

## 激光链路中继卫星系统网络设计及性能分析

陈二虎<sup>1</sup>, 刘颖<sup>1</sup>, 刘璐<sup>2</sup>, 程洪玮<sup>1</sup>

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 2. 北京大学信息科学技术学院, 北京 100871)

**摘要:** 随着卫星激光通信技术的发展, 激光链路中继卫星系统将成为未来天基信息系统的骨干网。首先设计了一种“2颗国土星+2颗境外星”的网络架构, 然后借助地面程控交换技术分析, 定义了光网络性能指标, 最后仿真了激光链路中继卫星系统的网络性能。仿真结果表明, 当每颗用户卫星通信业务量为 0.2 Erl、接入损失概率要求不大于 0.2、链路利用率不小于 0.6 的情况下, 激光链路中继卫星系统的 12 条接入链路可以支持 50 颗用户卫星接入。

**关键词:** 卫星光通信; 中继卫星; 网络设计; 性能分析

**中图分类号:** TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2778-05

## Network design and performance analysis of data-relay satellite system using laser links

Chen Erhu<sup>1</sup>, Liu Ying<sup>1</sup>, Liu Lu<sup>2</sup>, Cheng Hongwei<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;

2. School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** With the development of satellite laser communication technology, data-relay satellite system using optical links will become the backbone of space-based information system in the future. At first, a network architecture of "2 territorial stars +2 overseas stars" was designed, then the optical satellite network performance indexes were defined based on the analysis method of SPC exchange(stored program control exchange), and lastly the performance of data-relay satellite system using optical links was simulated. The simulation results show that data-relay satellite system using 12 optical links can support 50 user satellites, when each user satellite communication traffic is 0.2 Erl, access loss probability is greater than 0.2, and link utilization is greater than 0.6.

**Key words:** satellite laser communication; data-relay satellite; network design; performance analysis

收稿日期: 2015-01-15; 修订日期: 2015-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(61320106001)

作者简介: 陈二虎(1987-), 男, 研究实习员, 主要从事卫星激光通信总体设计方面的研究。

Email: 13426084001@139.com, lulu@pku.edu.cn

## 0 引言

卫星激光通信技术发展迅猛,国内外开展了多次在轨演示试验,涵盖了高、中、低不同速率和近地、深空、星间、星地等不同链路类型<sup>[1-3]</sup>。美国已开始部署激光链路中继卫星系统,计划2017年发射首星,开展星地高速激光通信试验。欧空局将在2020年前完成欧洲数据中继卫星系统(EDRSS)组网。这标志着卫星激光通信技术正由单链路试验向组网应用阶段迈进,研制建设具有国内特色的卫星光网络势在必行。

近年来,国内外对卫星光网络进行了持续研究。Nikos Karafolas<sup>[4]</sup>提出了基于星间链路波分复用(WDM)和波长路由构建卫星光网络的方法,赵尚弘等人<sup>[5-7]</sup>对不同结构卫星光网络的路由算法、协议模型、资源调度算法等开展了研究。这些研究侧重理论分析,为开展卫星光网络设计提供了很好的基础。

文中提出以中继卫星系统为骨干节点,构建LEO-GEO-OGS(低轨道-地球静止轨道-光学地面站)天地一体卫星光网络,设计了一种适宜国内国土分布特征的网络架构,并仿真分析了系统性能。

## 1 网络架构设计

### 1.1 设计原则

中继卫星系统由中继用户终端、中继卫星和地面运控系统3部分组成。中继卫星系统网络架构设计主要针对中继卫星轨道位置、中继卫星配置和地面站位置,一般遵循以下设计原则:

(1) 尽可能提高对用户卫星的轨道覆盖率;(2) 尽可能降低建设、运行成本;(3) 中继卫星一般选用地球静止轨道(GEO),轨道位置符合国际电联规定,优先选用已申请的轨道位置;(4) 地面站尽可能布设在国土范围以内,保证数据安全可控,优先选用已有地面站位置;(5) 地面站微波测控天线、微波数传天线、激光通信终端对中继卫星仰角满足一定限制(一般分别不小于 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $30^\circ$ );(6) 根据卫星平台能力,适当配置中继卫星载荷,使得星间链路、星地链路收发速率匹配。

