DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.05.003

# 非静止轨道通信卫星星座间同频干扰概率分析

刘慧梁<sup>1,2</sup>,孙 茜<sup>1,2</sup>,楚 尧<sup>3</sup>,彭 菲<sup>1,2</sup>,鲍晓月<sup>1,2</sup>, 江 帆<sup>1,2</sup>,张馨予<sup>1,2</sup>,田 蕾<sup>1,2</sup>,吕红剑<sup>1,2</sup>,蔡亚星<sup>1,2</sup>

(1.中国空间技术研究院 通信与导航卫星总体部,北京 100094;
2.国家航天局 卫星通信系统创新中心,北京 100094
3.启元实验室,北京 100095)

摘 要:随着全球非静止轨道(non-geostationary orbit, NGSO)通信星座系统的大规模部署及应用,使用相同频率的星座系统之间存在着相互干扰的风险。NGSO系统间同频干扰概率的有效评估方法及合理评价指标是评估干扰风险及设计规避策略的基础,通过分析星座构型与地面站可视空域内卫星出现概率分布特性的关系,利用地面站接收端干扰噪声比保护阈值,建立了概率评估参数指标,并以OneWeb系统、O3b系统以及SpaceX系统为例,分析了全球范围地面站不同NGSO系统间发生有害干扰的概率分布特性。当系统间卫星出现概率分布趋同,会使有害干扰概率增加;反之,不同NGSO系统卫星在可视空域出现概率分布的较大差异会有效降低有害干扰概率。
 关键词:非静止轨道(NGSO)卫星;通信星座;同频干扰;概率分析
 中图分类号:V443;TN927

# Probabilistic analysis of co-frequency interference between non-geostationary satellite systems

LIU Huiliang<sup>1,2</sup>, SUN Qian<sup>1,2</sup>, CHU Yao<sup>3</sup>, PENG Fei<sup>1,2</sup>, BAO Xiaoyue<sup>1,2</sup>, JIANG Fan<sup>1,2</sup>, ZHANG Xinyu<sup>1,2</sup>, TIAN Lei<sup>1,2</sup>, LV Hongjian<sup>1,2</sup>, CAI Yaxing<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Telecommunication and Navigation Satellites, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

2. Innovation Center of Satellite Communication System, China National Space Administration, Beijing 100094, China;

3. Qiyuan Laboratory, Beijing 100095, China)

Abstract: With the deployment and application of mega non-geostationary orbit (NGSO) systems around the world, there is a risk of mutual interference between different NGSO systems. Probabilistic analysis of co-frequency interference between NGSO systems with effective methods and reasonable specifications is the basis of the interference and countermeasure design. In this work, the analysis of the relationship between NGSO system configuration and satellite appearance probability distribution in the field of view is presented. Based on the protection threshold of interference-noise ratio at the receiver of the ground station, the evaluation characteristics are established. Taking OneWeb system, O3b system and SpaceX system as examples, the probability distribution characteristics of harmful interference occurring between different NGSO systems are analyzed. The probability of harmful interference increases when the probability distribution of satellite occurrence is similar between systems, whereas the probability distribution of harmful interference is mitigated effectively when the probability distribution of satellite occurrence of NGSO systems is notably different in the field of view of ground stations.

**Key words**: non-geostationary orbit satellite; communication system; co-frequency interference; probabilistic analysis

**引用格式:**刘慧梁,孙茜,楚尧,等.非静止轨道通信卫星星座间同频干扰概率分析[J]. 空间电子技术,2022,19(5):29-35+67. LIU H L,SUN Q,CHU Y, et al. Probabilistic analysis of co-frequency interference between non-geostationary satellite systems

收稿日期:2022-04-25; 修回日期:2022-06-01

基金项目:中国科协青年人才托举工程项目(编号:2021QNRC001)

<sup>[</sup>J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(5):29-35+67.

