

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.S.001

低轨大规模星座概念研究与分阶段部署方案

白雪^{1,3}, 王丹丹², 白照广², 徐明¹

(1. 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191; 2. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094; 3. 北京航空航天大学未来空天技术学院/高等理工学院, 北京 100191)

摘要: 针对小卫星星座规模趋向巨型化的发展应用需求, 开展基于遥感卫星的低轨大规模星座概念研究并提出相应的星座分阶段部署方案。首先, 考虑低轨卫星轨道理想容纳卫星数量、星间相互作用、轨道控制精度等因素, 进行低轨大规模星座量级分析, 明确星座规模。在此基础上, 采用人工势函数方法将卫星个体控制拓展至星座整体密度迁移, 实现满足任务需求的星座特定密度分布。结合大规模遥感卫星星座任务特点和建设能力, 提出基于太阳同步轨道、低倾角轨道和大椭圆轨道的混合星座配置方案, 并按照近期、中期和远期分阶段进行部署。对星座部署方案进行仿真, 验证了低轨大规模星座的优势, 为未来巨型星座设计与控制提供一定的参考与借鉴。

关键词: 低轨大规模星座; 巨型星座; 星座部署; 构型设计; 覆盖特性

中图分类号: V412.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2022)S-0001-08

Conceptual Study on Low-Orbit Large-Scale Constellation and Its Phased Deployment Scheme

BAI Xue^{1,3}, WANG Dandan², BAI Zhaoguang², XU Ming¹

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China; 3. Shenyuan Honors College, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: As small satellite constellations are becoming gigantic, the conceptual study on the low-orbit large-scale constellation based on remote sensing satellites and its phased deployment scheme are presented. First, factors such as the ideal number of accommodating satellites, interactions, and the orbital control accuracy in low orbit, the magnitude analysis of low-orbit large-scale constellation are incorporated to clarify the constellation scale. Second, the artificial potential function method is used to extend the satellite individual control to the overall density migration of the constellations, thus a specific density distribution is achieved to meet the mission requirements. Third, combined with the characteristics and construction capabilities of constellation of remote sensing satellites, a hybrid constellation configuration based on Sun-synchronous orbits, low inclination orbits and highly elliptical orbits is proposed. According to the short, medium and long-term requirements, the constellation is deployed in phases. Simulations verify the advantages of the low-orbit large-scale constellations. This study provides certain references for the design and control of mega-constellations in the future.

Key words: low-orbit large-scale constellation; mega-constellation; constellation deployment; configuration design; coverage characteristics

基金项目: 北航未来空天技术学院/高等理工学院卓越研究基金(230121105)。

收稿日期: 2022-07-01; **修订日期:** 2022-09-01

通信作者: 徐明, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xuming@buaa.edu.cn。

引用格式: 白雪, 王丹丹, 白照广, 等. 低轨大规模星座概念研究与分阶段部署方案[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(S): 1-8. BAI Xue, WANG Dandan, BAI Zhaoguang, et al. Conceptual study on low-orbit large-scale constellation and its phased deployment scheme[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S): 1-8.

星座指的是多颗卫星以稳定的空间几何构型组成的协同工作卫星网,如美国GPS、中国北斗等星座能够为全球用户提供导航、定位和授时服务。由于近年来微小卫星技术快速发展,发射成本逐渐降低,使得构建由成千上万个航天器组成的大规模星座成为可能。此类星座的卫星数量远高于传统星座,呈现高密度特点,因此低轨大规模高密度星座概念应运而生。

低轨高密度星座具有覆盖性广、部署灵活、产业拉动强等优点,在国防军事、全球通讯和互联网等多方面存在应用价值^[1-5]。国外SpaceX、波音和OneWeb等商业公司都相继提出了大型星座计划。其中最具代表性的是SpaceX公司的Starlink星座计划,将分3个阶段部署4.2万颗低轨卫星^[6]。中国大型星座建设也已进入发展阶段,卫星互联网计划被纳入“新基建”,诸如“鸿雁星座”“虹云工程”等天基互联网星座计划正在稳步发展建设中^[7]。商业航天公司也提出类似大型星座,例如银河航天的“银河5G”星座计划,九天微星的“天基物联网”计划等。由此,中国低轨巨型星座建设迈开了坚实的第一步^[8]。

