

# 基于 LEO 的骨干接入空间信息网络与用频策略研究

刘俊峰<sup>1</sup> 李飞龙<sup>2</sup> 杨杰<sup>3</sup>

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410017)<sup>1</sup> (中国人民解放军 31006 部队 北京 100013)<sup>2</sup>

(中国人民解放军 75841 部队 长沙 410126)<sup>3</sup>

**摘要** 空间信息网络利用各类空间平台来实现空间信息的实时获取、传输和处理,打破了当前多个独立系统之间资源不能共享的壁垒。立足我国空间基础设施种类繁杂、不成体系、缺少统一的通信标准、综合服务能力差、覆盖范围小的建设现状,坚持“既着眼于现有系统,又兼顾未来发展”的建设原则,在空间信息网络建设的初级阶段,设计了基于双层 LEO 的空间信息网络的体系架构,即将较高轨道的 LEO 卫星作为骨干核心网来负责骨干传输功能;将较低轨道的 LEO 卫星作为热点接入层来负责地面和空间业务节点的接入。同时,为未来空间信息业务提供可扩展的体系特征,譬如未来增加对 GEO 骨干节点的拓扑关系的考虑,从而解决空间信息网络的轨道资源问题。最后,针对空间信息网络频率资源受限的问题,提出了频率获取策略。

**关键词** 空间信息网络,星座设计,骨干核心网,热点接入网,频率获取策略

**中图分类号** TN927 **文献标识码** A

## Research on Space Information Network Architecture Based on LEO Satellites for Backbone Access and Frequency Resolution Strategy

LIU Jun-feng<sup>1</sup> LI Fei-long<sup>2</sup> YANG Jie<sup>3</sup>

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410017, China)<sup>1</sup>

(Unit 31006 of PLA, Beijing 100013, China)<sup>2</sup>

(Unit 75841 of PLA, Changsha 410126, China)<sup>3</sup>

**Abstract** Space information network (SIN) utilizes various spatial platforms to achieve spacial information real-time acquisition, transmission and processing, which breaks the barrier of multiple independent systems incapable sharing resources. Based on the current situation of complex types, fragmentation, lacking of unified communications, poor integrated services and small-coverage for our national space infrastructure, this paper proposed the construction principles of not only focusing on the existing system but also taking into account the future development. A novel SIN architecture based on the double layered LEO was designed during the initial stage of SIN. The higher LEO satellites regarded as the backbone core network play the role of backbone transmission task, while the lower LEO satellites regarded as the hot access network provides access to terrestrial and space services node. Meantime, the scalable system feature is exhibited for future space information service. For example, the topological relations with future increased GEO backbone nodes are considered. Then, orbit resource shortages of SIN is effectively resolved. Additionally, frequency acquisition strategy is researched for the problem of limited frequency resources in SIN at the end of this paper.

**Keywords** Space information network, Constellation design, Backbone core network, Hot access network, Frequency resolution strategy

## 1 引言

美国 UCS Satellite database 公布了一组数据<sup>[1]</sup>:截止 2015 年底,全球低轨、中轨、高轨航天器数量达到 1344 颗,其中低轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星 759 颗,中轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星 92 颗,静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星 493 颗,其分布情况如图 1 所示。

其中,LEO 轨道卫星主要是对地观测卫星和通信卫星,MEO 卫星主要为导航卫星,GEO 卫星主要为通信卫星。

然而,飞行器被应用于不同领域,例如通信、对地观测、空间科学、导航以及技术验证等,采用典型的“烟囱式”体系架构来满足不同任务的需求。尽管卫星的种类不断增多、卫星的能力不断提升,但是系统之间仍相互独立、各自为阵,不具备互联互通、资源共享、综合服务等功能。当前,世界上主要的

刘俊峰(1990—),男,硕士生,主要研究方向为网络安全与卫星通信,E-mail:294124580@qq.com;李飞龙(1988—),男,博士,主要研究方向为卫星通信技术;杨杰(1990—),男,硕士,主要研究方向为卫星通信技术。