## 0 引言

随着空间信息网络技术的发展,越来越多的国 家或企业开始重视发展低轨卫星通信系统。截至 2022年,数量庞大的非静止轨道(non-geostationary orbit,NGSO)卫星星座已经相继部署,且呈持续快速 攀升状态<sup>[1-2]</sup>。轨道和频率是通信卫星能够正常运 行的先决条件,随着卫星频率和轨道资源的日益拥 挤,NGSO卫星星座面临着与静止轨道(geostationary orbit,GSO)卫星系统、地面业务,以及其他 NGSO 卫 星星座的频率共存问题,频率资源形势非常严峻, 潜在的干扰风险将会逐渐增加。开展系统间频率 干扰概率分析并针对潜在有害干扰进行预规划设 计,已经成为 NGSO 卫星网络系统建设的重要 环节<sup>[3-5]</sup>。

针对 NGSO 系统对 GSO 系统的干扰问题,目前 已形成了较为完善的分析方法及干扰评估体系,例 如:国际电联(International Telecommunication Union,ITU)建议书 ITU-R S. 1323 中的 I/N(Interference/Noise)干扰指标评价体系<sup>[6]</sup>,以及 ITU 规则第 22 条当中的等效功率通量密度(effective power flux density,EPFD)指标评价体系等<sup>[7]</sup>。基于成熟的干 扰评估体系及 NGSO 系统对 GSO 系统最恶劣干扰 场景的分析,众多研究者已构建了系统间干扰规避 方法,其中具有里程碑意义的是以 OneWeb 为代表 的 NGSO 卫星星座操作者提出的渐进俯仰(progressive pitch)规避策略,通过调整 NGSO 卫星在低纬度 地区的姿态,通过增大隔离角的方式消除对高轨卫 星的干扰。

与 GSO 系统相对静止的特点不同,NGSO 系统 具有卫星位置高动态性、干扰链路行为复杂的特 征,因此 NGSO 系统间的频率干扰场景建模分析将 变得十分复杂。ITU 在相关建议书中对理想条件下 NGSO 星座系统中卫星位置概率分析模型进行了初 步探索<sup>[8-9]</sup>,但针对 NGSO 系统间有害干扰概率分 析方法,国际上并没有统一的规则、标准、解决方案。

在此背景下,深入研究了 NGSO 系统间同频干 扰概率分析方法,建立了基于可视空域卫星出现概 率的分析体系,并在此基础上提出了 NGSO 系统间 同频有害干扰概率分析模型,该方法适用于不同 NGSO 系统间同频干扰分析。以 OneWeb 卫星网 络、O3b 卫星网络以及 SpaceX 的 STEAM-2B 卫星网 络参数为例,展示了所提出的同频干扰分析的仿真 结果,验证了不同星座轨道构型对干扰概率分布的 影响,并分析了基于空域预划分的干扰规避策略对 NGSO 卫星系统间频谱共享的有效性。

## 1 星座构型与分布概率

目前 NGSO 通信卫星星座大部分采用 Walker 星座构型,本文旨在探索星座构型对 NGSO 系统间 同频干扰发生概率的影响,故选取 3 个典型的单一 构型 Walker 星座系统作为研究对象,具体通信系统 的轨道参数如表 1 所列。其中,OneWeb 星座系统 包括 720 颗卫星,轨道高度 1200 km,倾角为 87.9°<sup>[10]</sup>,构型如图 1 中蓝色点表示;O3b 星座系统 包括 24 颗卫星,轨道高度 8062 km,倾角为 0°<sup>[11]</sup>, 构型如图 1 中绿色点表示;SpaceX(STEAM-2B)星 座系统包括 1600 颗卫星,轨道高度 1150 km,倾角 为 53°<sup>[1]</sup>,构型如图 1 中红色点表示。

表 1 非静止轨道通信星座轨道参数 Tab. 1 Orbit parameters of NGSO satellite systems

报送公司	]	OneWeb	03b	SpaceX
卫星网络名词	J	L5	O3b-A	STEAM-2B
轨道平面总数	(/个	18	1	32
每轨道卫星数	/颗	40	24	50
轨道高度/km		1 200	8062	1 1 5 0
轨道倾角/(°)	)	87.9	0	53