作为一个复杂的空间系统,低轨高密度星座的在轨运行管理面临许多技术难题。由于星座规模大、卫星类型多且轨道高度差异大等特点,需要在预期的星座整体构型下通过设计和筛选,合理部署不同类型卫星以满足任务状态下的稳定性要求^[9]。可以考虑采用相应的智能算法对星座中各个卫星轨道要素进行寻优,获得较优构型。其中,遗传算法通过采用多点搜索和概率搜索技术,很大程度上克服一般优化算法容易陷入局部最优点的缺陷,获得系统的全局最优解^[10]。与此同时,星座的长期维持涉及系统性能、重构方式等多种因素,需要综合考虑燃料消耗、重构时间和星座稳定性等重要指标,不同系统的维持策略各有差异,保证系统性能的整体稳定^[11]。此外,大规模星座具有天然的异构特性,其资源属性与能力差异大,资源状态时变,因此资源管控的合理运用也是提高大规模星座系统性能的关键因素^[12]。

本文首先阐述低轨高密度星座的定义与概念,从低轨卫星轨道理想容纳卫星数量的角度开展分析,明确低轨高密度星座的具体量级,给出卫星个体控制与集群系统迁移之间的映射关系。接着,面向基于遥感卫星的高密度星座在不同场景下的应用需求,通过星座轨道、载荷性能、时间效能和覆盖特性等星座参数变化,对低轨高密度星座进行不同类型卫星分阶段部署,提出针对不同卫星载荷的星座配置方案。

1 低轨高密度星座概念

区别于传统导航星座,低轨高密度星座由于其星座规模大、卫星类型多、轨道高度差异大等特点,动力学特性以及轨道控制方法难度较高。因此,从低轨卫星轨道理想容纳卫星数量、卫星相互作用和轨道控制精度等角度开展分析,明确高密度星座的具体规模。此外,分析高密度星座个体之间的相互作用关系,采用人工势函数方法将卫星个体控制拓展至星座整体迁移,通过星座密度反映卫星的时空分布,设计满足任务需求的星座构型。

1.1 低轨高密度星座量级分析

低轨高密度星座规模庞大,需要定义星座卫星具体量级,明确高密度星座的规模。

已知轨道高度为500~2 000 km的低轨星座最为常见,以此高度内100 km作为区间,研究星座分布规律与密度变化。低轨高密度星座主要考虑以下4个因素:

(1) 相对安全距离 R_s :为了避免由于地球摄动力、轨道初始误差、机动过程偏差和轨道状态观测误差等因素造成的卫星位置不确定,进而引起星座星间碰撞,星座卫星需要设置相对安全距离。

(2) 相对控制精度 ϵ_r :星座卫星通过星间自主控制进行相对距离的保持,但受限于星载测量仪器,实际过程中存在一定的控制精度误差。

(3) 测量误差 ϵ_m :星座卫星的绝对与相对位置速度状态制约着星座整体密度迁移与演化,其数据主要通过地面测控和星间测距仪获取,过程中的测量误差不可避免。

(4) 可用空间百分比 P :受限于星座部署能力与太空环境保护因素,星座可用于部署大规模卫星的空间资源存在一定限制。

因此,轨道高度为 $h\sim(h+100)$ km区间内可容纳卫星的理想数量 N_{\max} 由相对安全距离 R_s 、卫星相对控制精度 ϵ_r 、测量误差 ϵ_m 和可用空间百分比 P 共同决定。

$$N_{\max} = \frac{\frac{4}{3}\pi(R_2^3 - R_1^3)}{\frac{4}{3}\pi(R_s + \epsilon_r + \epsilon_m)^3} P = \frac{R_2^3 - R_1^3}{(R_s + \epsilon_r + \epsilon_m)^3} P \quad (1)$$

式中 R_1 与 R_2 分别为轨道高度区间上下界的轨道半长轴,即 $R_1 = R_c + h$, $R_2 = R_c + h + 100$ 。

当相对安全距离 $R_s = 40$ km、卫星相对控制精度 $\epsilon_r = 150$ m,测量误差 $\epsilon_m = 50$ m,可用空间百分比 $P = 50\%$ 时,星座500~2 000 km轨道高度区间内不同高度容纳卫星的理想数量如图1所示。可以得到星座500~600 km轨道高度区间容纳卫星的