航天大国已把发展网络化、综合化、集成化、智能化的空间信息系统作为新的发展战略。

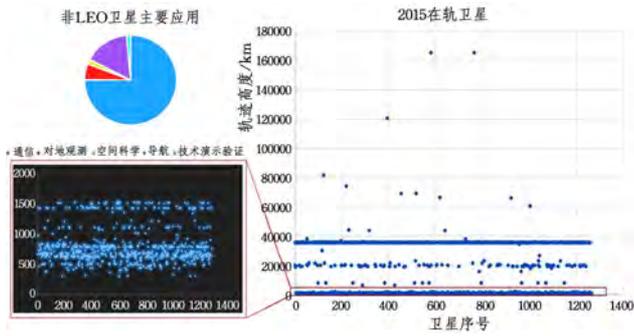


图1 2015年在轨卫星分布图

在空间信息系统规划和建设方面,国外典型的代表有美国航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出的空间通信与导航计划(Space Communications and Navigation, SCA<sub>N</sub>)<sup>[2-3]</sup>、美国国防部高级计划研究局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)提出的转型卫星通信系统(Transformational Satellite Communication System, TSAT)、欧洲全球通信一体化空间架构(Integrated Space Infrastructure for Global Communications, ISICOM)<sup>[4-7]</sup>、下一代铱系统(Iridium NEXT)<sup>[8-9]</sup>和国际海事卫星(Inmarsat)的BGAN SB-SAT<sup>[10]</sup>等。这些空间信息系统通过系统之间的融合或者功能上的融合,在一定程度上具备了空间信息的获取、传输、存储及在轨处理能力。国内典型的代表是解放军理工大学张更新团队提出的时空不间断覆盖的空间信息网络体系架和网络模型(Research of System Architecture and Network Model of Space-Time Uninterrupted Space Information Network),他们根据节点属性、链路能力、任务特点、分布区域等将整个空间信息网络划分为地面自治域、升空平台自治域和空间自治域,并在空间自治域提出了基于“骨干网(GEO)+增强网(IGSO)”的信息服务节点布设方案<sup>[11-13]</sup>。尽管有些系统由于经费等原因被搁置,但其先进的设计理念为空间信息网络的构建提供了重要参考。另外,随着低成本火箭发射技术和微小卫星制造技术的不断发展,利用大量的低轨微小卫星在空间组网实现全球对地观测(Skybox, Planet Labs)和全球互联网接入(SpaceX, Oneweb, OuterNet)已成为卫星在商业领域应用的新趋势<sup>[14]</sup>。

### 2 双层 LEO 空间信息网络体系架构

基于我国目前空间基础设施的分布状况和未来对综合信息服务能力的需求,空间信息网络体系架构的构建需要满足以下输入条件:

- 1) 由于技术条件和发展阶段的限制,部分已在轨卫星不具备中继通信功能,譬如超过一半的在轨卫星分布在 400~1400 km 的 LEO 轨道上,一般只具备对地数传的能力。
- 2) 空间信息网络与传统意义上的卫星通信网络的区别在于,其服务对象除了地面各类终端外,还涵盖了空间业务信息节点(临近空间与平流层飞行器、低轨业务卫星、深空探测器等)。
- 3) 空间信息网络的构建一方面应该保障全球范围内的无

缝覆盖,另一方面还应为空间业务节点的实时/准实时的信息回传提供稳定且可靠的传输通道。

4) 既着眼于现有系统,又考虑未来发展。应重点考虑将现有在轨卫星接入到空间网络,并为未来的卫星业务提供可定制且可扩展的体系特征。同时,要保证系统效能能在有限成本下的最大化实现。