### 1.2 网络配置

国内第一代中继卫星系统已实现3星组网运

行,3颗卫星分别位于东节点( $176.8^\circ\text{E}$ )、中节点( $77^\circ\text{E}$ )和西节点( $16.8^\circ\text{E}$ )。以此为基础,开展网络架配置设计分析。

#### 1.2.1 网络基本配置

在东、中、西节点各配置一颗GEO中继卫星,可以为300 km轨道高度以上2000 km轨道高度以下的用户卫星提供近100%的轨道覆盖率<sup>[8]</sup>。

根据国内国土分布特征,任意地面站与东、西节点轨道位置仰角均小于 $30^\circ$ ,无法建立稳定的星地激光链路。因此,东、西节点中继卫星接收到的用户卫星的数据只能通过星地微波链路落地,或者通过星间激光链路传送给中节点中继卫星,由中节点中继卫星落地。中节点中继卫星同时具有星地激光链路和星地微波链路,两者相互备份亦可同时使用。

在这种配置下,中节点中继卫星数据传输压力巨大,不但需要接收来自用户卫星的数据,还要接收来自东、西节点中继卫星的数据。而且,中节点与东节点距离5800 km以上,链路损耗增加影响传输速率。

#### 1.2.2 网络优化配置

在3GEO配置基础上,在国土上空增加1颗GEO卫星,方便接收东节点中继卫星数据,缓解中节点卫星压力。轨道位置申请涉及诸多条件限制,为研究方便将新增中继卫星轨道位置暂定为 $130^\circ\text{E}$ 。这样,就构成了由2颗国土星(中节点卫星、 $130^\circ\text{E}$ 卫星)和2颗境外星(东节点、西节点)组成的“2颗国土星+2颗境外星”的网络架构。该架构是同时考虑轨道覆盖率、系统可靠运行的设计原则前提下的最小经济代价网络配置。

在卫星轨道位置确定后,根据地理环境、气象环境、交通保障条件、地面网络条件等约束,选取地面站位置。通常为1颗中继卫星配备3个以上地面站,使得星地激光链路可用度达到95%以上。

### 1.3 卫星载荷配置

东方红四号是国内新一代大型通信卫星平台,具备大容量、长寿命的特点,可用于建造大容量通信广播、视频/音频直播、跟踪与数据中继和区域移动通信等卫星。

根据网络配置、卫星平台能力、卫星激光终端研制水平以及数据传输需要,设计卫星载荷配置如表1所示。

表 1 中继卫星载荷配置表

Tab.1 Payloads configuration of data-relay satellite

	Domestic satellite	Abroad satellite
Laser payload of intersatellite link <sup>[1]</sup>	2 GEO-LEO links, receiving data rate of 1.8 Gbps; 2 GEO-GEO links, receiving data rate of 1.8 Gbps	4 GEO-LEO links, receiving data rate of 1.8 Gbps; 2 GEO-GEO links, transmitting data rate of 1.8 Gbps
Laser payload of satellite-to-ground link	2 pairs, transmitting data rate of 1.8 Gbps	-
Ka-band satellite-to-ground data transmission antenna <sup>[2]</sup>	2 pairs, transmitting data rate of 1.8 Gbps	2 pairs, transmitting data rate of 1.8 Gbps
Ka-band satellite-to-ground data measurement and control antenna	1 pair	1 pair

1: Data rate of intersatellite link refers to EDRS;  
2: Ka-band satellite-to-ground antenna adopts polarization multiplexing technique.