理想数量为 $N_{\max}=110\ 600$ 。500~600 km 轨道高度区间容纳卫星的理想数量与相对安全距离 R_s 的关系如图2所示。

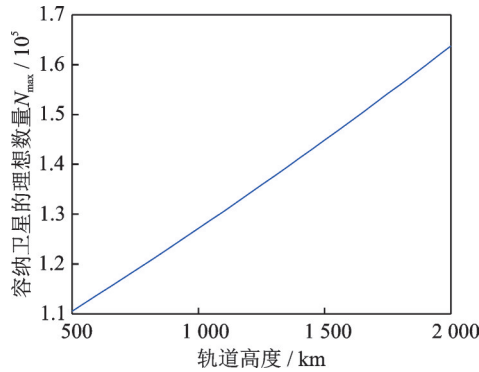


图1 容纳卫星的理想数量与轨道高度的关系

Fig.1 Relationship between ideal number of satellites and orbital altitude

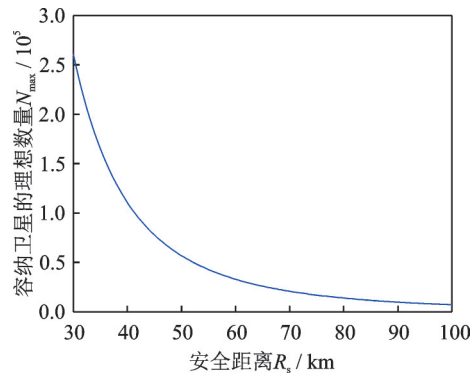


图2 容纳卫星的理想数量与相对安全距离的关系

Fig.2 Relationship between ideal number of satellites and relative safe distance

1.2 低轨高密度星座星间势函数

对于低轨高密度星座,星群的整体迁移通过卫星个体的轨道控制实现,分为绝对位置和相对位置控制。基于绝对位置的轨道控制目前发展成熟,但基于相对位置的控制需要考虑星座高密度的特性,确保星座性能满足任务需求。本文采用人工势函数建立星座个体之间的相互作用关系,将维持高密度星座的控制力视为星座自身固有性质,将星座整体迁移与个体控制联系起来,对于星座长期稳定运行具有重要意义。

人工势函数,即能够反映整个状态空间环境的标量函数。该势场并不真实存在,需要通过位置向量进行定义,包括引力势函数与斥力势函数。利用引力/斥力势场描述星座系统个体之间的相互作用,二者叠加共同组成星座整个系统的势场模型。对于低轨高密度星座,由于讨论群体演化规律,不存在目标点,因此只考虑斥力势场。通过人工势函数设计星间自主控制率,能够实现星座卫星个体状

态的控制。

斥力势函数取决于星座卫星之间的距离。一般斥力势函数在接近其他卫星时很大,远离时很小。此处采用高斯函数描述斥力势函数

$$\phi_{ri} = \frac{1}{2} \phi_i \exp \left[-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{o,i})^T N_i (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{o,i})}{\sigma_i} \right] \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r}_{o,i}$ 为第 i 个卫星的质心状态; 参数 ϕ_i 和 σ_i 分别为与第 i 个卫星的斥力势函数有关的高度和宽度; N_i 为正定对称矩阵。

当系统中含有 n 个航天器时,根据人工势函数定义可知,整个系统的人工势函数可以表示为

$$\phi = \sum_{i=1}^n \phi_{ri} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \phi_i \exp \left[-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{o,i})^T N_i (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{o,i})}{\sigma_i} \right] \quad (3)$$

系统内部质量为 m_i 的卫星,其力场可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_i &= -m_i \nabla_r \phi = \\ &= -m_i \sum_{i=1}^n \frac{\phi_i}{\sigma_i} \exp \left[-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{o,i})^T N_i (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{o,i})}{\sigma_i} \right] \cdot \\ & \quad (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{o,i})^T N_i \end{aligned} \quad (4)$$

1.3 低轨高密度星座集群迁移

在低轨高密度星座系统中,假设内部个体活动是自发性的,不需要中心控制及组织。研究星座卫星的时空分布,需要从整体视角,以星座密度为参量,研究集群整体密度迁移控制。

考虑低轨高密度星座分布在以下三维空间域:

$$\Omega: = \{(x, y, z) \in \mathbf{R}^3 | 0 < x < l_x, 0 < y < l_y, 0 < z < l_z\}$$

式中 l_x 、 l_y 、 l_z 分别为空间域 x 、 y 、 z 方向的特征长度。定义密度 $\rho(t, x, y, z)$ 为低轨高密度星座 t 时刻单位体积内航天器平均数量; 定义聚集度 $\theta(t, x, y, z)$ 为 t 时刻执行任务时特定地区星座目标密度。当高密度星座执行局部覆盖任务时,星座发生群体迁移,局部密度发生变化,目标密度即为星座聚集度,高密度星座迁移示意图如图3所示。

定义误差函数:

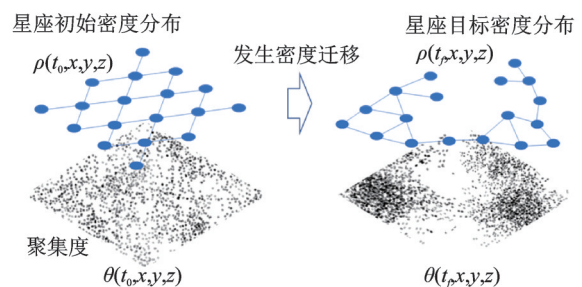


图3 高密度星座迁移示意图

Fig.3 Diagram of high-density constellation migration

$$L(t) = \frac{1}{2} \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} \int_0^{t_3} [\rho(t, x, y, z) - \theta(t, x, y, z)]^2 dz dy dx \quad (5)$$

考虑制定最优制导律,以便将误差函数 $L(t)$ 趋近于零,使高密度星座根据任务需求向目标聚集度进行密度迁移。星座密度可以写作

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - K(\rho - \theta) \quad (6)$$

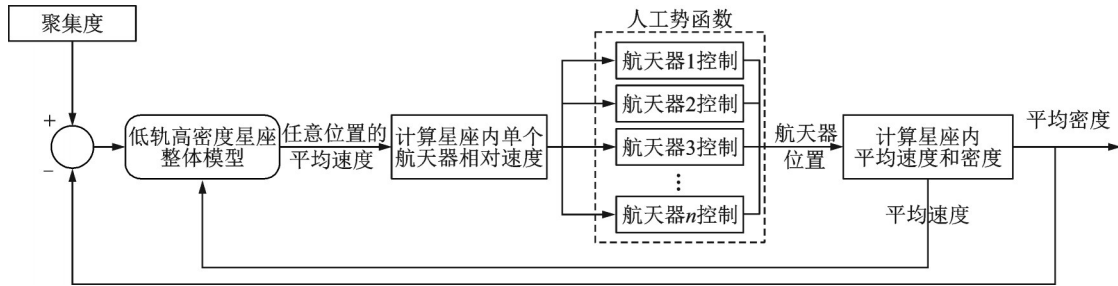


图4 低轨高密度星座密度迁移与卫星控制的关系

Fig.4 Relationship between density migration and satellite control of low-orbit high-density constellation

2 低轨高密度星座部署方案

基于遥感卫星的低轨高密度星座规模庞大,所含卫星数目众多,受制于任务特点和用户需求等因素,轨道类型、轨道面分布、高度和重访覆盖等特性会在星座构型优化之前确定。由于现有发射水平的限制,不能将低轨高密度星座所有卫星在短时间内同时发射入轨,因此需要考虑大规模星群分阶段部署的效能递进式构型优化设计。

由于低轨高密度星座系统成本高、部署周期长,提出了分阶段实施方案。星座主要采用“骨干星座”+“加强星座”相结合的方式,按照三阶段星座发展定位进行部署。“加强星座”卫星的主要目的是增加星座对地覆盖时间,减少覆盖间隔和重访时间,以此实现低轨高密度星座的实时覆盖需求。面向星座建设发展需求,首先以 Walker 星座为基础,通过优化星座卫星数目与倾角,确定低轨高密度星座中“骨干星座”的轨道要素;之后以“骨干星座”为中心,进行“加强星座”航天器的相对轨道要素优化,从而确定低轨高密度星座长期完整构型,实现星座方案设计。图5为低轨高密度星座部署流程,具体的部署方案如下:

近期(第1阶段):部署 850~700 km“骨干星座”。主要由不同卫星类型的 Walker 星座组成,满足重点覆盖纬度区域对于视场角、重访时间和覆盖时间的“小时级”需求。

中期(第2阶段):部署 650~600 km“骨干星

座”。继续部署 Walker 星座,加强星座全球覆盖与重访能力,满足“分钟级”需求;

远期(第3阶段):部署 550~500 km“骨干星座”和“加强星座”。继续部署 Walker 星座,并在原有的星座基础上,通过星座主星释放一定数量的微纳卫星,使其散布在主星附近,构成“加强星座”,提高单颗星的观测能力,进一步改善星座的灵活性和可拓展性,满足“秒级”需求,实现全球实