5) 受全球布站的制约,空间数据仅能在国内地面站落地。空间信息网络的体系架构如图 2 所示。

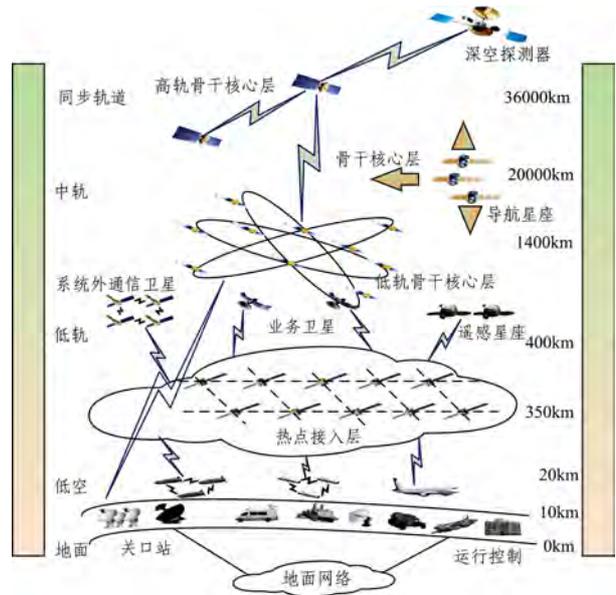


图2 基于双层 LEO 的空间信息网络的体系架构

空间信息网络以空间平台(如同步卫星或中/低轨卫星、升空平台等)为载体,通过构建一个实时、稳定、互通互联的骨干核心层,以及一个覆盖全球并为应用卫星和其他空间节点提供空间信息服务的热点接入层,具备实时获取、传输、处理、控制管理的空间信息系统<sup>[15]</sup>。作为国家重要的空间基础设施,空间信息网络不仅打破了各个相互独立系统间信息共享的壁垒,能够有效利用空间中的各种资源(轨道资源、频率资源、传感器资源、存储处理资源等),还可为作战提供一体化的侦察、导航、作战指挥等服务,同时为海陆空通信、海洋气象预报、导航、应急救援、农林牧渔等提供全方位的支持。

#### 2.1 骨干核心层

骨干核心层包括了高轨骨干核心节点以及 LEO 骨干核心节点。多数研究中都采用 GEO 卫星作为骨干卫星。图 3 给出了 3 颗定点经度相差 120° 的 GEO 卫星的覆盖情况。

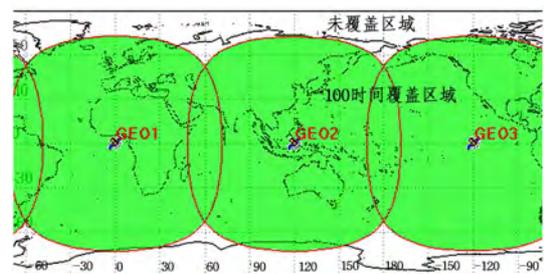


图3 3GEO 卫星的覆盖情况(波束边缘的仰角为 10°)

对地静止轨道特性使得 GEO 卫星存在如下缺点:无法覆盖全球,在两极存在通信盲区;在中高纬度地区的平均通信仰

角低,衰落余量大,存在“南山效应”;传播时延和损耗大,不利于终端的小型化。因此,GEO 卫星骨干网必须借助其他类型的平台来补充和增强其覆盖能力,如张威等人<sup>[14]</sup>提出的“4GEO+5IGSO”方案。

高轨骨干网的综合成本过高,在空间信息网络发展初期可以考虑优先建设 LEO 低轨骨干网。热点接入网络实现对地面、临近空间飞行器以及低轨应用卫星的覆盖,在 1450 km 轨道高度部署骨干核心星座,利用有限的卫星数量来实现对热点层节点的全覆盖。低轨骨干层对地面的通信可通过接入层转接。这样就减小了低轨骨干层的规模,从而能实现低延时的空间信息网络,降低综合成本。

骨干核心层的首要功能是骨干传输,其具有大容量、高速率的数据传输能力,具备空间路由功能和网络管理功能等,并提供在轨计算和大容量存储等服务。同时,对传输时延要求较低的大容量与高速率空间信息业务可通过逐步建设的高轨骨干核心节点承载,其中高轨骨干层与低轨骨干层相互兼容。

## 2.2 热点接入的层

空间信息网络的重要功能之一,是为在轨航天器尤其是 LEO 在轨航天器提供接入的功能。然而,目前绝大多数的近地轨道卫星不具备向更高轨道中继通信卫星接入的能力,中继卫星有限的资源决定了其提供的服务不是实时的。因此,需要利用 LEO 轨道航天器的对地测控与数传波束来设计信息接入节点。其功能之二是,为陆地、海洋以及临近空间的飞行器用户提供全球的接入服务。