图 1 星座构型示意图(蓝色:OneWeb 星座, 绿色:O3b 星座,红色:SpaceX 星座) Fig. 1 Schematic of the NGSO satellite systems (blue:OnewWeb, green:O3b,red;SpaceX)

#### 1.1 卫星出现概率

在卫星系统干扰分析中,除基于轨道外推的时域统计方法外,利用卫星分布概率确定星座空间位置关系、模拟概率分布曲线,是完成星座系统性能优化及干扰评估的一种重要方法<sup>[12]</sup>。在ITU建议书ITU-RS.1527中,推导了特定轨道卫星在确认空域的出现概率以及星座空间分布规律。之后相关研究也展示了基于空间位置概率法与轨道外推获取的结果几乎

一致,且大大提升了仿真计算效率[13-14]。



图 2 地面终端可视空域划分示意图 Fig. 2 Schematic of the field of view (FOV) division of the user terminal on earth 本小节将研究卫星出现概率随仰角、方位角的 变化规律。首先将任意地面终端可视空域划为更 小的子空域。如图 2 所示,以边长为 10.5°的正六 边形为网格划分可视空域,正六边形单元紧密排 列,各区域中心呈三角形排布,共得到 85 个子空域, 方位角 0°表示正北方向,90°表示正东方向,180°表 示正南方向,极轴长度表示仰角范围,坐标中心点 表示地面终端正上方,即仰角为 90°。将表 1 中不 同构型星座分别代入基于轨道外推的时域统计模 型及基于 ITU-R S. 1527 的空间概率分布模型<sup>[8]</sup>,并 选取北纬 0°、30°和 60°三个地面终端观测位置,得 到空间概率分布分析结果如图 3 所示。





Fig. 3 Simulation results of the NGSO satellite distribution in the field of view (FOV) of the user terminal at different latitude on earth for (a) OneWeb (b) O3b (c) SpaceX.

## 1.2 星座空间概率分布仿真结果

OneWeb 卫星星座在不同纬度地面终端可视空 域概率分布如图 3(a)所示,结果中圆圈位置表示子 空域中心,颜色图例表示该 NGSO 系统卫星出现在 子空域的概率,方位角 0°表示正北方向,极轴长度 表示仰角范围,坐标中心点表示地面终端正上方, 即仰角为 90°。当地面终端位于 0°N 时,正上方空 域卫星出现概率最低,随着仰角降低,四周子空域 卫星出现概率逐渐增加。当地面终端位于 30°N 及 60°N 时,随着地面终端纬度增加,图中北方的卫星 出现概率会逐渐高于南方。

O3b 卫星星座在不同纬度地面终端可视空域概 率分布如图 3(b)所示,由于 O3b 星座倾角为0°,其 空间分布概率结果和 OneWeb 近极轨道星座表现出 较大差异。当地面终端位于 0°N 时,卫星出现概率 大于0 的子空域沿东西方向分布,即方位角 90°及 270°方向,其他子空域卫星出现概率为0。当地面 终端位于 30°N 时,随着地面终端纬度增加,图中卫 星出现概率大于0 的区域会逐渐移向南方。当地面 终端位于 60°N 时,仅正南方向低仰角区域的两个 子空域的卫星出现概率大于 40%。

SpaceX 卫星星座在不同纬度地面终端可视空 域概率分布如图 3(c)所示,由于 SpaceX 星座倾角 为53°,其空间分布概率结果和之前所述近极轨道 星座以及 0°倾角星座也表现出一定差异。当地面 终端位于 0°N时,正上方空域卫星出现概率最低, 随着仰角降低,四周子空域卫星出现概率逐渐增 加,由于 SpaceX 星座包含卫星数量远高于其他两星 座,所以在视场边缘卫星出现概率约为 100%。当 地面终端位于 30°N时,随着地面终端纬度增加,图 中北方的卫星出现概率会略高于南方。当地面终 端位于 60°N时,可视范围内南方大部分区域卫星 出现概率约等于 100%,北方区域概率为 0,若地面 终端继续向北移动,将接近覆盖区边缘。倾斜轨道 星座的覆盖区极限范围由星座倾角及高度共同 决定。