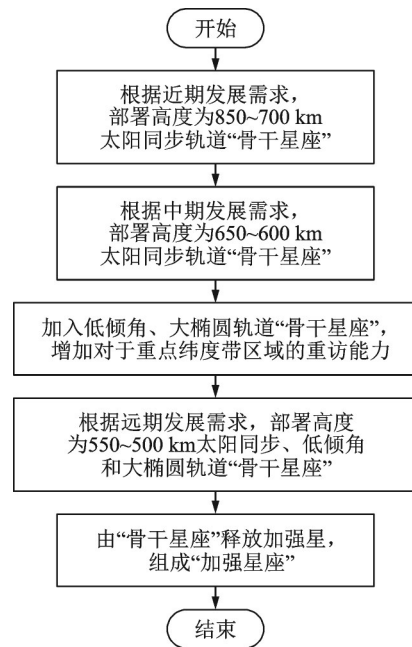


图5 低轨高密度星座部署流程

Fig.5 Deployment process of low-orbit high-density constellation

时”。继续部署 Walker 星座,加强星座全球覆盖与重访能力,满足“分钟级”需求;

远期(第3阶段):部署 550~500 km“骨干星座”和“加强星座”。继续部署 Walker 星座,并在原有的星座基础上,通过星座主星释放一定数量的微纳卫星,使其散布在主星附近,构成“加强星座”,提高单颗星的观测能力,进一步改善星座的灵活性和可拓展性,满足“秒级”需求,实现全球实

时覆盖。

3 低轨高密度星座配置方案

合理配置基于遥感卫星的低轨高密度星座能够显著提升成像能力和观测灵活性,实现全球覆盖。不同阶段部署的卫星类型相同,卫星星座类型主要包括8种,卫星编号和相应的载荷类型如表1所示。经过优化后,低轨高密度星座不同阶段卫星类型配置数量如图6所示。

表1 低轨高密度星座卫星载荷类型

Table 1 Satellite payload type of low-orbit high-density constellation

卫星编号	载荷类型
光学卫星1(光学1)	可见红外一体化高分载荷
光学卫星2(光学2)	宽视场成像仪
光学卫星3(光学3)	高超一体成像光谱仪
光学卫星4(光学4)	激光雷达
微波卫星1(微波1)	合成孔径雷达(SAR)
微波卫星2(微波2)	微波散射计
微波卫星3(微波3)	微波辐射计
微波卫星4(微波4)	全极化GNSS-R接收机

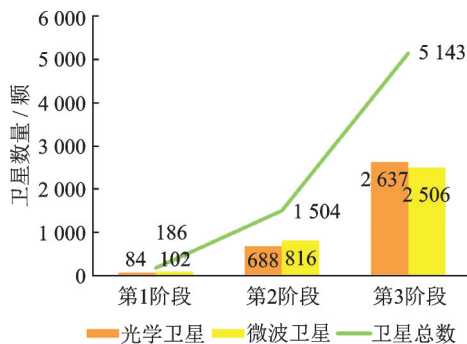


图6 不同阶段星座卫星类型配置数量
Fig.6 Number of different type satellites

本文以覆盖性能为目标函数,利用遗传算法对卫星构型参数进行优化,采用MATLAB与STK互连的方式对星座设计过程进行仿真。首先由MATLAB中的优化程序把星座轨道参数传递给STK,STK根据设定仿真参数建立仿真场景并计算星座对目标区域的覆盖性能,然后将计算结果返回给MATLAB,MATLAB根据这些结果确定遗传算法种群中个体的适应值,再应用算法生成子代种群,继续作为星座轨道参数传递给STK,如此循环,直至得到最优构型。

3.1 星座近期建设配置方案

第1阶段近期建设的轨道类型以太阳同步轨道(Sun-synchronous orbit, SSO)为主。SSO是一类近极轨道,能够在所有纬度提供连续覆盖,轨道

平面夹角相对太阳矢量保持不变,保证卫星每天在相同的光照条件下运行,稳定环境温度,降低卫星在解决温度环境变化方面的设计成本。此外,SSO能够提供大范围的轨道高度选择,在近极轨道覆盖带的卫星碰撞概率低。表2给出近期建设星座配置方案。图7给出近期建设星座示意图。

表2 近期建设星座配置方案(SSO)

Table 2 Short-term constellation configuration (SSO)

编号	总数	轨道类型	高度/km	轨道面数
光学1	30	SSO	800	5
光学2	30	SSO	850	5
光学3	12	SSO	750	3
光学4	12	SSO	700	3
微波1	30	SSO	810	5
微波2	30	SSO	840	5
微波3	12	SSO	830	3
微波4	30	SSO	790	5