根据在轨卫星的空间分布情况,超过 85% 的在轨 LEO 卫星分布在 400~1400 km 轨道上;但为保障接入层卫星能够获得现役卫星的数据,接入层的轨道高度应低于 400 km。随着轨道高度的降低,全球覆盖需要的卫星数量增加,从而使得成本和管理难度加大。另外,长半轴衰减会越来越快,例如对于 350 km 的轨道高度,由于轨道衰减,其寿命一般不到半年,因此建议将接入层的轨道高度限定在 350~400 km 之间。

此外,空间信息网络的承载要素还包括升空平台层、接入网和地面网络、运行控制网等。

## 3 双层 LEO 星座的设计

空间信息网络建设的初期阶段,立足我国在轨航天器的技术现状,基于现有近地轨道卫星尽可能多地接入近空间信息网络的需求,并为未来空间信息业务提供可扩展的体系特征,实现系统效能有限成本下的最大化,空间信息网系统初步采用一种由轨道高度为 1450 km 的骨干层和轨道高度为 380 km 的热点层构成的双层 LEO 的卫星星座结构,如图 4 所示。

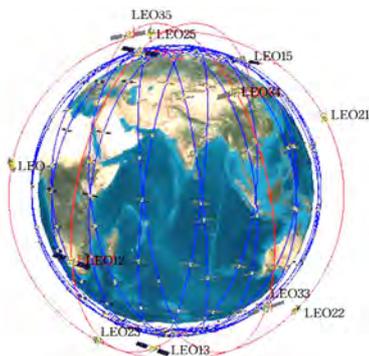


图 4 双层 LEO 卫星空间网络

这种两层星座的设计思路是在 LEO 较高的轨道层,利用较少的卫星和较简单的路由策略实现对热点接入层卫星的覆盖和管理。这种方案的优点在于:未来增加 GEO 骨干节点时,在拓扑关系的实现上比较简单;在 LEO 较低的轨道层部署大量低成本的小卫星对全球进行覆盖,不仅有利于较高 LEO 轨道的业务节点卫星的接入,而且拉近了与升空平台层和地面接入网的传输距离。空间信息网络利用骨干层网络 24 小时无缝覆盖下层的热点接入层网络,实现对全空域信息连接的覆盖,并利用热点接入层网络实现对地面的完全覆盖。总体来讲,所设计的双层 LEO 卫星空间网络向上可支持在轨航天器的接入,向下可支持地面和临近空间用户的接入。

### 3.1 LEO 热点接入层的设计

热点层卫星将不同体制的空间业务节点接入到空间信息网络,而现有的在轨航天器主要利用对地的测控与数传波束与地面站进行数据传输。在设计中,把热点层接入卫星设计为具备近全向收发能力的卫星,以为在轨航天器提供网络接口。

考虑到对地面、临近空间层的指令与信息接入,热点层须很好地覆盖地面和低空域,同时考虑到在轨卫星的轨道类型以太阳同步居多,而 400~1400 km 的太阳同步轨道倾角范围为 97°~101°,均接近于极轨,极轨与近极轨的星座都能够对地面实现完全覆盖,因此热点层的轨道类型可以选择太阳同步轨道。

太阳同步轨道卫星的轨道倾角、轨道半长轴之间的约束关系如下:

$$\cos i = -0.09856 \left( \frac{R+h}{R} \right)^{3.5} \quad (1)$$

其中, $R$  为地球半径,取 6378 km; $h$  为太阳同步轨道的半长轴,当偏心率为零时,半长轴等于轨道高度加上行星半径; $i$  为轨道倾角,当轨道高度为 380 km 时,轨道倾角为 96.91°。

热点层网络的 LEO 卫星具体按照 288/18/1 的 Walker 参数组成星座,其对全球的覆盖仿真如图 5 所示。由图可以看出,热点层网络可以实现对全球的 24 小时双星覆盖,同时可以实现对高纬度地区的多星覆盖。