1.4 工作流程

系统工作流程如图 1 所示，境外中继卫星可以接收 4 颗用户卫星的数据，其中一部分数据通过星地微波链路到国内地面站，另一部分数据通过相邻

的国土中继卫星落地。国土中继卫星可同时接收 2 颗用户卫星数据和相邻的境外中继卫星数据，并将接收到的数据通过星地微波链路或星地激光链路传给 Ka 频段地面天线或者光学地面站(OGS)。

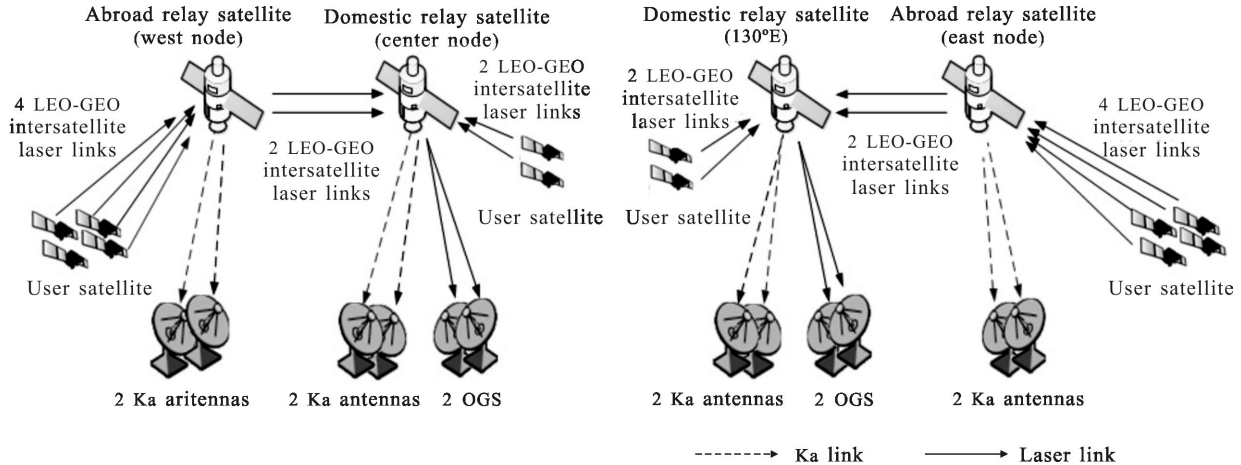


图 1 系统工作流程示意图

Fig.1 Diagram of system work flow

2 网络性能分析方法

由于激光链路具有独占性，用户卫星通过相应的激光链路接入网络之后，就会占有该激光链路直到通信结束，同一时刻不允许与其他用户卫星共用，因此可以用链路的占用时间来分析激光链路中继卫星系统的应用情况。这样，地面程控交换网中基于接入用户数和接入用户通信时长的分析方法就可以应

用到卫星光网络的分析上来。下面仿照地面电信网的分析方法<sup>[9]</sup>，给出激光链路中继卫星系统网络性能指标的定义。

2.1 通信业务量

通信业务量定义为用户卫星单位时间内发生的平均接入次数与每次成功接入占用激光链路的平均时间的乘积。可用下面的关系表示：

$$A=C \cdot t_0 \tag{1}$$

式中:  $C$  为每小时的平均接入次数(次/h, 包括接入成功和接入失败的次数);  $t_0$  为每次接入平均占用通信链路的时间(h/次)。此时, 通信业务量单位可以用 Erl (爱尔兰)表示。如果 1 h 之内持续的占用 1 条激光链路, 则其通信业务量为 1 Erl, 这是 1 条激光链路所能完成的业务量。

### 2.2 接入损失概率

假设共有  $n$  条可用的接入链路, 共有  $m$  个用户卫星随机接入。当用户数  $m > n$  时, 就会出现大于  $n$  个用户同时要求接入通信的情况。由于没有足够的接入链路, 这时候有一部分用户就会接入失败, 这里将接入失败的概率定义为接入损失概率, 采用与呼损率相同的记号  $B$ 。