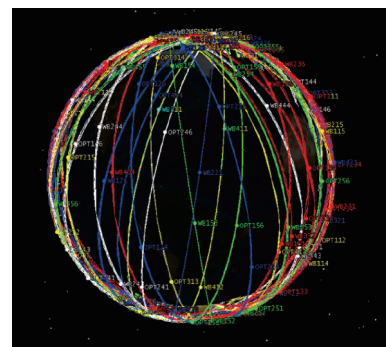


图7 近期建设星座示意图

Fig.7 Diagram of short-term constellation

光学卫星1、光学卫星2、微波卫星1、微波卫星2、微波卫星4这5种卫星类型对于覆盖性能要求较高,重访时间较短,所需相应的星座数目较其他种类更多,均采用Walker- δ 星座30/5/2构型,升交点赤经均匀分布;光学卫星3、光学卫星4、微波卫星3采用Walker- δ 星座12/3/4构型。覆盖性能如图8所示,仿真结果表明,设计优化所得的构型均满足重访周期和覆盖周期要求。根据各个星座平均覆盖时间随纬度分布情况可以得到,星座满足全球连续覆盖要求。覆盖特性呈现典型的纬度相关性,即全球同一纬度的区域在覆盖上具有强相关

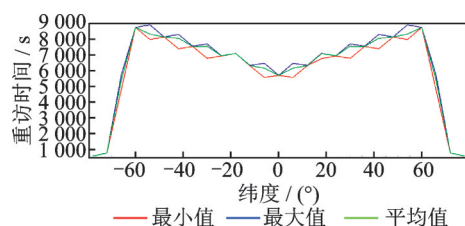


图8 近期建设星座覆盖性能

Fig.8 Coverage performance of short-term constellation

性,且在纬度 $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内,覆盖性能较好,分布较为平均,在极地附近可形成最优的覆盖。

3.2 星座中期建设配置方案

第2阶段中期部署与近期方案相比,光学卫星1、光学卫星2、微波卫星1、微波卫星4增加了轨道倾角为 60° 的低倾角轨道(Low inclination orbit, LIO),LIO有较短的周期,较好的星下点轨迹间隔与重复覆盖特性,有助于提高低纬度的覆盖性能,满足对中低纬度地区的完全连续覆盖。此外,增加大椭圆轨道(Highly elliptical orbit, HEO)实现对于中国境内的实时覆盖。HEO在远地点附近长期驻留,适用于区域覆盖的卫星轨道,有效增加亚太地区精度和覆盖时间。对HEO卫星而言,星下点地理经度是决定卫星相对于覆盖区域位置的主要因素。一般来讲,多颗HEO卫星会设计为几个具有相同星下点轨迹且分布均匀的星座。表3给出中期建设星座配置方案(SSO, LIO)。表4给出中期建设星座配置方案(HEO)。图9给出中期建设星座示意图。

光学卫星1、光学卫星2、微波卫星1、微波卫星4这4种卫星类型数目较其他种类更多。不同卫星星座类型,升交点赤经均匀分布。HEO卫星实现对于中国境内的重点区域覆盖。覆盖性能如图10所示,仿真结果表明,设计优化所得的构型均满足重访周期和覆盖周期要求。根据各个星座平均覆

表3 中期建设星座配置方案(SSO, LIO)

Table 3 Medium-term constellation configuration (SSO, LIO)

编号	总数	轨道类型	高度/km	轨道面数
光学1	143	SSO	600	13
	100	LIO	550	10
光学2	90	SSO	650	11
	121	LIO	550	9
光学3	99	SSO	575	11
光学4	99	SSO	610	11
微波1	143	SSO	610	13
	100	LIO	550	10
微波2	143	SSO	590	13
微波3	169	SSO	570	13
微波4	100	SSO	580	13
	143	LIO	550	10

表4 中期建设星座配置方案(HEO)

Table 4 Medium-term constellation configuration (HEO)

编号	总数	近地点高度/km	远地点高度/km	升交点经度/ $(^{\circ})$
光学1	18			$20 + N_i \times 20$
光学2	18	300	2 000	$(N_i=0, 1, \dots, 17)$
微波4	18			

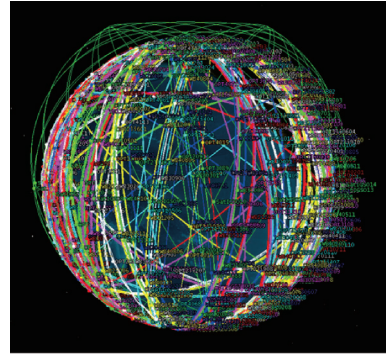


图9 中期建设星座示意图

Fig.9 Diagram of medium-term constellation

盖时间随纬度分布情况可以得到,星座满足全球连续覆盖要求,覆盖特性呈现典型的纬度相关特性,在纬度 $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内覆盖性能较好,分布较为平均。在极地附近可形成最优的覆盖。值得一提的是,由于对部分卫星星座类型部署低倾角轨道,大大改善了纬度 $-35^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 范围内的覆盖性能,实现对于低纬度地区的实时连续覆盖。大椭圆轨道卫星实现对于中国境内(经度范围为: $73^{\circ}33'E\sim 135^{\circ}05'E$,纬度范围为: $3^{\circ}51'N\sim 53^{\circ}33'N$)的重点区域实时覆盖。