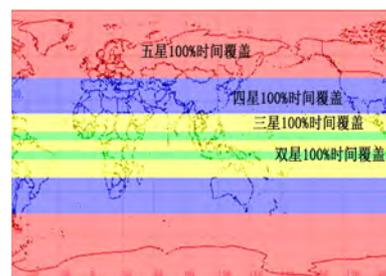


图 5 热点接入层网络的全球覆盖情况(波束边缘仰角为 10°)

288 颗卫星热点接入层对在轨卫星的接入能力由目标卫星的轨道高度和对地波束张角决定。一般地,卫星对地的测控数传波束张角在 75° 范围内时可通信,60° 以内时可保证较高的数据速率。例如,75° 波束角对 500 km, 700 km 和 900 km 轨道高度目标卫星的覆盖率分别为 32%, 100% 和 100%, 而在 60° 范围内的覆盖率则分别降为 10%, 45% 和 98%。可见,并非所有的在轨航天器都能实时地接入到空间信息网络,因为有些在轨卫星中装载的仍是窄带波束天线,此时只能通过姿态机动进行接入。

### 3.2 LEO 骨干层的设计

如果通过热点层卫星组网,实现对现有在轨航天器的接入,则会面临星座拓扑动态变化、路由算法复杂、对在轨卫星能力要求高等问题,因此在考虑将 GEO 卫星骨干层作为远期规划的同时,设计轨道高度为 1450km 的 LEO 卫星作为骨干层来实现对热点接入层全空域信息的连接覆盖。同时,骨干层卫星之间通过微波或激光高速链路来传输高速率数据,并提供空间高速率传输需求的业务节点和未来 GEO 骨干系统的网络接口。

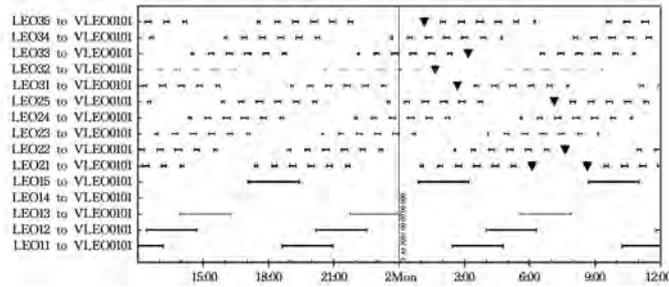


图 6 热点层卫星与骨干层卫星之间的可见情况

从图 6 中可以看出,热点层卫星 VLEO0101 可同时对 5 颗骨干层的卫星可见。由于采用的是太阳同步轨道,因而卫星 VLEO0101 对轨道相近的同一轨道面内的骨干卫星的可见时间较长;通过距离分析可知,两者之间的距离较小,且绝大多数时候距离最短。因此,对于热点层与骨干层之间的链路接入,可以采用最长可见时间优先策略,一方面可使得系统的性能得到充分发挥,另一方面可使得系统的复杂度较低。

### 4 频率使用策略的分析

建设我国空间信息网络,现阶段面临轨道资源和频率资源紧张的双重挑战。其中,轨道资源紧张问题通过双层 LEO “骨干网+热点接入网”的体系架构加以解决。根据国际惯例,轨道资源遵循“谁先占、谁先用”的原则,因此必须加快推进空间信息网络建设的步伐,与其他航天大国“抢时间、抢轨位”。相对于轨道资源问题,频率资源问题更加棘手。频率资源的获取必须先按国际无线电规则(RR)向国际电联(ITU)统一申请,目前各主要航天大国都把频率资源作为航天发展战略的“生命线”,申请与协调工作难度极大。实际上,可用于空间信息网络的某些频率几乎已被瓜分殆尽。譬如,作为全球卫星移动通信和广播“黄金频段”的 L/S,目前已在实际在轨系统中得到规模化应用,获得一个用于全球卫星移动通信的 L/S 频段几乎不可能,除非采用技术手段或者策略。因此,在空间信息网络规划和发展的初期,必须统筹考虑频率资源的布局、申请与协调,未雨绸缪才能有备无患。