以上星座空间概率分布的仿真结果均与理论 分析结果相一致。

## 2 星座间同频干扰概率分析

### 2.1 干扰评价指标

对于 NGSO 星座系统对其他通信系统的干扰评

价标准,学术界以及工业界已开展了大量基础研究 工作。例如 NGSO 系统对 GSO 系统的干扰分析,基 于 ITU 建议书 ITU-R S. 1503 中分析方法<sup>[15]</sup>,可计 算 NGSO 星座系统等效功率通量密度 EPFD,其对 GSO 保护的合规限值 epfd ↓、epfd ↑ 以及 epfd<sub>is</sub>,在 ITU《无线电规则》第 22 条中有详细规定,从而形成 了较为完善的系统间干扰分析方法。此外,基于 ITU 建议书 ITU-R S. 1323 中考虑集总干扰的分析 方法,系统间由干扰引起的等效噪声温度变化需小 于等于接收系统噪声的 6%,即 $\Delta T/T \leq 6\%$ ,这一干 扰评价指标也可等效为干扰噪声比小于等于 – 12. 2 dB,即  $I/N \leq -12.2$  dB。

以上干扰评估标准及计算方法均针对 NGSO 系 统与 GSO 系统,对于 NGSO 系统间有害干扰概率评 估方法及指标限值,国际上目前并没有统一的规 则、标准、解决方案。在国内的相关研究中,清华大 学针对 NGSO 系统间干扰分析,创新提出了基于链 路夹角的概率分析方法[16],该方法在复杂的时空关 系特征中通过提取地面站共址时受扰链路与干扰 链路之间的夹角,比对实时夹角与产生有害干扰时 夹角的阈值,判断有害干扰情况的发生,为 NGSO 星 座间干扰分析提供了可参考的指标。但是,在链路 干扰保护夹角阈值的计算过程中,这一方法并没有 充分考虑当地球站位置发生变化时,星地链路距离 实时变化的特性,仅通过某一特定干扰场景下星地 距离确定干扰保护夹角阈值,没有充分体现空间位 置的时变特性对于干扰评估结果的影响,分析结果 与现实干扰情况可能存在一定偏差。本文 NGSO 系 统间干扰分析场景如图4所示:



图 4 不同 NGSO 卫星系统间干扰场景示意图 Fig. 4 Schematic of the interference scenario between different NGSO satellite systems

假设 NGSO 系统通信频段存在重叠时, NGSO 系统1 卫星的部分发射功率会被 NGSO 系统2 地面

$$I = P_1 G_1(\theta_1) G_2(\theta_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$
(1)

其中  $P_1$  为卫星发射功率,  $G_1$ 、 $G_2$  分别为天线在 特定角度的发射增益及接收增益,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为天线凝视 系统内部目标时与其他系统对象间的离轴角(如图 4 中所示),  $\lambda$  为工作波长, d 为干扰卫星与受扰地面 站间星地距离(即图 4 中虚线距离)。

在评估系统间干扰程度时,本研究参考 ITU 建 议书 ITU-R S. 1323,选用干扰噪声比 *I/N* 作为干扰 评估指标,如式(2)所示:

$$I/N = \frac{P_1 G_1(\theta_1) G_2(\theta_2)}{kT_2 W_2} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \qquad (2)$$