设  $A'$  为成功接入而完成通信的业务量, 简称完成业务量。 $C_0$  为 1 h 内成功接入的平均次数, 则完成业务量为  $A' = C_0 \cdot t_0$ , 接入损失概率为:

$$B = \frac{A - A'}{A} = \frac{C - C_0}{C} = \frac{C_i}{C} \quad (2)$$

式中:  $C_i$  为每小时的平均接入失败的次数。

呼叫损失概率还可用爱尔兰呼损的计算公式表示为:

$$B = P_n = \frac{\frac{A^n}{n!}}{\sum_{i=0}^n \frac{A^i}{i!}} \quad (3)$$

### 2.3 链路利用率

链路利用率指的是每条激光链路单位时间内完成的平均业务量, 即每个链路实际用来传输数据的时间占总时间的比例, 用公式表示为:

$$\eta = \frac{A'}{n} = \frac{A(1-B)}{n} \quad (4)$$

给定系统的用户卫星数量  $m$ 、每颗用户卫星的平均通信业务量 ( $A/m$ ) 以及系统总的激光链路数量  $n$ , 就可以通过公式(3)得到对应的接入损失概率  $B$ 。同时, 可以将对应的接入损失概率代入公式(4), 计算在给定的配置下以时间定义的平均链路利用率。

## 3 网络性能仿真结果

### 3.1 接入损失概率仿真

由图 1 可知, 激光链路中继卫星系统共有 12 条接入链路, 即  $n=12$ 。利用公式(3), 仿真得到不同通信业务量情况下 ( $A/m$  分别取 0.2、0.3、0.4), 接入损失

概率  $B$  随着用户卫星数量的变化关系, 如图 2 所示。

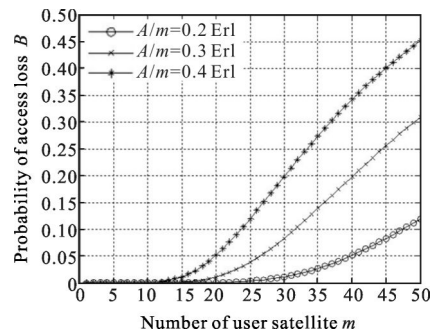


图 2 不同  $A/m$  条件下, 接入损失概率随用户卫星数量的变化曲线  
Fig.2 Access loss probability vs different user satellite number under fixed  $A/m$

可见, 在系统接入链路数量、用户卫星通信业务量条件固定的情况下, 接入损失概率随用户卫星数量的变化分为两个阶段: 当用户卫星数量小于接入链路数量时, 接入损失概率为 0; 当用户卫星数量大于接入链路数量后, 接入损失概率随用户卫星数量的增加而增大。在系统接入链路数量、用户卫星数量固定的情况下, 接入损失概率随着用户卫星通信业务量的增加而快速增大。

### 3.2 链路利用率仿真

利用公式(4)仿真链路利用率随着用户卫星数量、用户卫星通信业务量的变化曲线, 如图 3 所示。在用户卫星数量较少时, 链路利用率随用户卫星数量线性增长; 当用户卫星进一步增加时, 链路利用率增长速率放缓并逐渐趋于稳定。同时, 用户卫星通信业务量越少, 链路利用率越低。当考虑由于链路切换带来的时间时, 链路利用率将更低。

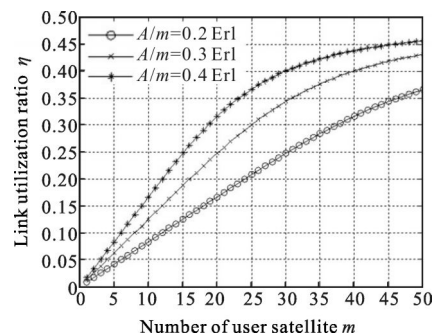


图 3 链路利用率随用户卫星数量的变化曲线

Fig.3 Link utilization ratio vs different user satellite number

### 3.3 接入链路数量选择

上文是在接入链路数量确定条件下, 接入损失概率、链路利用率随用户卫星数量的变化规律分析。

而在进行激光链路中继卫星系统设计时,分析过程往往是相反的,即在用户需求明确(通信业务量基本确定)的前提下,尽可能降低接入损失概率并提高链路利用率,从而确定合理的接入链路数量。