具体来讲,空间信息网络的频率主要分为用户链路频率、星间链路频率、馈电链路频率和测控链路频率。其中,基于双层 LEO 的空间信息网络的星间链路主要包括骨干网层内星间链路、热点接入网和骨干网的层间星间链路、在轨业务航天器与热点接入层的层间星间链路等。根据电波传播特性、系统需求和兼容特性等因素,ITU 分配给星间链路的频段有 14

骨干层 LEO 卫星按照 1450km 的 15/3/1 Walker 参数组成星座,以较少的轨道面和卫星数实现对热点层卫星的实时完全覆盖,同时兼顾了链路距离、星座成本和复杂度等。

热点层卫星由 Walker 星座构成,因此其与骨干层卫星之间的连接关系具有对称性。下面选取热点层的一颗卫星 VLEO0101 与骨干层卫星进行研究。对热点层卫星与骨干层卫星之间的可见时间在一天中的变化情况进行仿真,得到如图 6 所示的结果,不同颜色的线条分别代表 VLEO0101 卫星与不同骨干卫星之间的可见情况。

个,它们分布在特高频 UHF 到极高频 EHF(190 GHz),以及还包括未分配的激光光束。而馈电链路频率和测控链路频率的使用仅限于在轨航天器和固定区域分布的信关站和测控站之间,相对地,预留的频率更充分、协调的难度更小。

从某种意义上讲,空间信息网络中的用户链路频率是制约系统能否实际部署与应用的关键因素。空间信息网络一方面为地面上的各类移动用户提供中低速的语音和数据接入,另一方面还可以兼备为地面互联网无法覆盖的地区提供高速互联网接入的功能。前者在功能上类似于“铱星(Iridium)”和“全球星(Globalstar)”等,优选 L/S 频段作为用户链路的通信频率,后者在功能上类似于“O3b”“OneWeb”和“SpaceX”等,采用较高的 Ka 频段和 Ku 频段作为通信频率。表 1 给出了我国空间信息网络用户链路可能用到的 L/S 频段和 Ku/Ka 频率的使用情况,包括正在规划的系统和在轨运行的系统。

表 1 L/S 频段和 Ku/Ka 频率的使用情况

频率	系统	业务类型
L	Iridium, Globalstar, Inmarsat, MSAT, SkyTerra, AlphaSat I-XL, Thuraya, Garuda-1	全球或者区域的卫星移动通信业务
S	TerreStar-1, ICO, Insat, N-STAR	全球或者区域的卫星移动通信业务
Ku	OneWeb, SpaceX	全球卫星互联网接入
Ka	O3b, Iridium Next	O3b: 南北纬 45° 区域的卫星互联网接入 Iridium Next: Ka 动态凝视点波束, 区域宽带通信

分析 L/S 和 Ku/Ka 在规划系统和实际在轨系统中的使用情况可知:对于全球的卫星移动通信,已没有一段完全可用的 L/S 频率能满足我国空间信息网络的需求;对于宽带互联网接入宽带通信,也必须提前布局和申请可用的 Ku/Ka 频

率,据统计,目前已有多个国家或者区域组织以各种形式向 ITU 递交了申报材料。总之,频率资源是有限的宝贵资源,只有积极主动作为才能占有一席之地,也才有可能建设空间信息网络。可通过采取以下策略来获得频率资源:

1) 加强国际合作是基础。空间信息网络为全球覆盖的通信系统,应在全球范围内协调频率资源。

2) 统筹国内频率资源管理是前提。譬如,对于 1668~1675 MHz 和 1518.0~1525.0 MHz 这 7 MHz 资源,运用统筹协调的方法,实现与国内气象现代化业务的兼容发展,是推进全球化布局的前提。

3) 实现多个频率互为备份是趋势。考虑降低用频风险,结合目前面临的困境,应同时使用多个频段。譬如,对于全球卫星移动业务,建议优先使用 1668~1675 MHz 和 1518.0~1525.0 MHz,同时与其他可用的 L/S 频段结合。

4) 加快推进空间信息网络建设的速度并扩大规模是必要条件。譬如,对于 S 频段,无法从 RR 的角度区分空间系统和地面系统这两者的使用优先级,目前这在 ITU 仍悬而未决。因此,空间信息网络的建设需与地面业务系统抢时间、抢资源。