其中,*k*为玻尔兹曼常数,*T*<sub>2</sub>为接收机噪声温度,*W*<sub>2</sub>为接收机工作带宽。

### 2.2 星座间有害干扰概率仿真结果

在同频有害干扰分布仿真中,假设典型 Ka 频 段链路下行中心频点为 19 GHz,带宽为 3.9 MHz。 地面接收机噪声温度为 300 K。以表 1 中所列星座 为例,使用 Matlab 建立通信系统模型,各星座均采 用最佳仰角接入策略,地面用户可实时选择仰角最 大的卫星接入网络,星载天线采用可动点波束模 型,接入卫星采用凝视跟踪模式,即主瓣中心对准 地面用户站,其余卫星同频波束指向各自星下点。 星载天线波束方向图模型参考 ITU-R S. 1528<sup>[17]</sup>,其 表达式如式(3)所示:

$$G_{\rm T} = \begin{cases} G_{\rm m} - 3\left(\frac{\varphi}{\varphi_{\rm b}}\right)^2 & 0 < \varphi \le 1.5\varphi_{\rm b} \\ \\ G_{\rm m} - 6.75 - 25\lg\frac{\varphi}{1.5\varphi_{\rm b}} & 1.5\varphi_{\rm b} < \varphi \le Z \\ 0 & Z < \varphi \le 180^{\circ} \end{cases}$$
(3)

其中  $G_{\rm T}$  为发射增益,  $G_{\rm m}$  为主瓣最大增益,  $\varphi$  为 离轴角,  $\varphi_{\rm b}$  为 3 dB 波束宽度的一半, 参数 Z 等于 1.5 $\varphi_{\rm b}$  × 10<sup>[0.04×( $G_{\rm m}$ -6.75)]。参数取值参考 ITU 公布 的卫星网络资料,其中 OneWeb 卫星网络资料 ID 为 113520120,选取下行波束 GTA,  $G_{\rm m}$  为 27.6 dBi; O3b-A 卫星网络资料 ID 为 108520116,选取下行波 束 T1R,  $G_{\rm m}$  为 37.6 dBi;SpaceX 卫星网络资料 ID 为 117520027,选取下行波束 DB283,  $G_{\rm m}$  为 28.3 dBi。</sup> 地面终端天线方向图模型参考 ITU-R S. 1428<sup>[18]</sup>,其表达式如式(4)所示;

$$G_{\rm R} = \begin{cases} G_{\rm max} - 2.5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda}\varphi\right)^2 & 0 \leqslant \varphi < \varphi_{\rm m} \\ G_1 & \varphi_{\rm m} \leqslant \varphi < 95 \left(\frac{\lambda}{D}\right) \\ 29 - 25 \lg \varphi & 95 \left(\frac{\lambda}{D}\right) \leqslant \varphi < 33.1^\circ \\ -9 & 33.1^\circ \leqslant \varphi < 80^\circ \\ -4 & 80^\circ \leqslant \varphi < 120^\circ \\ -9 & 120^\circ \leqslant \varphi < 180^\circ \end{cases}$$
(4)

其中 $G_{\rm R}$ 为接收增益, $\varphi$ 为离轴角, $\lambda$ 为工作波 长,D为天线直径(本文仿真均选用 0.75 m 天线模 型), $G_{\rm max}$ 为主瓣最大增益,表达式如式(5)所示:

$$G_{\max} = 20 \lg \frac{D}{\lambda} + 7.7 \tag{5}$$

参数  $G_1$  与  $\varphi_m$  的表达式如式(6)、式(7) 所示:

$$G_1 = 29 - 25 \lg 95 \frac{\lambda}{D}$$
 (6)

$$\varphi_{\rm m} = 20 \, \frac{\lambda}{D} \, \sqrt{G_{\rm max} - G_1} \, (7)$$

考虑 NGSO 卫星系统地面站重合且任意系统不 实施干扰规避措施的极端情况下,假设受扰系统地 面站可选择视野范围内仰角大于 0°的 NGSO 卫星 接入,相同可视范围内施扰系统的任意 NGSO 卫星 均有向共址地面站发送同频信号的情况,基于式 (2)可计算得到 NGSO 系统间任意两卫星产生同频 下行信号时,在地面接收机产生的干扰噪声比,借 鉴 ITU-R S. 1323 建议书中指标,计算 *I/N*≥ -12.2 dB 的概率,即下行链路中施扰信号强度超过受扰系 统保护阈值,从而产生同频有害干扰的概率。在全 球不同位置的地面站进行以上计算,即可得到 NG-SO 系统间产生有害干扰概率分布图。