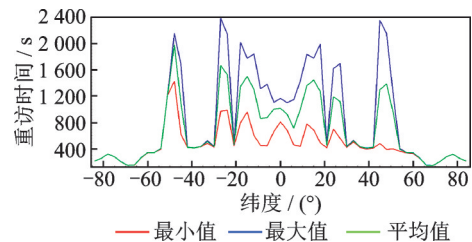


图10 中期建设星座覆盖性能

Fig.10 Coverage performance of medium-term constellation

3.3 星座远期建设配置方案

第3阶段远期建设主要部署SSO、LIO、HEO。其中,HEO卫星星下点地理经度分布在远地点附近时间较长,适用于对全球重点纬度区域覆盖,采用36颗卫星升交点经度间隔 10° 的均布构型,有效增加纬度 $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 精度和覆盖时间。表5给出远期建设星座配置方案(SSO, LIO)。表6给出远期建设星座配置方案(HEO)。

在近中期完成“骨干星座”卫星部署后,远期星座部署除“骨干星座”外,增加“加强星座”,提高星座对地覆盖时间,减少覆盖间隔和重访时间,以此实现低轨高密度星座的实时覆盖需求。“加强星座”卫星根据“骨干星座”卫星进行配置,以“骨干星座”卫星作为基准星,“加强星座”卫星相对基准星的主要差异为相对升交点赤经和相对相位。本方案对每一颗“骨干星座”卫星增加3

表5 远期建设星座配置方案(SSO,LIO)

Table 5 Long-term constellation configuration (SSO,LIO)

编号	总数	轨道类型	高度/km	轨道面数
光学1	360	SSO	450	18
	340	LIO	500	17
光学2	360	SSO	450	18
	400	LIO	550	20
光学3	480	SSO	520	24
光学4	625	SSO	520	25
微波1	360	SSO	510	20
	320	LIO	450	16
微波2	450	SSO	550	30
微波3	480	SSO	550	32
微波4	360	SSO	450	18
	500	LIO	540	20

表6 远期建设星座配置方案(HEO)

Table 6 Long-term constellation configuration (HEO)

编号	总数	近地点高度/km	远地点高度/km	升交点经度/(°)
光学1	36			$20 + N_i \times 10$
光学2	36	300	2000	$(N_i=0, 1, \dots, 35)$
微波4	36			

颗“加强星座”卫星,升交点赤经差和纬度幅角差见表7。图11给出远期建设星座示意图。覆盖性能如图12所示,均匀分布的星座实现了全球南北纬60°范围的连续覆盖,提供了任意时间下多重覆盖。

表7 远期建设“加强星座”配置方案

Table 7 Long-term reinforced constellation configuration

编号	相对位置差/(°)	LIO	SSO
加强星1	升交点赤经差	-2	-2
	纬度幅角差	0	-1
加强星2	升交点赤经差	2	2
	纬度幅角差	0	-1
加强星3	升交点赤经差	0	0
	纬度幅角差	2	2

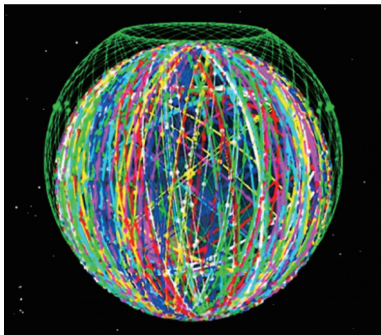


图11 远期建设星座示意图

Fig.11 Diagram of long-term constellation

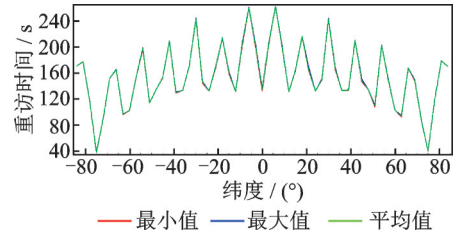


图12 远期建设星座覆盖性能

Fig.12 Coverage performance of long-term constellation

4 结 论

针对基于遥感卫星的低轨高密度星座规模大、卫星类型多且轨道高度差异大等特点,本文分析高密度星座个体之间的相互作用关系,构建低轨高密度星座个体控制与整体迁移的关系,从低轨卫星轨道理想容纳卫星数量、卫星相互作用、轨道控制精度等角度开展分析,明确高密度星座的具体规模。