5) 采用新的技术体制是手段。按照 ITU 的限制,比如对于 PFD 的严格限制,在用频冲突的区域,通过技术体制设计,譬如采用宽带扩频技术来防止与其他系统间的互相干扰。

6) 统一对空间信息网络中骨干网和接入网的组成、架构、功能的认识并优化资源配置、避免重复建设是核心。空间信息网络建设的目的就是在融合导航、通信、对地观测等系统的基础上,通过有限的资源(包括频率资源),实现对空间综合信息的有效利用。

**结束语** 本文立足于当前空间中各应用分系统独立发展、各成体系、不能互联互通和资源共享的实际,坚持“既着眼于现有系统,又兼顾未来发展”的建设原则,以实现有限成本下最大的系统效能为目标,构建了基于双层 LEO 的空间信息网络体系架构,并分析了系统的组成、功能和连接关系。其中,较高轨道的 LEO 骨干核心层负责骨干的传输;较低轨道的 LEO 热点接入层实现对地面各类终端的完全覆盖,并为空间业务航天器节点提供热点接入,从而对实现空间综合信息的实时获取、传输和处理。针对空间信息网络中可用的 L/S 和 Ku/Ka 频率资源紧张问题,提出了频率获取策略。本文在轨道资源和频率资源两方面进行了有益探索,以期为我国未来空间信息网络的建设提供有力的技术支撑。

### 参 考 文 献

[1] UCS Satellite Database [OL]. Available: [http://www.ucsusa.org/nuclear\\_weapons\\_and\\_global\\_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html](http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html).

[2] JENNINGS E, HECKMAN D. Performance Characterization of Space Communications and Navigation (SCaN) Network by Simulation[C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. 2008:1-9.

[3] NASA. Space Communications and Navigation (SCaN) [OL]. <http://www.nasa.gov/content/space-communication-and-navigation-scan-goals-and-objectives/#.Vp2BILkQh7I>.

[4] FOGLIATI V. Basic Pillars for the ISICOM System Development[C]// Proceedings of International Workshop on Satellite and Space Communications. 2009:99-103.

[5] VANELLI A, CORAZZA G, LUGLIO M, et al. The ISICOM Architecture[C]// Proceedings of International Workshop on Satellite and Space Communications. 2009:104-108.

[6] SESENA J, ALFARO A, MUNOZ S. Regulatory environment for the Successful ISICOM Development[C]// Proceedings of International Workshop on Satellite and Space Communications. 2009:109-112.

[7] FOGLIATI V. ISICOM: Integrated Space Infrastructure for Global COMMunications[C]// Proceedings of Advanced Satellite Mobile Systems. 2008:13-15.

[8] GUPTA O. Global Augmentation of ADS-B Using Iridium NEXT Hosted Payloads[C]// Proceedings of Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. 2011:1-15.

[9] Discover the Iridium NEXT program [OL]. <http://www.iridium.com/About/IridiumNEXT.aspx>.

[10] JOHNSTON B, HASLAM M, TRACHTMAN E, et al. SB-SAT Persistent Data Communication LEO Spacecraft via the Inmarsat-4 GEO Constellation[C]// Proceedings of Advanced Satellite Multimedia Systems Conference. 2012:21-28.

[11] ZHANG G, ZHANG W, ZHANG H, et al. A Novel Proposal of Architecture and Network Model for Space Communication Network[C]// Proceedings of IAF 65th International Astronautical Congress. 2014:1-7.

[12] ZHANG W, ZHANG G, GOU L, et al. Hierarchical Autonomous System Based Topology Control Algorithm in Space Information Network[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2015, 9(9):3572-3593.

[13] ZHANG W, ZHANG G, BIAN D, et al. A Novel Space Information Network Architecture Based on Autonomous System[C]// Proceedings of Wireless Communications and Signal Processing. 2015:1-5.

[14] 张威. 空间信息网络中的拓扑控制理论与方法研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2016.

[15] 国家自然科学基金委员会. 空间信息网络基础理论与关键技术重大研究计划指南 2015 [DB/OL]. (2015-04-16)[2017-03-12]. <http://wwwnsfcgovcn/publish/portal0/tab38/info48284.htm>.