图 5 为 OneWeb 系统对 O3b 系统有害干扰概率 分布仿真结果,可见地面站位置不同,NGSO 系统间 产生大于保护阈值的有害干扰概率不同。由于 NG-SO 星座系统构型的对称性,影响这一概率分布结果 的主要因素是地面站所在纬度。当地面站位于低 纬度地区时,OneWeb 系统在较高仰角范围的卫星 出现概率较低,在低仰角范围区域出现概率大,如 图 3(a)所示;而 O3b 系统卫星出现概率分布集中于 东西方向,在高仰角范围和低仰角范围的出现概率 相对平均,如图 3(b)所示。这一分布特征的差异, 使低纬度地区地面站在可视范围选星组合中,有较 多组合可以符合干扰保护阈值,产生有害干扰的总 概率较小。随着地面站纬度的增加,卫星在可视范 围内的出现概率也随之变化,当纬度接近 50°时,两 系统的大概率出现区域在低仰角范围发生较大重 合,从而使有害干扰概率有所增加。



## 图 5 OneWeb 系统对 O3b 系统有害干扰概率分布图 Fig. 5 Schematic of the interference scenario between OneWeb and O3b satellite systems

图 6 为 OneWeb 系统对 SpaceX 系统有害干扰 概率分布仿真结果,与图 5 结果对比可见,随着施扰 系统构型变化,NGSO 系统间产生有害干扰概率分 布特征也随之改变。当地面站位于低纬度地区时, SpaceX 系统与 OneWeb 系统卫星出现概率分布相 近,均为在较高仰角范围的卫星出现概率较低,在 低仰角范围区域出现概率较大,如图 3(c)所示。这 种特征的叠加大大增加了同频共线干扰的概率,使 图 6 中有害干扰结果在低纬度地区呈现出较高的分 布。随着纬度增加至大于 50°的范围时,由于 SpaceX 系统特定倾角下的覆盖特性,使卫星出现概 率分布发生了较大变化,地面站可视范围内,有超 过一半的区域不会有卫星出现,从而使这一区域

0.02 0.03 0.018 *P* (*I/N*≥-12.2 dB) 0.02 0.016 0.01 0.014 0.012 50 100 0.01 -50 -100 纬度/(°) 经度/(°) (a)斜视图 0.02 0.018 50 0.016 纬度/ 0 0.014 -50 0.012 0.01 -150 -100 -50 0 50 100 150 经度/(°) (b) 顶视图

## OneWeb 系统卫星受干扰概率大大降低。

图 6 OneWeb 系统对 SpaceX 系统有害干扰概率分布图 Fig. 6 Schematic of the interference scenario between OneWeb and SpaceX satellite systems

图 7 为 O3b 系统对 SpaceX 系统有害干扰概率 分布仿真结果,与图 6 结果对比可见,随着受扰系统 构型变化,NGSO 系统间产生有害干扰概率分布特 征也随之改变。当地面站位于低纬度地区时,O3b 系统卫星出现概率分布集中于东西方向,在高仰角 范围和低仰角范围的出现概率相对平均,如图 3(b) 所示;而 SpaceX 系统在较高仰角范围的卫星出现概 率较低,在低仰角范围区域出现概率大,如图 3(c) 所示。这一卫星出现分布特征的差异使低纬度地 区有害干扰概率分布较低。随着纬度的增加,两系 统间卫星出现概率分布特征趋同,受覆盖范围限 制,高纬度地区两系统卫星均集中于低仰角区域, 从而使有害干扰产生的概率大幅增加。