星座部署方面,提出基于太阳同步轨道、低倾角轨道和大椭圆轨道的混合星座配置方案,采用“骨干星座”+“加强星座”相结合的方式,按照近期、中期和远期星座发展定位进行部署,确定基于遥感卫星的低轨高密度星座长期完整构型,增强星座全球覆盖与重访能力,提高星座的长期稳定效能。仿真结果验证了低轨大规模星座分阶段部署方案在全球覆盖性能上具有优势。

参考文献:

- [1] 陈东,裴胜伟,黄华,等.全球巨型低轨星座通信网络发展、特征与思考[J].国际太空,2020,4:42-47. CHEN Dong, PEI Shengwei, HUANG Hua, et al. Development, characteristics and thinking of the global giant Leo constellation communication network[J]. Space International, 2020, 4: 42-47.
- [2] 刘家川,杜辉,王冀莲,等.低轨巨型星座国际协调机制需求分析[J].航天器工程,2021,30(4):134-141. LIU Jiachuan, DU Hui, WANG Jilian, et al. Requirements analysis on establishment of international coordination mechanisms on LEO large constellations[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(4): 134-141.
- [3] 钟磊.低轨星座通信网络边缘计算架构研究[D].成都:电子科技大学,2020. ZHONG Lei. Research on edge computing architecture of LEO constellation communication network [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [4] 王迪,骆盛,毛锦,等.Starlink卫星系统技术概要[J].航天电子对抗,2020,36(5):51-56. WANG Di, LUO Sheng, MAO Jin, et al. Overview of Starlink satellite system technology[J]. Space Electronic Countermeasure, 2020, 36(5): 51-56.

- [5] 邹明, 赵子骏, 魏凡. 新兴低轨卫星通信星座发展前景研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(12): 1155-1162.
ZOU Ming, ZHAO Zijun, WEI Fan. Research on the development prospect of emerging low earth orbit satellite communication constellations[J]. Journal of CAEIT, 2020, 15(12): 1155-1162.
- [6] 梁晓莉, 李云. “星链”星座最新发展分析[J]. 卫星与网络, 2019(8): 40-43.
LIANG Xiaoli, LI Yun. Analysis of the latest development of “Starlink” constellation[J]. Satellites and Networks, 2019(8): 40-43.
- [7] 云朝明, 胡敏, 宋庆雷, 等. 巨型低轨星座安全性研究及其规避机动策略综述[J]. 空间碎片研究, 2020, 20(3): 17-23.
YUN Zhaoming, HU Min, SONG Qinglei, et al. Security research and maneuver avoidance strategy of LEO constellation[J]. Space Debris Research, 2020, 20(3): 17-23.
- [8] 冯昊, 周静, 田百义. 巨型商业星座对低轨导航星座轨道资源影响分析[C]//第十二届中国卫星导航年会. 南昌:[s.n.], 2021: 60-66.
FENG Hao, ZHOU Jing, TIAN Baiyi. Analysis of the influence of giant commercial constellations on orbit resources of LEO navigation constellations[C]// Proceedings of the 12th Annual Conference of China Satellite Navigation. Nanchang:[s.n.], 2021: 60-66.
- [9] 阮永井, 胡敏, 云朝明. 低轨巨型星座构型设计与控制研究进展与展望[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(1): 1-15.
RUAN Yongjing, HU Min, YUN Zhaoming. Advances and prospects of the configuration design and control development of the LEO mega-constellations[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(1): 1-15.
- [10] 李志武, 何艳超, 吕秋杰, 等. 多变量全局寻优与智能优化在星座组网中的应用[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(2): 70-75.
LI Zhiwu, HE Yanchao, LYU Qiujie, et al. Application of multi-variate global optimization and intelligent optimization in constellation design[J]. Chinese Space Science and Technology, 2020, 40(2): 70-75.
- [11] 杨洋, 董绪荣, 范丽, 等. 混合导航星座卫星重构方法研究[J]. 上海航天, 2012, 29(4): 19-21.
YANG Yang, DONG Xurong, FAN Li, et al. Research on hybrid navigation constellation reconfiguration method[J]. Aerospace Shanghai, 2012, 29(4): 19-21.
- [12] 周笛, 盛敏, 郝琪, 等. 巨型星座系统的网络运维与资源管控技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 26-35.
ZHOU Di, SHENG Min, HAO Qi, et al. Network operation, maintenance and resource management in mega constellation system[J]. Space Integrated Ground Information Networks, 2020, 1(1): 26-35.

(编辑:陈珺)