例如用户卫星数量  $m=50$ ,每颗用户卫星通信业务量  $A/m=0.2 \text{ Erl}$ ,即  $A=10$ ,则接入损失概率  $B$ 、链路利用率  $\eta$  随接入链路数量  $n$  的变化见图 4。若根据用户需求,要求接入损失概率  $B \leq 0.2$ ,链路利用率  $\eta \geq 0.6$ ,则可由图 4(图中阴影部分)得到接入链路数量  $n$  需满足以下关系:

$$11 \leq n \leq 16 \quad (5)$$

明确  $n$  的取值范围后,便可根据第 1 章的内容进行网络架构设计,并确定最终的取值。应该说,系统设计是一项需要复杂的、多次迭代的过程,文中只是给出一个简单例子。

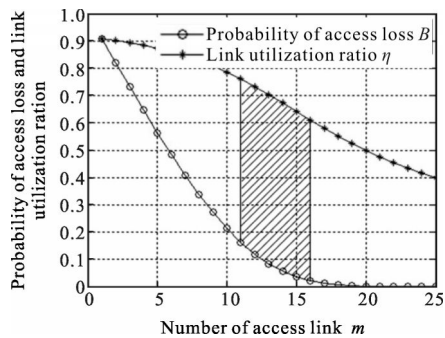


图 4 接入损失概率、链路利用率随接入链路数量的变化曲线

Fig.4 Access loss probability and link utilization ratio vs different access link number

## 4 结论

网络设计和性能分析是激光链路中继卫星系统研制建设的一项关键技术。文中结合实际提出了一种符合国内国土分布特征的网络架构,并借助程控交换机分析方法,对激光链路中继卫星系统的网络性能进行了仿真计算。结果表明,在保证一定的接入损失概率和系统利用率条件下,文中提出的激光链路中继卫星系统可以支持 50 颗用户卫星随机接入。下一步将对地面站选址、系统资源调度、链路切换策略等问题进行深入探讨,以期进一步优化系统设计。

## 参考文献:

[1] Zhao Jing, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Advance on data relay technology for inter-satellite laser links [J].

*Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3103–3110. (in Chinese)

赵静, 赵尚弘, 李勇军, 等. 星间激光链路数据中继技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3103–3110.

[2] Cheng Hongwei, Chen Erhu. Development and enlightenment of data-relay satellite systems using laser links abroad [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1571–1574. (in Chinese)

程洪玮, 陈二虎. 国外激光链路中继卫星系统的发展与启示[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1571–1574.

[3] Tatsuyuki Hanada, Shiro Yamakawa, Hiroki Kohata. Study of optical inter-orbit communication technology for next generation space data-relay satellite[C]//SPIE, 2011, 7923: 79230B.

[4] Nikos Karafolas, Stefano Baroni. Optical satellite networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(12): 1792–1806.

[5] Wu Jili, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Capacity dimensioning for LEO-mesh optical satellite network [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12): 2713–2717. (in Chinese)

吴继礼, 赵尚弘, 李勇军, 等. LEO-Mesh 卫星光网络容量规划[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2713–2717.

[6] Li Yongjun, Zhao Shanghong, Wu Jili, et al. Demonstration system design of double-layered optical satellite network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1974–1978. (in Chinese)

李勇军, 赵尚弘, 吴继礼, 等. 双层卫星光网络仿真演示系统设计. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1974–1978.

[7] Zhao Jing, Zhao Weihu, Li Yongjun, et al. Scheduling algorithm for data relay satellite with microwave and laser hybrid links [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(10): 138–145. (in Chinese)

赵静, 赵卫虎, 李勇军, 等. 微波/光混合链路数据中继卫星系统资源调度算法[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 138–145.

[8] Wang Jiasheng. Proposal for developing China's data relay satellite system[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(2): 1–8. (in Chinese)

王家胜. 我国数据中继卫星系统发展建议[J]. 航天器工程, 2011, 20(2): 1–8.

[9] Liu Zhenxia, Ma Zhiqiang, Qian Yuan, et al. SPC digital exchange technology [M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2013: 99–101. (in Chinese)

刘振霞, 马志强, 钱渊, 等. 程控数字交换技术 [M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013: 99–101.