基于以上仿真结果,可以看出,NGSO 星座系统 构型会直接影响不同纬度地面站可视范围内的卫 星出现概率分布,而系统间卫星出现概率分布趋同 时,会使同频有害干扰的概率增加,反之不同 NGSO 系统卫星在可视空域出现概率分布有较大差异时, 有害干扰较低。



## 图 7 O3b 系统对 SpaceX 系统有害干扰概率分布图 Fig. 7 Schematic of the interference scenario between O3b and SpaceX satellite systems

## 3 结论

对于 NGSO 系统间同频干扰概率评估问题,通 过分析星座构型与地面站可视空域内卫星出现概 率分布特性的关系,利用地面站接收端干扰噪声比 保护阈值建立了概率评估参数指标,并以 OneWeb 系统、O3b 系统以及 SpaceX 系统为例,分析了对于 全球范围地面站不同 NGSO 系统间发生有害干扰的 概率分布特性,当系统间卫星出现概率分布趋同会 使有害干扰概率增加,反之不同 NGSO 系统卫星在 可视空域出现概率分布的较大差异会有效降低有 害干扰概率。

建议未来在后发 NGSO 系统星座构型设计时, 应当充分考虑已部署或已申请网络资料的 NGSO 系 统的构型特征,在系统优化时着重针对可视空域内 概率分布特征进行差异化设计,以降低同频有害干 扰发生概率。而对于可视空域内出现概率分布趋 同的 NGSO 星座,后续应着重研究合理部署频率、时 间、空间分集的干扰规避策略,降低有害干扰发生 的概率。

### 致谢

感谢中国科协青年人才托举工程项目

(2021QNRC001)的资助。

#### 参考文献:

- [1] 杨文翰,花国良,冯岩,等. 星链计划卫星网络资料申报 情况分析[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 60-68.
- [2] 惠腾飞,张剑,刘明洋.新一代高通量卫星通信系统载
   荷关键技术研究[J].空间电子技术,2021,18(4):
   10-15.
- [3] WANG T J, LI W, LI Y. Co-frequency interference analysis between large-scale NGSO constellations and GSO systems [C]//2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2020;679-684.
- [4] TANG J Y, BIAN D M, LI G X, et al. Resource allocation for LEO beam-hopping satellites in a spectrum sharing scenario[J]. IEEE Access,9(8):56468-56478.
- [5] ZHANG C, JIN J, ZHANG H, et al. Spectral coexistence between LEO and GEO satellites by optimizing direction normal of phased array antennas [J]. China Communications, 2018, 15(6):18-27.
- [6] Maximum permissible levels of interference in a satellite network (GSO/FSS; non-GSO/FSS; non-GSO/MSS feeder links) in the fixed-satellite service caused by other codirectional FSS networks below 30 GHz; Recommendation ITU-R S. 1323 [R]. Geveva; International Telecommunication Union, 2002.
- [7] ITU-R. Artical 22 in radio regulations [R]. Geneva: International Telecommunication Union, 2019.
- [8] Analytical method to calculate short-term visibility and interference statistics for non-geostationary satellite orbit satellites as seen from a point on the Earth's surface: Recommendation ITU-R S. 1257[R]. Geveva: International Telecommunication Union, 2002.
- [9] Analytical method for determining the statistics of interference between non-geostationary-satellite orbit fixed-satellite service systems and other non-geostationary-satellite orbit fixed-satellite service systems or geostationary-satellite orbit fixed-satellite service networks: Recommendation ITU-R S. 1529 [R]. Geveva: International Telecommunication Union, 2000.
- [10] ITU-R. Coordination of the L5 satellite network in IF-IC2809 [DB/OL]. (2015-08-12) [2017-05-10]. https://www.itu.int/sns/ific61/ific2809.zip.
- [11] ITU-R. Coordination of the O3b-A satellite network in IF-IC2644 [ DB/OL ]. (2009-05-19) [2017-05-10]. https://www.itu.int/sns/ific6/ific2644.zip.

(下转第67页)