication network [ M ]. 1st ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2011.
- [ 8 ] Li Y J, Wu J L, Zhao S H, et al. A novel zero phase factor LEO/MEO double layer satellite optical network [ J ]. SCIENCE CHINA: Information Sciences, 2010(06): 876 – 891.
- [ 9 ] Andrew E. Constellation design using walker patterns [ C ]//AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. AIAA. 2002: yema – 4904.
- [ 10 ] Li H, Gu X M. Adaptive routing strategy in multi-layer satellite communication networks [ J ]. Journal on Communications, 2006, 27(08): 119 – 128.

## A novel design on multi-layer satellite constellation network

LI Lianqiang<sup>1</sup>, YOU Hanxu<sup>1</sup>, ZHU Jie<sup>1</sup>, YANG Yutao<sup>2</sup>, HU Zhen<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** With the increasing demand of space technology, the traditional single layer satellite constellation network is restricted in the development of future space technology because of its simple structure. For this reason, more and more researchers have carried out the research on the multi-layer satellite constellation network in recent years. This paper put forward a new GEO/MEO/LEO satellite constellation design based on the advantages of multi-layer satellite constellation to achieve full coverage of the earth with as little satellites as possible. It is more stereo than traditional style. Finally, we use STK and MATLAB to realize the digital simulation of this design. The rationality and effectiveness of this design are verified by comparison and analysis of the length of the satellite link, the communication pitch angle and azimuth angle.

**Key words:** multi-layer satellite constellation; length of the satellite link; communication pitch angle; azimuth angle

(责任编辑:包震宇)